

INTERFAÇAGE ET CONTROLE COMMANDE DE PILES A COMBUSTIBLE POUR APPLICATIONS STATIONNAIRES ET TRANSPORT

Ianko Valero Exposito

► To cite this version:

Ianko Valero Exposito. INTERFAÇAGE ET CONTROLE COMMANDE DE PILES A COM-BUSTIBLE POUR APPLICATIONS STATIONNAIRES ET TRANSPORT. Sciences de l'ingénieur [physics]. Université Joseph-Fourier - Grenoble I, 2004. Français. NNT: . tel-00397448

HAL Id: tel-00397448 https://theses.hal.science/tel-00397448

Submitted on 22 Jun 2009

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.

UNIVERSITÉ JOSEPH FOURIER

N° attribué par la bibliothèque

<u>THESE</u>

pour obtenir le grade de

DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ JOSEPH FOURIER

Spécialité : Génie Electrique

préparée au Laboratoire d'Electrotechnique de Grenoble

dans le cadre de l'Ecole Doctorale « Electronique, Electrotechnique, Automatique, Télécommunications, Signal »

présentée et soutenue publiquement

par

Ianko VALERO EXPOSITO Ingénieur ENSIEG

le 13 Décembre 2004

INTERFAÇAGE ET CONTROLE COMMANDE DE PILES A COMBUSTIBLE POUR APPLICATIONS STATIONNAIRES ET TRANSPORT

Directeur de thèse : Seddik BACHA Co-directrice : Elisabeth RULLIERE

JURY

M. Stéphan ASTIER M. Mohamed MACHMOUM

M. Pierre CHARLAT M. Jean-Paul FERRIEUX M. Nick JENKINS

Mme. Elisabeth RULLIERE M. Seddik BACHA Rapporteur Rapporteur

Examinateur Examinateur Examinateur

Directrice de thèse Directeur de thèse

Dédié à mes parents, à mon frère Andoni et à ma copine Jezabel

« A quoi sert d'avoir une maison, si on n'a pas une planète tolérable où la placer » Henry David Thoreau

« Pour quoi cette technologie scientifique magnifique qui nous évite autant de travail et qui nous rend la vie beaucoup plus facile nous donne aussi peu de bonheur ? La réponse est : parce que nous n'avons pas encore appris à l'utiliser avec sagesse »
Albort Finstein

Albert Einstein

« La connaissance nous rend responsable » Ernesto Guevara, "El Che"

Remerciements

Ce travail de thèse a été réalisé au sein de l'Equipe « SYREL » (Systèmes et Réseaux Electriques) du laboratoire d'Electrotechnique de Grenoble. Il a été financé par une allocation du Ministère de l'Education Nationale, de la Recherche et de la Technologie.

Je voudrais tout d'abord remercier M. **Seddik BACHA**, Professeur à l'UJF de Grenoble, qui a été mon directeur de thèse et de DEA, lequel est devenu avec le temps un bon ami. Merci pour tout... pour m'avoir guidé durant toutes ces années, pour ton enthousiasme et ton dynamisme qui m'ont toujours accompagné, particulièrement quand j'en ai eu besoin. Mais surtout, je te remercie pour tout ton humanisme et ton amitié qui ont toujours été, tout au long de ces années.

Je voudrais aussi remercier Mme. **Elisabeth RULLIERE**, Maître de Conférences à l'ENSIEG, qui a co-encadré mes travaux de thèse. Je te remercie pour ta disponibilité, toujours prête à m'aider, et pour tes conseils qui ont toujours été précis et appropriés. Je te remercie également par tous tes efforts. Merci bien.

Je tiens également à remercier les membres du jury de thèse :

M. **Stéphan ASTIER**, Professeur au LEEI de Toulouse, et M. **Mohamed MACHMOUM**, Maître de conférences, habilité à diriger des recherches à l'IREENA de Saint Nazère qui m'ont fait l'honneur d'être les rapporteurs de mon mémoire. Merci pour l'intérêt que vous avez porté et pour vos remarques, toujours très constructives.

M. Nick JENKINS Professeur à UMIST / MCEE de Manchester qui m'a fait l'honneur d'accepter de faire partie du mon jury et qui m'a très aimablement accueilli lors de mes séjours à Manchester. Many thanks for all your advices, they have been a very preciously help.

M. **Jean-Paul FERRIEUX**, Professeur à l'UJF de Grenoble et Directeur adjoint du LEG, qui m'a fait l'honneur de présider mon jury.

à M. **Pierre CHARLAT**, Docteur ingénieur d'AXANE qui m'a fait l'honneur d'accepter de prendre part au jury.

Je tiens aussi à remercier spécialement les personnes qui ont collaboré pendant ces années d'une manière très étroite avec moi, je pense à **Ion Etxeberria** (Nunca saldare mi deuda contigo, nunca), **Nicolas Laverdure** (Ton aide a toujours été très précieuse, merci) et **Denis Candusso**.

Egalement, je voudrais remercier **R. Reyero** qui m'a fait confiance et ainsi, grâce à lui, j'ai pu connaître les pluvieux jours de Manchester. Gracias.

J'adresse mes sincères remerciements à tous les membres de l'équipe SYREL qui m'ont très gentiment traité, principalement à **D. Roye** et aussi à **J. Guiraud**. Mes remerciements vont également à tous mes stagiaires.

Egalement, je voudrais remercier tout le personnel du LEG pour son aide : chercheurs, techniciens (surtout **S. Catellani** et **J. Barbaroux**), personnel administratif, service informatique...

Je pense également à toutes les personnes que j'ai connu pendant ces trois années magnifiques au LEG, principalement : Gareth, Manuela, Thierry, Mélanie et Nikola avec lesquels j'ai un vrai lien d'amitié que je n'oublierais jamais. Je pense aussi à : Miguel, Farid, Stephan, Christophe, Malik, Raphaël, Vincent... La liste complète serait très longe, pardonnez-moi.

Je voudrais aussi remercier toute la communauté basque de Grenoble avec laquelle j'ai vécu des moments inoubliables : Grenobleko Gaztetxea (Gorka, Javi, Natxo, Luis, Ion) qui m'ont appris le vrai sens de l'amitié. Eskerrik asko. Eta besteei ere bai, mila esker, ez zaituztet ahaztuko (Xabi, Asier, Aitor, Haizea, Amaia, Izaskun, Unai, Miren, Roberto...).

Eta nola ez!!! Bikote napartar honi, **Unai** eta **Josu**, mila esker. Mila esker **Unai**: Zuri esker orain badakit zer den betirako lagun bat; zuk erakutsi didazu ez dagola mundu hontan laguntasunak igo ezin duen mendirik. Batez ere, tontorratik ikusten dena politagoa dela zu bezalako lagun euskaldun batekin gailurra jotzen denean. Mila esker **Josu**, badakit zure originaltasunaz zu zarena benetako lagun bat. Eskerrik asko biei Jerry Springerengatik

Je tiens à remercier ce couple Basque-Catalan magnifique qui a été ma « famille » en Angleterre. Ezin izango dut zuek nigatik egindakoa ahaztu. Eskerrik asko **Oier** (Munduko fisikaririk utopikoena) eta **Anna** (La meva lingüista i escriptora preferida, visca el catalá).

Je pense aussi à la communauté espagnole de Grenoble : Rosa (la mayor "cultureta" de Grenoble), Frances (toujours espagnole), Boris, Jose, Teresa, Jonatan, Silvia... avec laquelle j'ai vécu beaucoup d'expériences.

Je voudrais aussi remercier tous mes copains de Euskal Herria, Milla esker **Kuadrilla** por todos estos años que hemos pasado y seguiremos pasando juntos.

Finalement, je tiens à remercier ces personnes qui ont toujours été à côté de moi, toujours : à ma famille. Gracias **Aita y Ama** por haberme « aguantado » todos estos años, pues no debió ser fácil. Gracias por haberme apoyado cuando mas lo he necesitado, pues siempre habéis estado ahí. Pero sobretodo, gracias por haberme dado la oportunidad de ser quien soy, es a vosotros a quien se lo debo, gracias. Gracias también a ti, **Andoni**, mi hermano que nunca me ha fallado y que siempre me ha sufrido. Gracias hermano porque yo sé que siempre podré contar contigo.

Mais avant de finir, je voudrais aussi remercier cette personne qui a partagé avec moi pendant ces années... tout : Avec elle, j'ai vécu le bon, le mauvais et le pire, mais elle a toujours rendu tout ça meilleur. Gracias **Jezabel**. Nunca las palabras se han quedado tan cortas como hoy, para expresar lo mucho que te agradezco tu comprensión, tu paciencia, tu... todo. Gracias Jezabel por estar junto a mi y seguir compartiendo todo.

TABLE DE MATIERES

NOTATIONS	•••••	•••••	5

INTRODUCTION GENERALE	
-----------------------	--

CHAPITRE 1

SOURCI	E D'ENERGIE A PILE A COMBUSTIBLE	
1.1 L	a pile à combustible, généralités	
1.1.1	Historique	
1.1.2	Principe de fonctionnement	
1.1.3	Les différents types de piles à combustible	
1.1.4	La PEM	
1.1.5	Caractéristique tension - courant d'une PAC	
1.1.6	Rendement énergétique	
1.1.7	Performances	
1.2 G	énérateur à PAC	
1.2.1	En amont de la PAC	
1.2.2	En aval de la PAC	
1.2.3	Générateurs auxiliaires	
1.2.4	Architecture et contrôle commande du générateur	
1.3 D	omaine d'application	
1.3.1	Applications embarquées, transport	
1.3.2	Applications portables	
1.3.3	Applications stationnaires	
1.3.4	Sélection des applications	
1.4 N	Iodélisation de la pile à combustible	
1.4.1	Modèle stationnaire	
1.4.2	Modèle dynamique	
1.5 C	onclusions	

CHAPITRE 2

L'INT	ERFACE DE PUISSANCE D'UN GENERATEUR A PAC DIMENSIC	DNNEMENT ET
2.1	Les interfaces de puissance – cas particulier d'une PEM	
2.1.	1 Rôle des interfaces	
2.1.2	2 Structures des interfaces	
2.1.3	B Topologie de l'interface de puissance	54
2.2	Interface universelle - Briques élémentaires	
2.2.1	Modélisation de l'IP	58
2.2.2	2 Filtre de raccordement	

2.2.3	Commande rapprochée	
2.3 Di	mensionnement optimal	67
2.3.1	Formulation mathématique du problème d'optimisation	68
2.3.2	Sélection de l'algorithme d'optimisation	68
2.3.3	Les algorithmes génétiques	
2.3.4	Optimisation hybride	
2.3.5	Implémentation	
2.3.6	Application	
2.3.7	Résultats	
2.4 Co	onclusions	

CHAPITRE 3

CONT	ROLE COMMANDE DE L'INTERFACE DE PUISSANCE D'UNE PA	C 79
3.1	Schéma global du contrôle	
3.2	Contrôle du hacheur DC/DC de la PAC	
3.2.1	Régulateur continu - PI	
3.2.2	2 Régulateur numérique – RST	
3.3	Contrôle du hacheur de l'ES	
3.3.1	Modèle du hacheur réversible	
3.3.2	2 Boucle de courant	
3.3.3	Boucle de tension du bus continu	
3.4	Contrôle de l'onduleur de tension	
3.4.1	Source de courant contrôlée en puissance	
3.4.2	2 Source de tension	
3.5	Résultats expérimentaux	
3.5.1	Description du banc d'essais	
3.5.2	2 Régulation en courant, source de courant	
3.5.3	8 Régulation en tension, source de tension	
3.5.4	Conclusions concernant les résultats expérimentaux	
3.6	Conclusions	

CHAPITRE 4

Gest	ION D'ENERGIE D'UN GENERATEUR A PAC	
4.1	Niveau supérieur de contrôle d'un générateur à PAC	
4.1.	1 La PAC et ses auxiliaires	
4.1.	2 Interface de puissance	
4.1.	3 Contrôle de l'interface de puissance	
4.1.	4 Elément de stockage	
4.2	Système de sécurité	
4.3	Stratégie de commande	
4.4	Applications	
4.4.	1 Tramway	

4.4.2	Bus urbain	
4.4.3	Bâtiment	
4.5 Co	onclusions	
Conclu	JSIONS GENERALES	
BIBLIOG	GRAPHIE	
ANNEXE	S	
Les resso	urces énergétiques actuelles et l'hydrogène	
Les difféi	rents types de piles a combustible	
Etude tec	chnico-economique d'une application stationnaire	
Algorithm	nes génétiques	
Dimensio	nnement analytique	
Modèle d	e l'ES	
Descripti	on du banc d'essais	
Réponse	fréquentielle des correcteurs	
Validatio	n experimentale des modeles de PAC	

NOTATIONS

(A_1, B_1)	Numérateur et dénominateur d'une FT discrète par rapport à la consigne
(A_2, B_2)	Numérateur et dénominateur d'une FT discrète par rapport à la perturbation
$\mathbf{A}_{\mathrm{C}} = \begin{bmatrix} 2 & -1 \\ -1 & 2 \\ -1 & -1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} -1 \\ -1 \\ 2 \end{bmatrix}$ Matrice de commande
AFC	Pile à combustible alcaline ou alkaline fuel cell
AG	Algorithmes génétiques
ASI	Alimentation sans interruption
BF	Boucle fermée
BO	Boucle ouverte
BP	Bande passante
(C_1, C_2)	Condensateurs du cellule supérieur et inférieur respectivement du double hacheur
$(C_{2C_{1}}, C_{2C_{2}})$) Condensateur modélisant le phénomène parasite appelé « capacité de double couche » des électrodes de la PAC
C _{AC}	Condensateur du filtre de raccordement de l'OT à l'application
C _{Bus}	Condensateur connecté au bus continu
(C_{M1}, C_{M2})	Capacités du modèle de simulation de la PAC
C _{PAC}	Condensateur connecté aux bornes de sortie de la PAC
CEA	Commissariat de l'énergie atomique
D	Dépassement de la référence en %
DMFC	PAC alimentée directement par méthanol ou direct methanol fuel cell
E	Tension au point de raccordement
E^0	Potentiel thermodynamique d'équilibre à une température < 100 °C
E _{H2}	Consommation instantanée d'hydrogène
E_{H2_Equi}	Consommation équivalent d'hydrogène du générateur
E _{Rev}	Potentiel thermodynamique réversible de la réaction d'une PAC
E _{PAC MAX}	Tension maximale de la PAC en circuit ouvert
EPAC MAX Stand	Tension maximale de la PAC en circuit ouvert dans de conditions standards
Energie PAC	Energie totale produite par la PAC
EP	Electronique de puissance
ES	Elément de stockage d'énergie
Etat _{t=i}	Etat de charge de l'ES à l'instant i
F	Constante de Faraday, 96485 C

\mathbf{f}_{Appli}	Fréquence de la tension alternative de l'application
$f_{Modulante}$	Fréquence de la modulante
$f_{DC/AC}$	Fréquence de découpage de l'OT
$f_{DC/DC} \\$	Fréquence de découpage de l'hacheur parallèle
FEBUSS	Fuel cell energy systems standardised for large transport, busses and stationary applications
FO	Fonction objective
FPA	Nombre de fois que le système tombe en panne par année
FT	Fonction de transfert
HTA	Haute Tension type A
I ₀	Courant d'échange de la PAC
I ₁	Courant représentant le limite de densité de courant de la PAC
I _{Charge}	Courant demandé aux bus continu par l'OT
I _{Comp Est}	Courant estimé de référence pour le compresseur
Ig	Courant total fourni par le générateur
I _{PAC}	Courant de sortie de la PAC
Ir	Courant net fourni au réseau
I _S	Courant de sortie de l'OT
I_{SMAX}	Amplitude maximale du courant de sortie de l'OT
IG	Intégrateur Généralisé
IP	Interfaçage de puissance
ke	Paramètre de réglage de l'état de charge de l'ES
(Kp_1, Kp_2)	Paramètres de réglage du contrôle du taux d'oxygène
(L_{AC}, L_{AC2})	Inductances du filtre de raccordement en sortie de l'OT à l'application
L _C	Inductance série de la PAC
L _{Charge}	Inductance de l'application
L _{DC}	Inductance du hacheur parallèle
L _{ES}	Inductance du hacheur réversible en courant de l'ES
Lim_Pente	Variation maximale du courant permise par la limitation en pente
M_{H2}	Masse molaire du dihydrogène
(m_{AC}, m_{DC})	Rapports des amplitudes maximales entre la référence et la modulante
MCFC	PAC à carbonate de fondu ou molten carbonate fuel cell,
MLI	Modulation de largeur d'impulsions
MTEP	Millions de tonnes équivalents de pétrole
MTF	Durée moyenne de la panne ramenée à la durée totale de service

m _{elec}	Mols d'électrons mises en jeu lors de la réaction d'une PAC
$(n_{elec_r\acute{e}el}, n_{elec_})$	the) Nombre d'électrons échangés par la PAC, réellement et estimée respectivement
OT	Onduleur de tension
PAC	Pile à combustible
P ₀	Pression standard, 10 ⁵ Pa
P' _{Air}	Pression partiale de référence de l'aire
P _{Aux}	Puissance demandée par les auxiliaires
Pc	Polynôme caractéristique de Naslin
P _{Chaleur}	Puissance thermique produite par la PAC
P _{Dem}	Puissance instantanée demandée par l'application
P_{ES_Moy}	Puissance moyenne optimale de l'ES
(P'_{H2}, P_{H2})	Pression partielle de référence et réelle de l'hydrogène dans la PAC
$(P'_{O2} P_{O2})$	Pression partielle de référence et réelle l'oxygène dans la PAC
P _{PAC}	Puissance instantanée nette fournie par la PAC
P_{PAC_Moy}	Puissance à laquelle la PAC compense l'énergie fournie ou absorbée par l'ES
PAC	Pile à combustible
PAFC	PAC à a acide phosphorique ou phosphoric acid fuel cell
PEM	PAC à membrane polymère échangeuse de proton ou proton exchange membrane fuel cell
Pente _{Au}	Paramètre de l'automate pour limiter la variation maximale du courant de la PAC
p.p.m	particules par million
Q _{Air}	Débit d'air fourni par le compresseur, en m ³ /s
R	Constante de gaz parfait, 8.314 J·mol ⁻¹ ·K ⁻¹ ou kg·m ² ·s ⁻² ·mol ⁻¹ ·K ⁻¹
R _{AC}	Résistance représentant les pertes de conduction de l'OT
R _{AC2}	Résistance série de L _{AC2}
R_{Bus}	Résistance connectée en parallèle au bus continu
R _{Charge}	Résistance série de l'application
R _{DC}	Résistance représentant les pertes par conduction du hacheur élévateur
$R_{\text{Electronique}}$	Résistance de la PAC due aux transports des électrons
R _{ES}	Résistance représentant les pertes par conduction du hacheur réversible
(R_{Mpi}, R_{Ms})	Résistances du modèle de simulation de la PAC,
R _{Protonique}	Résistance de la PAC due aux transports des protons
R _t	Résistance totale de la PAC
(R _{Transfert_1} , R	Gransfert_2) Résistance de transfert de chaque électrode de la PAC

S _{Stc}	Stoechiométrie
SOFC	PAC à oxyde solide ou solid oxide fuel cell
T _{Automate}	Temps du cycle d'automate
T _C	Retard de calcul
T _m	Temps de montée
T _{MLI}	Période de la MLI
T _{PAC}	Température de fonctionnement de la PAC
T _{reps}	Temps de réponse à 95 % de la consigne
Ts	Période d'échantillonnage
ТЕР	Tonnes équivalent pétrole ≈ 11.600 kWh
THD	Taux de distorsion harmonique
(u_i, α_i)	Ordre de commande du branche i de l'OT et sa valeur moyenne
${f \widetilde u}_i$	Signal continu de commande de l'OT
(u_{DC}, α_{DC})	Ordre de commande du hacheur parallèle et sa valeur moyenne
(u_{DCi}, α_{DCi})	Ordres de commande du double hacheur parallèle et sa valeur moyenne
(u_{ES}, α_{ES})	Ordre de commande du hacheur réversible et sa valeur moyenne
V_{Appli}	Tension de l'application
V _{Air}	Volume d'une mole d'air dans les conditions de fonctionnement de la PAC
$\mathbf{V}_{\mathrm{Bus}}$	Tension du bus continu
(V_{C1}, V_{C2})	Tension des condensateurs du double hacheur élévateur
V_{ES}	Tension de sortie de l'élément de stockage
V _{O2}	Volume d'une mole d'oxygène dans les conditions de fonctionnement.
$V_{O2\Omega}$	Volume d'air compressé par radian par le compresseur
V _{PAC}	Tension de sortie de la PAC
Vs	Tension de sortie de l'OT par rapport au neutre
V_{sb}	Tension de sortie de l'OT par rapport au pôle négatif du bus continu
$V_{S \; fond}$	Amplitude de l'harmonique fondamental de la tension de sortie de l'OT
Vol _{PA}	Volume des cellules
W _{elec}	Energie électrique produite par la réaction de la PAC
X _{%O2}	Pourcentage d'oxygène en sortie
$(X_{\text{Max Fond,}} X_{\text{M}})$	(ax 3) Amplitude de l'harmonique fondamental et du troisième de la variable X
$(Z_{H_1}, Z_{H_2}, Z_{O_2})$	Z_{O_1} , Impédances faradiques de chaque électrode en fonction de la concentration d'hydrogène et d'oxygène dans les électrodes
Z _{réseau}	Impédance équivalente de raccordement au réseau
(α_{PAC}, k_C)	Paramètre du modèle simplifié de la PAC représentant les surtension à l'anode

	et à la cathode
α_{RR}	Rapport des coefficients du polynôme de Naslin
$(\beta_i, \beta'_i, \beta''_i, \beta)$	""i) Paramètres de calage des modèles de PAC et dépendants de T _{PAC}
δ_{AIR}	Densité de l'air
ΔG	Variation d'enthalpie libre appelée énergie libre de Gibbs
ΔH	Variation de l'enthalpie
$(\Delta S_{,} \Delta S_{Standard})$) Variation d'entropie quinconce et standard -0.164 kJ/(mol K)
$\zeta_{Cel_{PAC}}$	Constante de temps relative à la consommation d'oxygène par la PAC
ζ_{Comp}	Constante de temps du compresseur
τ_{DC}	Constante de temps du hacheur parallèle
$(\eta_{act_c},\eta_{act_a},\eta$	conc) Surtensions d'activation à la cathode, à l'anode et de concentration
η_{Comp}	Rendement volumique du compresseur
η_{ES}	Rendement énergétique de l'élément de stockage
η_{PAC}	Rendement global de la PAC
η(Théorique, Faradique, Matière	Réversible, Respectivement : rendement théorique, réversible, faradique, du combustible et du générateur
Φ	Déphasage entre la tension au point de raccordement et le courant de sortie de l'OT
$\Omega_{\rm C}$	Vitesse de rotation du compresseur
ω	Pulsation à la fréquence de l'application
ω_0	Première pulsation caractéristique du polynôme de Naslin
ω _c	Pulsation de coupure

INTRODUCTION GENERALE

Actuellement, la demande d'énergie ne cesse de grandir et la croissance économique est devenue synonyme d'une consommation d'énergie toujours plus importante.

Cette consommation énergétique a été et est encore possible grâce aux réserves en combustibles fossiles. Le rôle joué par le charbon dans ce contexte est maintenant mineur au profit du gaz naturel et le pétrole reste la principale source fossile utilisée. Néanmoins cette situation ne peut perdurer pour les raisons suivantes :

- Tout d'abord, **l'épuisement des ressources naturelles** apparaît dans un horizon relativement proche. L'augmentation de la consommation énergétique moyenne estimée ainsi que la croissance de la population de la terre en sont les principales causes. Cet aspect s'avère encore plus critique pour le pétrole, si aucune autre source ne peut prendre son relais dans le domaine du transport où il couvre 95% des besoins.
- La dépendance énergétique des pays développés, notamment européens, va grandissante. Cela est dû en partie à l'épuisement de leurs gisements, mais aussi à l'augmentation notable de leur consommation. Le pétrole est plus particulièrement à l'origine de cette dépendance. Pour des raisons politiques et financières des pays comme la France souhaitent vivement s'en affranchir d'autant plus que dans les régions productrices les régimes politiques sont le plus souvent instables.
- Enfin, **l'émission des gaz à effet serre**, (surtout celle du CO₂) générée lors de la combustion des énergies fossiles, a provoqué un changement climatique notable de la planète qui se traduit par exemple par un réchauffement de la planète ou, une modifications des courants marins. On estime même que la tendance actuelle de consommation conduirait à une situation irréversible avant la fin du XXI^e siècle.

Compte tenu de tout cela, une exploitation plus judicieuse de l'énergie et une transformation du secteur énergétique s'avère indispensables. Il faut tout d'abord rechercher de nouvelles sources d'énergie qui se substitueront au pétrole dans le domaine du transport. Le développement du véhicule électrique apparaît aujourd'hui comme la voie incontournable même si sa maturité n'est pas encore atteinte. Il faut également améliorer les générateurs actuels utilisant des énergies fossiles et en mettre au point de nouveaux plus efficients.

Dans ce contexte énergétique, la génération et l'exploitation de l'électricité sont donc des aspects clef. En effet, les énergies fossiles, à l'exception du pétrole, sont utilisées principalement pour la génération électrique qui représente l'un des principaux vecteurs

d'énergie. Enfin, il ne faut pas négliger certaines contraintes annexes telles la nécessité de stockage de l'énergie qui s'avère des plus contraignantes.

Les énergies renouvelables représentent actuellement un pourcentage très limité de l'énergie employée. Actuellement, seules l'énergie hydraulique et la biomasse sont exploitées massivement, cette dernière surtout dans les pays en voie de développement. Les autres types d'énergie renouvelable ne représentent que des espoirs pour l'avenir, puisque leur exploitation n'est pas encore mûre techniquement et leur rentabilité économique dépend toujours des subventions étatiques. En plus, la nature aléatoire de ces sources constitue aussi un handicap à surmonter avant de pouvoir être utilisées comme source d'énergie principale dans nos sociétés.

Compte tenu de cette situation, l'utilisation de **l'hydrogène comme vecteur d'énergie** apparaît actuellement comme une solution très prometteuse pour l'avenir. En voici les raisons :

- Bien que n'existant pas à l'état naturel, les ressources potentielles en hydrogène sont très importantes.
- L'hydrogène permettrait de solutionner le problème de stockage en grande quantité de l'électricité, ce qui constituerait une avancée significative pour le développement des véhicules électriques pour lesquels le stockage est une contrainte majeure. De plus, on pourrait avoir recours aux énergies renouvelables comme sources d'énergie principales en utilisant conjointement une Pile A Combustible (PAC) et l'électrolyse pour fabriquer son combustible l'hydrogène.
- L'utilisation d'hydrogène conduit à des rendements élevés. En effet, la transformation de l'hydrogène en énergie électrique via une PAC permettrait d'améliorer notablement les rendements obtenus avec les générateurs actuels.
- A tout cela, il faut ajouter qu'une correcte utilisation de l'hydrogène permettrait de réduire ostensiblement les émissions globales des gaz à effet serre.

Dans tous les cas, **l'utilisation de l'hydrogène comme vecteur d'énergie passe nécessairement par l'utilisation et le développement des PAC.** Les PAC, basées sur la réaction inverse de l'électrolyse, permettent non seulement la génération d'électricité à de très hauts rendements mais aussi la génération de chaleur. En plus, la PAC fonctionnant avec de l'hydrogène et de l'oxygène, ne donne pas lieu à des émissions polluantes.

Du fait de performances remarquables, la PAC est envisagée actuellement comme le futur générateur pour de nombreuses applications. Son haut rendement théorique conjugué avec la possibilité d'exploitation de la chaleur générée, ouvrent des perspectives nombreuses et intéressantes.

De plus, **la vaste gamme de puissance** offerte par les PAC fait qu'elle peut aussi bien être utilisée pour des applications portables n'ayant besoin que de quelques centaines de watts que pour de grands générateurs électriques raccordés au réseau. La PAC est donc pressentie pour être utilisée dans de nombreux domaines d'applications et plus particulièrement dans :

• Le domaine du transport. La PAC est très prometteuse pour l'élaboration du véhicule électrique, car elle constitue un progrès notable par rapport aux batteries en

raison de sa haute densité d'énergie, de sa capacité de stockage d'énergie (combustible) ainsi que de sa rapidité pour la recharge en combustible.

Ces aspects, conjugués avec la réduction des émissions et la substitution au pétrole, font de la PAC une voie de recherche très intéressante pour le véhicule électrique.

• Le domaine stationnaire. En comparaison des petits générateurs actuels (générateurs diesel, microturbines...), la PAC est plus performante et présente de nombreux avantages techniques, ce qui lui assure un avenir prometteur. Cependant, son important coût économique limite encore son utilisation.

Dans ce domaine, la chaleur émise par la PAC présente un grand intérêt ; cette dernière peut donc être utilisée en cogénération en formant un cycle combiné.

Notons également que les caractéristiques de fonctionnement des PAC sont très variées, car il en existe divers types selon la température de fonctionnement qui peut varier de 60 °C jusqu'à 800 °C.

Parmi les types de PAC existants, la PAC de **type PEM** (Pile à Membrane Echangeuse de Protons) est actuellement la plus mature technologiquement grâce à ses bonnes performances et aussi grâce aux améliorations que l'on peut espérer. Ainsi, elle fait l'objet de nombreuses recherches tant pour des applications stationnaires que pour des applications transport et on est assez proche de sa commercialisation.

Néanmoins, l'utilisation actuelle des PAC n'est pas sans d'inconvénient. En effet, comme pour toute technologie qui n'est pas encore totalement maîtrisée, divers aspects techniques limitent son développement et son utilisation à grand échelle telles la dégradation des matériaux des PAC fonctionnant à hautes températures ou la qualité de l'électrolyte et du catalyseur pour une PEM.

Il est à signaler également que les PAC ont besoin de certains auxiliaires pour garantir un fonctionnement correct. Dans la plupart des cas, ces auxiliaires telle l'interface électrique, sont également l'objet de recherche et d'améliorations. Cependant, l'aspect le plus contraignant d'une PAC reste toujours son coût économique élevé.

C'est dans ce contexte d'une source d'énergie très prometteuse mais pas encore mure pour être commercialisée à grande échelle que nous avons porté nos efforts sur l'interface électrique du générateur à PAC vue son importance : c'est lui qui conditionne l'énergie générée par la PAC sous forme de forts courants et de basses tensions en fonction de l'application tout en garantissant des conditions de fonctionnement sures. Il intègre de plus la plupart du temps une conversion continu / alternatif requise par de nombreuses applications.

L'interface électrique permet aussi de découpler la dynamique de la PAC de celle de la charge ; ceci assure une fonction de protection de la PAC vis à vis des brusques variations de charge susceptibles de l'endommager. Pour cela, un Elément de Stockage d'énergie (ES) faisant partie de l'interface, absorbe les pics de puissance avec une gestion de la répartition de l'énergie destinée à optimiser le fonctionnement de la PAC en fonction de critères définis « a priori » (consommation, taille de l'ES, émissions de $CO_2...$). Dans certains applications, cet ES peut aussi être utilisé pour stocker de l'énergie lors des périodes où la charge génère de l'énergie au lieu d'en consommer.

En conclusion, l'interface électrique est un élément indissociable d'un générateur à PAC puisque c'est au travers de lui que l'énergie produite par la PAC est transformée selon la

demande et aussi selon le mode de fonctionnement souhaité pour la PAC. Son dimensionnement et son contrôle sont donc fondamentaux.

L'objectif de cette thèse a donc été d'analyser en détail l'interface électrique utilisé par un générateur à PAC pour un domaine d'applications le plus vaste possible et le mieux adapté en vue d'une future commercialisation des PAC. L'interface électrique ou Interfaçage de Puissance (IP) utilisée dans de telles applications, est la base d'une procédé d'optimisation mettant en valeur l'importance de l'IP pour le développement des PAC et pour l'exploitation de son énergie. Ce procédé peut aussi servir à la création d'un outil d'optimisation bien adapté au dimensionnement des IP.

Notre souci premier dans ce travail a été le contrôle commande de l'IP. C'est ainsi que nous avons analysé tous les niveaux de contrôle en envisageant les différentes structures d'Electronique de Puissance (EP) possibles et en tenant compte des particularités que chaque application implique dans le contrôle commande.

Le rapport de cette thèse se décompose donc en plusieurs chapitres.

Le premier chapitre présente une description générale des générateurs à PAC. Nous commençons par un bref historique des PAC puis nous présentons sommairement le principe de fonctionnement des PAC en terminant par une synthèse des caractéristiques actuelles des différents types de PAC. Compte tenu de cette analyse, nos efforts de recherche ont porté sur la PEM. C'est pourquoi nous explicitons ensuite d'une manière plus détaillée le mode de fonctionnement de ce type de pile et nous analysons ses performances. Nous poursuivons par une présentation sommaire des auxiliaires du générateur à PEM, ce qui met en évidence la complexité d'un tel système. Enfin, nous précisons les différents domaines d'application des PAC en nous focalisant sur les applications les plus prometteuses pour une future commercialisation.

Les nouvelles applications potentielles combinant l'électrolyse et l'utilisation d'une PAC font ont aussi l'objet d'une analyse en fonction des applications envisagées dans le futur. En tenant compte des travaux précédents réalisés au Laboratoire d'Electrotechnique de Grenoble, nous proposons un modèle pour la PAC destinée à de telles applications.

Dans **le deuxième chapitre**, nous déterminons et optimisons l'IP pour les applications précédemment choisies. Pour cela, nous analysons d'abord le rôle que l'IP joue et les contraintes imposées par la PAC et par l'application. En fonction de cela, nous présentons les topologies et les structures les plus habituelles et les mieux adaptées et nous définissons l'interfaçage universel de puissance pour la PAC choisie. Cette IP est ensuite l'objet d'un procédé d'optimisation combinant les Algorithmes Génétiques (AG) et une méthode déterministe d'optimisation. Avec cette optimisation focalisée sur le rendement de l'IP, nous illustrons l'intérêt d'un bon dimensionnement. L'IP ainsi définie est celle que nous avons utilisé dans la suite de notre travail.

Dans le troisième chapitre, nous analysons le contrôle des variables intermédiaires de l'IP (courants, tensions...). L'ES et l'EP associée sont ici pris en compte, ce qui n'était pas le cas dans le chapitre précédent. L'analyse considère chaque convertisseur successivement : les correcteurs les mieux adaptés sont présentés. En utilisant les modèles du chapitre précèdent, les correcteurs sont réglés et validés en simulation. Pour l'Onduleur de Tension (OT), nous proposons divers types de régulation en répondant ainsi à toutes les possibles applications. Nous finalisons le chapitre avec les résultats expérimentaux concernant le contrôle de l'OT.

Le quatrième et dernier chapitre traite du niveau supérieur de contrôle commande d'un générateur à PAC. Dans ce chapitre, nous présentons d'abord le rôle de ce niveau de contrôle et les éléments le conditionnant. Nous scindons ce niveau en deux parties. La première concerne le système de sécurité, lequel limite la puissance de la PAC pour garantir des conditions de fonctionnement sûres ; nous présentons à cet égard un contrôle original du débit d'oxygène, car c'est lui qui limite la dynamique de la PAC dans nos applications. Les résultats obtenus sont comparés à ceux du système « classique ».

La deuxième partie concerne la stratégie de commande. Nous dévoilons trois stratégies de commande développées et/ou adaptées dans le cadre de cette thèse. Chacune d'elles optimise un critère donné de fonctionnement du générateur. Nous terminons le chapitre par les résultats obtenus en simulation de ces trois stratégies pour les applications choisies précédemment. Les données concernant ces applications sont relatives à des installations réelles.

Enfin, nous terminons le rapport par les conclusions générales et les perspectives pour de futurs travaux. Plusieurs annexes permettent également d'éclairer le lecteur sur des points relatifs à l'un des quatre chapitres que celui-ci souhaiterait approfondir.

<u>CHAPITRE 1</u> <u>Source d'energie a pile a combustible</u>

La PAC constitue actuellement un générateur électrique de très grandes performances. Un rendement global élevé et un vaste domaine d'applications lui confèrent un avenir prometteur. Grâce aux récentes avancées techniques, la commercialisation des PAC apparaît actuellement très proche, même si celles-ci n'ont pas encore atteint leur maturité technique.

C'est dans ce contexte que ce chapitre décrit d'abord le fonctionnement des PAC et plus particulièrement celui des PEM. Cette analyse précise l'état de développement technique actuel ainsi que les éléments composant le générateur. Après cela, l'étude présente les domaines d'applications des PAC. Parmi ces applications, on sélectionnera les mieux adaptées actuellement pour l'utilisation d'une PAC.

La dernière partie du chapitre concerne le modèle de simulation d'une PAC. La modélisation de la PAC constitue un passage obligé si l'on veut utiliser au mieux la pile dans des applications données.

1.1 La pile à combustible, généralités

1.1.1 Historique

Même si la PAC n'a pas encore atteint sa maturité technique, son principe est connu depuis longtemps. Il fut découvert en 1802 par l'anglais Sir Henri David qui démontra d'une façon théorique, la possibilité de créer de l'énergie électrique à partir de l'électrolyse inverse de l'eau. Cependant, ce sera un autre anglais, Sir William Grove, juriste et amateur physicien, qui réalisera la première PAC en 1839. Cette PAC alimentée en hydrogène et oxygène était composée de quelques cellules et montrait déjà qu'une grande surface de contact était indispensable.

Après cette expérience, cette technologie a été quelque peu oubliée du fait du développement plus rapide des générateurs thermiques et des piles électriques. En 1855, de nouveaux structures de PAC fonctionnant à haute température sont réalisés en utilisant du charbon comme combustible. Néanmoins, il faudra attendre 1895 pour que la première PAC d'une puissance considérable (1.5kW) soit construite par W. W. Jacques.

Du fait de ses caractéristiques prometteuses, la PAC était déjà considérée comme une source d'énergie potentielle pour des véhicules ou des applications domestiques.

Après la deuxième guerre mondiale, les travaux pionniers de l'ingénieur anglais Francis T Bacon permettront un développement remarquable de la technologie. Ses travaux à Cambridge se focaliseront sur une PAC à hydrogène/oxygène en milieu KOH aqueux. Ces travaux se concrétiseront par la réalisation d'une PAC de plusieurs kilowatts avec une bonne valeur de densité de courant. Ceci montrera l'intérêt de la PAC comme source d'énergie de grande densité massique. Ces recherches attireront l'attention de la NASA et feront que dés les missions lunaires APOLLO (au début des années 60), des PAC seront utilisées dans les fusées spatiales.

En parallèle, d'autres études furent réalisées avec des résultats positifs et très prometteurs. Citons par exemple ceux de Justi et Winsel en Allemagne sur les piles alcalines et ceux de H. K. Ihrig, aux Etats Unis.



Figure 1.1 Dessin de Sir W Grove de la première PAC

Ces premiers résultats ainsi que la situation énergétique des années 1970 conduiront à l'initiation de nombreux programmes de recherche sur les PAC, la plupart d'entre eux aux Etats Unis. Néanmoins, ces projets n'atteindront pas les objectifs fixés et leurs échecs au début des années 80, expliqueront un intérêt moindre pour les PAC.

Cependant, grâce à de récentes et substantielles avancées technologiques, l'avenir des PAC est de nouveau prometteur. Comme précédemment, de nombreux projets de recherche ont été mis en place par de grandes entreprises principalement. Ils bénéficient très souvent d'aides publiques dans le contexte de programmes nationaux ou multinationaux. Parmi eux, il faut signaler par son importance et son envergure, le projet américain PC-25 (plus de 300 unités dans le monde), concernant des piles à acide phosphorique de 200 kW.

Au vu des résultats obtenus, de nouveaux projets (programmes nationaux, projets européens...) entrevoient déjà de faire de la PAC une source d'énergie rentable économiquement, fiable et sûre.

1.1.2 Principe de fonctionnement

La PAC est un générateur électrochimique basé sur le procédé inverse de l'électrolyse. Ce générateur **génère de l'électricité** en mettant en jeu sans les mélanger un combustible et un comburant à travers un électrolyte. La réaction globale du procédé est décrite ci-dessous.

$$H_2 + \frac{1}{2}O_2 \longrightarrow H_2O \tag{1.1}$$

La PAC se compose des cellules unitaires. Une cellule est constituée d'une anode et d'une cathode alimentées en comburant et combustible respectivement. Ces deux éléments sont séparés par un électrolyte et deux électrodes. L'électrolyte, solide ou liquide, doit permettre la circulation des ions sous une forme plus ou moins hydratée en empêchant aux électrons de passer. Les électrodes constituent les points de connexion au circuit électrique externe. Elles sont généralement construites avec des matériaux poreux complémentés par des catalyseurs.

Du fait de la faible puissance générée par une cellule unitaire, plusieurs cellules sont connectées en série pour constituer des stacks. On augmente ainsi la valeur de la tension de

sortie ce qui facilite l'utilisation de l'énergie électrique. Cependant, cela exige la présence d'un élément additionnel entre les cellules, la plaque bipolaire. Celle-ci, conductrice électriquement, ne doit en aucun cas autoriser le contact entre l'hydrogène et l'oxygène qui passent à son travers.

L'énergie électrique générée par une PAC est caractérisée par une **relation non linéaire entre la tension et le courant**, qui ont respectivement une petite et une grande valeur. Cette réponse électrique dépend du courant de la pile, de la température et de la concentration des espèces chimiques principalement.



Figure1.2 Stacks de PAC

Figure 1.3 Fonctionnement d'une PAC H_2/O_2

Les combustibles les plus utilisés sont l'hydrogène, le gaz naturel, le monoxyde de carbone et le méthanol. Le choix du combustible dépend énormément du type de PAC et de l'application. Le comburant est généralement l'oxygène de l'air.

Si la PAC est alimentée en hydrogène et en oxygène purs, les seuls sous-produits sont de la chaleur et de l'eau sans aucune émission polluante. Du fait de la qualité de la chaleur produite, son exploitation est envisageable : chauffage, cogénération (exploitation simultanée de la chaleur et de l'électricité générée par la PAC) ou cycle combiné (combinaison d'une PAC avec une turbine, généralement). Ceci augmente donc le rendement global et élargit le domaine d'applications.

A la différence des piles et des batteries classiques, la PAC a besoin de renouveler et d'évacuer continûment les réactifs et les sous-produits pour fonctionner. Donc, la production d'énergie n'implique pas une dégradation de la structure de la PAC.

1.1.3 Les différents types de piles à combustible

Actuellement, les PAC existantes peuvent être classées en 5 catégories suivant la température de fonctionnement et le type d'électrolyte :

- Pile à membrane polymère échangeuse de protons, Proton Exchange Membrane fuel cell : PEM.
- Pile à acide phosphorique, Phosphoric Acid Fuel Cell : PAFC.
- Pile à oxyde solide, Solid Oxide Fuel Cell : SOFC.
- Pile à carbonate de fondu, Molten Carbonate Fuel Cell : MCFC.
- Pile alcaline, Alkaline Fuel Cell : AFC

• Pile alimentée directement par méthanol, Direct Methanol Fuel Cell : DMFC.

Les principales caractéristiques de chaque PAC sont présentées dans le Tableau 1.1.

	PEM	DMFC	AFC	PAFC	MCFC	SOFC
Temnérature	60 - 100 °C	60 – 100 °C	60-80 °C	180-220 °C	600 – 700 °C	650 – 1000 °C
Electrolyte	Solide Membrane polymère	Solide Acide fort / membrane	Liquide Alcaline	Liquide immobilisé H ₃ PO ₄	Liquide immobilisé Carbonate fondu	Solide Céramiques à base d'oxydes
Electrodes	Téflon avec carbone et platine	Téflon avec carbone et platine	Nickel	Téflon avec papier de carbone ou carbone platiné	Oxyde de Ni et alliages de Ni	Nickel
Ion active	H^{+}	H^+	OH-	H^{+}	CO3 ⁻	0 ⁻
Catalyseur	Pt	Pt	Pt or Ni	Pt	Ni	Perovskites
Principaux poisons	СО	СО	CO, CO ₂ et CH ₄	CO et S	S	S
Aspects électriques	700 mV 600 - 750 mA/cm ² 420 - 500mW/cm ²	500-600 mV 100 - 200 mA/cm ² 200 mW/cm ²	$\begin{array}{c} 600 - 800 \text{ mV} \\ 100 - 400 \\ \text{mA/cm}^2 \\ 80 - 240 \\ \text{mW/cm}^2 \end{array}$	600 - 800 mV 100 -400 mA/cm ² 80- 240 mW/cm ²	$\begin{array}{c} 750 - 900 \text{ mV} \\ 100 \text{ et } 200 \\ \text{mA/cm}^2 \\ 900 \text{ et } 150 \\ \text{mW/cm}^2 \end{array}$	$\begin{array}{c} 650 - 840 \text{ mV} \\ 200 - 400 \\ \text{mA/cm}^2 \\ 260 - 335 \\ \text{mW/cm}^2 \end{array}$
Gestion de l'eau	Vapeur	Vapeur	Vapeur	Vapeur	Produits gazeux	Produits gazeux
Rendement électrique	32 - 40 %	32 - 40 %	55 - 60 %	36 - 45 %	43 - 60 %	50 - 55%
Cogénération	Difficile	Très difficile	Très difficile	Facile	Très facile	Très facile
Combustible le plus probable	Hydrogène	Méthanol	Hydrogène	Hydrogène (gaz naturel)	Méthane, hydrogène ou gaz naturel	Méthane, gaz naturel
Etat de la technologie	Assez mature	Expérimental	Mature	Aboutie	Pas encore mature	Expérimental
Avantage	Compacité Dynamique Coût	Coût Combustible	Rendement Bien connue Densité volumique	Cogénération Bien connue Fiabilité	Cogénération Combustibles possibles	Cogénération Combustibles possibles
Inconvénient	Cogénération Combustibles possibles	Réponse dynamique Diffusion travers la membrane	Empoissonne- ment des catalyseurs	Coût d'investisse- ment Amélioration	Coût d'investisse- ment	Coût d'investisse- ment
Domaine d'application probable	Transport Stationnaire Portable	Transport Portable	Spatial	Stationnaire en cogénération	Stationnaire en cogénération	Stationnaire en cogénération

Tableau 1.1 Synthèse des paramètres des PA
--

Pour une analyse plus approfondie de chaque PAC, le lecteur peut se référer à de nombreuses études. Nous en citons ici quelques unes [Fch-00][Lar-00][Ste-00].

Actuellement, les efforts en recherche et développement portent principalement sur les PEM et les SOFC, puisque ce sont les plus prometteuses. Cette étude se focalisera sur les PEM.

1.1.4 La PEM

1.1.4.1 Cellule élémentaire

La cellule d'une PEM est constituée physiquement de trois éléments principaux (Voir Figure 1.4).

- L'électrolyte solide constitué par une membrane ionomère.
- Les deux électrodes composées d'une couche de diffusion et d'une couche active.
- Les deux plaques bipolaires.

Les réactions chimiques d'une cellule sont illustrées par les réactions (1.2) et (1.3).

$$H_2 \rightarrow 2H^+ + 2e^- \text{ à l'anode}$$
(1.2)

$$\frac{H_2}{2O_2 + 2H^+ + 2e^-} \rightarrow H_2O \text{ à la cathode}$$
(1.3)

$$\frac{\sqrt{2}O_2 + 2H^+ + 2e^-}{(catalyseu)} \xrightarrow{\text{Zone}}_{(catalyseu)} \xrightarrow{\text{Z$$

1.1.4.2 L'électrolyte, la membrane polymère

L'électrolyte de la PAC est constitué d'une **membrane échangeuse de protons** dont le rôle principal est le transfert des protons H^+ de l'anode vers la cathode, ce qui a lieu avec une conductivité protonique voisine de 10^{-1} S/cm [Can-02].

Physiquement, elle se situe entre les zones actives des électrodes (Voir Figure 1.4). Sa structure se base sur des groupements acides échangeurs de protons, généralement HSO_3 ou COOH. Du fait de ce caractère acide, le fonctionnement de la PAC ne donne pas lieu à des problèmes de carbonatation. En revanche, le seul catalyseur possible est le platine qui est très cher.

Cette membrane est un isolant électronique -les électrons devant circuler via le circuit électrique externe. Par contre, elle est perméable aux gaz. Cela évite que le comburant et le combustible migrent par perméation et réagissent sur les électrodes sans produire d'électricité, mais en générant par contre de la chaleur et de l'eau. Une autre fonction de cette membrane est le support physique des électrodes.

En conséquence, son dimensionnement sera le résultat d'un compromis en fonction de ces critères : besoins mécaniques, conductivité ionique, perméabilité des gaz, caractéristiques d'hydratation et coût de fabrication évidemment. Il faut souligner que l'épaisseur physique

(généralement entre 50 et 200 μ m à l'état sec) de la membrane varie selon l'état d'hydratation en augmentant jusqu'à 40 %. Par exemple, le NAFION 117[©] passe de 178 μ m à 250 μ m lors d'une absorption d'eau [Can-02].

La conductivité de la membrane **dépend fortement de son état d'hydratation**. Sa valeur peut varier dans un rapport de plus de 700 (de 3 m Ω à 2.3 Ω). Dans les conditions idéales, la membrane est saturée en vapeur. Un assèchement de la membrane (bilan négatif) conduit à une augmentation de la résistance ionique. Par contre, trop d'eau (bilan positif) conduit au noyage des électrodes, ce qui gêne la diffusion des gaz et le transport de matières. En conséquence, la gestion de l'eau en général et de l'hydratation de la membrane en particulier, constituent un élément critique pour le rendement. De plus, la température et la concentration en groupement ionique influencent sa conductivité : la résistance est divisée par deux, lorsqu'on passe de 25 °C à 80 °C.

Le passage d'eau à travers la membrane est régi principalement par deux phénomènes :

- Les protons ont besoin de l'eau de solvatation pour migrer sous l'effet du champ électrique de l'anode vers la cathode. Ce procédé, appelé électro-osmose, provoque donc la traversée de la membrane par de l'eau.
- Le gradient de concentration en eau aux bornes de la membrane provoque un flux d'eau en sens inverse de la cathode vers l'anode.

Méthodes d'hydratation de la membrane

Pour contrôler l'hydratation de la membrane, deux solutions sont possibles. Elles se différencient par la manière de fournir et d'évacuer l'eau, soit sous forme liquide, soit sous forme gazeuse [Poi-00][Can-02].

- Séparation du système d'humidification et de refroidissement : Les gaz, saturés en eau à l'entrée de l'anode et de la cathode, apportent l'eau nécessaire pour la membrane sous forme gazeuse. Le refroidissement de la PAC se fait par un circuit indépendant dans les plaques bipolaires en utilisant un humidificateur. Ceci constitue la topologie la plus usuelle.
- Humidification et refroidissement simultanés: L'autre topologie ne dispose pas d'un circuit spécifique pour le refroidissement. A l'entrée de la PAC, l'eau liquide qui est récupérée à la sortie est ajoutée aux gaz. Cette eau est destinée tant à refroidir qu'à humidifier la PAC. Ce système, dont la gestion de l'eau est plus complexe, a été développé par Nuvera pour éliminer l'humidificateur [Nuv].



Figure 1.6 Modes d'hydratation de la membrane

Actuellement, le NAFION[©] constitue le type de membrane le plus utilisé. En effet, il n'existe pas de membrane de type basique qui soit suffisamment stable chimiquement dans un milieu H_2/O_2 en permettant le transfert des ions de l'anode à la cathode.

1.1.4.3 Les électrodes

Séparées par la membrane, les deux électrodes rendent possibles les deux demi-réactions : la réduction à la cathode et l'oxydation à l'anode qui produisent les électrons traversant les électrodes. Les exigences concernant les électrodes sont principalement au nombre de trois :

- **Présenter une surface de contact** la plus large possible entre les réactifs, le catalyseur et l'électrolyte
- **Permettre aux espèces protoniques** d'aller depuis les sites catalytiques d'oxydation de l'hydrogène vers les sites où l'oxygène est réduit
- Evacuer les électrons des sites anodiques vers les sites cathodiques

Donc, les électrodes dont l'épaisseur -membrane comprise- est inférieure au millimètre, doivent êtres conductrices électriquement et très poreuses. Pour prendre en compte ces fonctions contradictoires, le meilleur compromis consiste en des électrodes volumiques constituées principalement d'un matériau conducteur (carbone sous forme d'un feutre ou d'un papier), un polymère ionique (PTFE ou Téflon) et un catalyseur (particules de platine). Le platine est appliqué par dépôt, poudre de carbone platiné, sur la face du carbone qui est en contact avec la membrane. On peut distinguer deux régions différentes dans ces électrodes selon leur fonction et leur constituant [Can-02][Bul-97].



Figure 1.7 Electrode cathodique

Figure 1.8 Schéma de connexion des plaques bipolaires

Zone diffusionnelle

Cette zone se compose d'un élément hydrofuge en PTFE, de la plaque bipolaire et de la zone active de chaque électrode. Dans cette zone, les espèces chimiques volumiques, fournies par la plaque bipolaire, se déplacent uniformément vers la zone active de l'électrode. Cette diffusion des espèces a lieu sous plusieurs formes : diffusion chimique, convection mécanique ou thermique. L'exploitation correcte de la surface de contact du catalyseur exige que la diffusion soit très uniforme dans cette zone. Ceci empêche la création de points « chauds » dans les électrodes.

Cette zone doit permettre l'évacuation de l'eau produite. Elle constitue donc un élément à considérer avec soin pour la gestion de l'humidité de la PAC. Le matériau constituant doit également présenter une bonne stabilité en milieu corrosif.

Zone active

Les réactions électrochimiques proprement dites ont lieu dans cette zone. Elle se compose du catalyseur et du polymère ionique, lesquels sont en contact avec l'électrolyte. De ce fait, cette zone constitue l'interface électro-chimique de la PAC par le triple contact entre l'électrolyte, le catalyseur et les réactifs diffusés dans la zone diffusionnelle. Une fois que le réactif a trouvé un grain de platine, la réaction se produit et les électrons vont dans les conducteurs électriques tandis que les protons traversent l'électrolyte, ce qui permet la génération d'électricité. La géométrie de cette zone influence notablement la valeur de la surface de contact.

La **surface de contact constitue en effet un point critique** pour la PAC, car la réaction ne se produit qu'au contact du catalyseur, à savoir le platine qui est le mieux adapté. Celui-ci dont les particules ont un diamètre d'environ 2 nanomètres, permet une grande surface de contact, s'il est bien distribué et réduit la barrière de potentiel. Cependant, il est très cher et actuellement de nombreux travaux sont en cours pour réduire sa quantité en optimisant la taille des particules, la répartition, la géométrie à l'échelle locale et la géométrie de la couche active.

Notons que la nature des processus diffusionnels et réactionnels de catalyse influent énormément sur les caractéristiques de la PAC : performances, valeur de la surtension d'activation à l'anode et à la cathode.

1.1.4.4 Les plaques bipolaires

Les plaques bipolaires constituent l'élément de **connexion externe de chaque cellule** ; soit à une autre cellule (la plaque bipolaire est la même pour les deux cellules) soit au circuit externe électrique, plaque monopolaire. Ces plaques sont connectées à la zone de diffusion des électrodes.

Il existe plusieurs types de plaques bipolaires. Généralement, elles sont en graphite non poreux (matériel résistant à la corrosion acide) avec des canaux usinés avec une géométrie spéciale. Cependant, à cause de leur coût élevé, certains constructeurs proposent des matériaux alternatifs tels une mousse métallique qui assure la distribution des gaz à l'anode et à la cathode. Le matériau constituant la mousse véhicule les électrons, tandis que le gaz circule dans l'espace poreux (Nuvera). Une autre possibilité consiste à utiliser des composites organiques (CEA).

Ces plaques jouent **plusieurs rôles** dans le fonctionnement de la PAC. L'une des principales fonctions est d'assurer la diffusion de l'hydrogène à l'anode par l'une de ses faces ainsi que de l'oxygène à la cathode sur l'autre face. Elle doit donc être imperméable aux réactifs.

En même temps, la plaque doit évacuer les gaz non consommés et de l'eau à l'anode. La géométrie de ces canaux usinés influence fortement ce transport. La résistance de transfert d'électrons vers la zone diffusionnelle est aussi influencée.

Elles ont aussi comme fonction d'assurer une conductivité électrique entre cellules (supérieure à 10 S/cm) en collectant les électrons. Enfin, les plaques bipolaires participent à la tenue mécanique de la PAC et constituent un élément critique pour la dissipation de la chaleur produite dans la réaction d'oxydoréduction.

1.1.5 Caractéristique tension - courant d'une PAC

Ce paragraphe étudie la réponse électrique en régime stationnaire de la PAC.

L'énergie électrique de la PAC dépend du déplacement des charges électriques (ions et électrons) entre l'anode et la cathode lors de la réaction chimique. Cette réaction implique une variation d'entropie, ΔS [kJ/(mol K)] et une enthalpie libre appelée énergie libre de Gibbs ΔG [J/mol]. Cette variation d'enthalpie est la partie récupérable du travail sous la forme d'énergie électrique. Une autre partie, T_{PAC} ΔS , est l'énergie transformé en chaleur. Cela est représenté par l'équation suivante.

$$\Delta G = \Delta H - T_{PAC} \Delta S \tag{1.4}$$

Avec :

- ΔH Variation de l'enthalpie de la réaction ou chaleur de réaction à pression constante, J/mol.
- T_{PAC} Température de fonctionnement de la PAC, K.

En sachant que ΔG correspond à m_{elec} mols d'électrons (2) mises en jeu lors de la réaction, la tension maximale de la cellule en circuit ouvert, E_{PAC MAX}, est donnée par l'équation (1.5).

(1.5)

$$\Delta G + m_{elec} F E_{PAC MAX} = 0$$

Où : F est la constante de Faraday, 96485 C.

La variation de l'enthalpie libre dépend de la température et de la forme, liquide ou gazeuse, de l'eau obtenue. Dans des conditions standards de fonctionnement (pression : 10^5 Pa et température : 25 °C), la variation d'enthalpie libre est égale à $\Delta G = -237$ kJ pour chaque mole d'hydrogène consommée avec de l'eau liquide. Avec de l'eau gazeuse, sa valeur est égale à 229 kJ/mol H₂. La tension obtenue est :

$$E_{PACMAX} = -\frac{-237.10^3}{2 \times 96485} = 1.23V \quad \text{Eau liquide.}$$
(1.6)

$$E_{PACMAX} = -\frac{-229.10^3}{2 \times 96485} = 1.18V \text{ Eau sous forme de gaz.}$$
(1.7)

En tenant compte de l'équation (1.2), la valeur de tension maximale peut s'écrire sous la forme de l'équation (1.8) [Ger-96].

$$E^{0} = E_{PAC_MAX_s \tan dard} + \frac{\Delta S_{\text{Standard}}}{2F} (T - 298.15)$$

$$(1.8)$$

Où : $\Delta S_{Standard}$ et $E_{PAC MAX_{standard}}$ représentant respectivement sont la variation d'entropie standard (-0.164 kJ/(mol K)) et la tension maximale réversible standard (1.23 V). E⁰ est le potentiel thermodynamique d'équilibre à une température quelconque (inférieure à 100°C).

Cette tension maximale diminue, lorsque la température augmente. Les pressions partielles instantanées des gaz (P_{H2} et P_{O2}) influencent également la différence de potentiel selon la **loi de Nerst.**

$$E_{\text{Rev}} = E^0 + \frac{R \cdot T_{PAC}}{2 \cdot F} \cdot \ln\left(\frac{P_{H2}}{P_0} \sqrt{\frac{P_{O2}}{P_0}}\right)$$
(1.9)

 $O\dot{u}$: P_0 est la pression standard, 10^5 Pa, E_{Rev} correspond au potentiel thermodynamique réversible de la réaction, R est la constante de gaz parfait qui vaut 8.314 [J·mol⁻¹·K⁻¹] ou [kg·m²·s⁻²·mol⁻¹·K⁻¹].

Cependant, lorsque la cellule débite un courant, I_{PAC} , cette tension de sortie diminue selon l'équation (1.10). Cela est dû à plusieurs irréversibilités, décrites ci-dessous.

- Surtensions d'activation à la cathode η_{act_c} et à l'anode η_{act_a} . Cela résulte du contrôle d'une électrode par une cinétique électrochimique lente. Les surtensions d'activation sont directement liées à la vitesse des réactions électrochimiques. Elles sont plus élevées à la cathode.
- **Pertes ohmiques.** Elles traduisent les résistances au transport des électrons et des protons. Les pertes relatives au transport d'électrons ont lieu dans les plaques bipolaires, les interfaces de contact et dans la partie conducteur électronique des électrodes. La résistance électronique est habituellement constante, tandis que la résistance protonique est proportionnelle au courant et dépend fortement de l'état de la membrane. Les pertes se localisent dans la membrane principalement. Le calcul de ces pertes se fait avec la loi d'Ohm :

Pertes ohmiques = (
$$R_{\text{électronique}} + R_{\text{protonique}}$$
) $I_{PAC}^2 = R_t I_{PAC}^2$ (1.10)

• Surtension de concentration, η_{con} . Dès qu'une espèce réactive est consommée dans l'électrode, une perte de potentiel se produit due à l'incapacité du matériau de maintenir la concentration. Donc, un gradient de répartition de la concentration de l'espèce existe dans l'électrode volumique. Cette surtension est particulièrement importante pour de fortes densités de courant. Notons que dans ce cas, apparaît également une limitation de potentiel dû au noyage des électrodes.

$$V_{PAC}(I_{PAC}) = E_{\text{Rev}} - |\eta_{act_a}(I_{PAC})| - |\eta_{act_c}(I_{PAC})| - R_t \cdot I_{PAC} - |\eta_{con}(I_{PAC})|$$
(1.11)

<u>Nota</u>: La surtension représente la différence entre le potentiel d'équilibre, E_{Rev} et le potentiel effectif V_{PAC} de l'électrode.

En conclusion, la réponse électrique d'une cellule est influencée par tous ces phénomènes. Chacun d'eux est prépondérant selon la valeur de la densité du courant. La Figure 1.9 illustre la réponse électrique en régime stationnaire qui est une image du rendement.



Figure 1.9 Exemple de courbe de polarisation d'une cellule de pile [Can-02]

Cette courbe de polarisation permet de constater que la diminution des surtensions à la cathode et de la résistance de la membrane sont des points fondamentaux en vue d'une amélioration des performances.

1.1.6 Rendement énergétique

Le rendement énergétique de la PAC est très élevé puisqu'il ne se voit **pas limité par le cycle de Carnot**. Le combustible est directement transformé en électricité sans passer par le stade thermique. Le rendement est défini par le rapport entre l'énergie électrique produite directement utilisable, W_{elec} ou ΔG , et l'énergie thermique libérée par la réaction chimique, ΔH . Le rendement théorique maximal d'une PAC peut donc s'écrire sous la forme (1.12).

$$\eta_{Theorique} = \frac{W_{elec}}{\Delta H} = \frac{m_{Elec} \cdot F \cdot E_{PAC_MAX}}{\Delta H} = \frac{\Delta G}{\Delta H} = 1 - \frac{T_{PAC} \cdot \Delta S}{\Delta H}$$
(1.12)

Ce **rendement réversible théorique est très élevé**. Par exemple, à 25°C, il peut atteindre 83 % pour de l'eau liquide, et 95% pour de l'eau sous forme gazeuse. Cependant, dans la réalité, cette valeur n'est pas atteignable, car les surtensions et résistances de la PAC font chuter le rendement lorsqu'un courant s'établit. Ce rendement qui est représenté par la tension de sortie est donné par l'équation (1.13).

$$\eta_{reversible} = \frac{E_{PAC}}{E_{PAC} MAX}$$
(1.13)

En conséquence, pour une tension de sortie de 0.7 V à 25 °C et de l'eau sous forme liquide $(E_{PAC MAX} = 1.23)$, la valeur sera 0.7/1.23 = 57 %.

En considérant l'énergie et la puissance de la PAC, il faut introduire un autre rendement : le **rendement faradique**. En effet, le nombre d'électrons réellement échangés, $n_{elec_réel}$, n'est pas exactement celui estimé par la consommation en comburant et combustible, n_{elec_the} . Le rendement faradique est calculé à l'aide de l'équation (1.14).

$$\eta_{Faradique} = \frac{n_{elec_r\acute{e}el}}{n_{elec_the}}$$
(1.14)

Cela est dû aux réactions électrochimiques parallèles et aux réactions chimiques entre les espèces réactives catalysées et les matériaux d'électrodes. Pour le cas d'une PEM, alimentée en oxygène et hydrogène, on peut considérer que le rendement faradique est égal à 1.

Dans les cas où le combustible est fourni en excès pour prévenir tout déficit des réactifs, un autre coefficient affecte le rendement : le **rendement de matière**, $\eta_{matière}$. La valeur est habituellement de 95%, car on considère que presque tout réagit.

On arrive enfin au **rendement du système**, $\eta_{Système}$. Le conditionnement de la PAC demande une grande quantité d'énergie qui peut être fournie par la PAC elle-même lors du régime permanent, ou par des sources auxiliaires d'énergie, lors des transitoires. Cette consommation dépend des auxiliaires employés : compresseur, reformeur (Voir §1.2.1.1), ventilateurs, circuit de refroidissement, valves. Il est calculé en utilisant la formule ci-dessous.

$$\eta_{Système} = \frac{P_{nette}}{P_{brute}} = \frac{P_{PAC}}{P_{PAC} + P_{Aux}}$$
(1.15)

Où :

 $P_{Aux} \ \ \, Puissance \ \, demandée \ \, par \ \, les \ auxiliaires.$

P_{PAC} Puissance nette fournie par la PAC.

En définitive, le rendement global du générateur sera calculé par l'équation (1.16) :

 $\eta_{PAC} = \eta_{Th\acute{e}orique} \cdot \eta_{R\acute{e}versible} \cdot \eta_{Faradique} \cdot \eta_{Mati\acute{e}re} \cdot \eta_{Syst\acute{e}me}$

Si l'on compare cette valeur à celle obtenue pour d'autres sources d'énergie comme le moteur thermique classique, la microturbine ou le générateur diesel, la PAC affiche un net avantage.

Il va sans dire que l'exploitation de la chaleur produite, $P_{Chaleur}$, conduit à un rendement énergétique global encore plus grand. Cela conduit à une plage de valeurs comprise entre 36 et 80%. L'équation (1.17) permet d'évaluer la chaleur produite.







1.1.7 Performances

La réponse électrique de la PEM est fortement dépendante des conditions physiques de fonctionnement (température, pression et composition des gaz). Concernant **la température**, une augmentation rend la pile moins sensible au monoxyde de carbone -CO- et permet d'augmenter la tension de sortie, généralement entre 1.1 et 2.5 mV/°C (Voir Figure 1.13). Cela s'explique de la manière suivante :

- La résistance interne de la PAC diminue principalement du fait de la diminution de la résistance ionique de l'électrolyte.
- Le transfert de matières aux électrodes est amélioré.

Cependant, un fonctionnement aux hautes températures engendre un problème d'hydratation pour la membrane à cause de la haute pression du vapeur. Cela provoque une perte de conductivité de la membrane.





Figure 1.13 Influence de la température

Une augmentation de **la pression** améliore les performances de la PAC, car la surtension cathodique est réduite. La Figure 1.12 montre l'influence de la pression sur la tension. Par contre, l'énergie nécessaire pour cette compression limite notablement le gain en puissance.

Actuellement, la dégradation de la PAC est un aspect qui n'est pas très bien connu. Néanmoins, certaines expériences ont conclu qu'une augmentation de la pression limite légèrement la durée de vie. La sensibilité du catalyseur au CO diminue du fait de l'augmentation de la pression et de la température.

1.2 Générateur à PAC

Dans la réalité, une PAC ne peut pas fonctionner toute seule. En fait, de **nombreux éléments** additionnels sont nécessaires. Ces éléments assurent de bonnes conditions de fonctionnement et adaptent l'énergie produite par la PAC aux besoins de la charge. Ils dépendent fortement de trois facteurs :

- Le type de PAC employée.
- L'application envisagée.
- La localisation du système.

Malgré sa généralité, cette description se focalise sur la pile de type PEM.

Les auxiliaires peuvent être classifiés selon leur fonction comme le diagramme de la Figure 1.14 le montre.



Figure 1.14 Schéma global d'un générateur à PAC

1.2.1 En amont de la PAC

1.2.1.1 L'alimentation du combustible

Les PAC peuvent être alimentées en :

- hydrogène pur stocké.
- combustible (gaz naturel, essence, méthanol..) qui doit être réformé (sauf pour les DMFC).

Pour produire l'hydrogène sur place, les PAC ont besoin d'un **reformage du combustible** qui est généralement réalisé à des températures supérieures à 350 °C.
Ce processus peut se faire à l'intérieur de la PAC ou à l'extérieur en fonction de la température de fonctionnement. Les PAC à haute température ont un reformeur interne tandis que pour celles à basse température, il se situe à l'extérieur. Le reformage interne conduit à de meilleurs rendements énergétiques à pression atmosphérique. Par contre, la PAC est plus complexe et le coût de maintenance plus élevé.

Le **reformeur externe** d'une PAC se base sur les techniques connues de **vaporeformage et d'oxydation partielle**. La seule différence par rapport à un reformeur classique est la taille. Le choix du dispositif tiendra compte des critères de production : démarrages rapides et fréquents, réponse dynamique, compacité, etc.

Le choix de la technologie et du combustible dépendent énormément de l'application et on doit prendre en compte le type de PAC utilisé, l'énergie primaire disponible, le degré de pureté de l'hydrogène, les contraintes, etc. Du fait de la complexité du processus, de nombreuses topologies cohabitent selon la disposition des échangeurs de chaleur, des turbocompresseurs, des radiateurs...

Dans le domaine stationnaire, le **gaz naturel** semble être la principale source d'énergie primaire du fait de :

- sa disponibilité (large réseau de distribution dans les pays développés).
- son coût compétitif.
- réserves importantes.

En outre, la quantité d'hydrogène consommée par une PAC fonctionnant continûment conduit à une alimentation en gaz naturel via des pipelines. Pour les autres applications, le choix est plus large : **méthanol, éthanol, essence, hydrogène pur**... car les contraintes sont très différentes selon l'application.

D'un point de vue électrique, le reformeur est l'élément le plus contraignant pour la dynamique. Cela est dû aux nombreuses réactions chimiques concernées et à **l'inertie thermique très grande**. En plus, un tel processus consomme une grande partie de l'énergie produite par la PAC. C'est pourquoi il est très intéressant d'intégrer le reformeur au cœur de la PAC afin de réduire la consommation thermique.

1.2.1.2 L'alimentation en comburant

Le comburant généralement utilisé est de l'oxygène pris dans l'air ambiant sauf pour des installations particulières comme par exemple les sous-marins et les navettes spatiales pour lesquels on utilise de l'oxygène pur. L'alimentation peut se faire via une pompe ou via un compresseur. Dans le premier cas, la PAC travaille à pression atmosphérique tandis que dans le deuxième, elle travaille sous pression. Le choix du mode de fonctionnement dépend de l'installation, car ceci influence le rendement du générateur (conversion électrochimique et consommation du compresseur) ainsi que le procédé d'humidification des réactifs. A pression atmosphérique, les rendements en tension sont inférieurs mais le système physique est plus simple.

La **consommation énergétique** d'un compresseur qui dépend fortement du point de fonctionnement, est considérable : elle peut représenter jusqu'à 20 % de la consommation totale. Il constitue également, une limitation pour la réponse dynamique de la PAC à cause de ses constituants mécaniques. C'est donc un élément critique du générateur.

L'air ambiant est souvent filtré à cause des polluants à travers des filtres volumineux qui induisent des pertes de compression. De plus, ils supportent mal les hautes températures et on doit procéder à une régulation de la température de l'air ambiant.

Habituellement, les PEM fonctionnent sous pression, car cela augmente la densité de puissance et facilite la gestion hydraulique et thermique. Mais le système devient plus complexe et la durée de vie peut se voir réduite légèrement. En outre, un humidificateur doit être placé après le compresseur pour humidifier les membranes.

1.2.2 En aval de la PAC

1.2.2.1 Les gaz d'échappement

Pour générer de l'énergie, il est essentiel d'évacuer les gaz à l'anode (gaz inertes) ainsi qu'à la cathode (air saturé en eau), puisqu'ils empêchent la réaction.

A l'anode, deux modes de gestion sont envisageables en fonction de la sortie :

- **Mode bouché** : Il n'est applicable que si l'hydrogène est très pur et si l'électrolyte n'est que très peu perméable vis-à-vis de ce qui vient de la cathode. Ce système requiert une purge périodique. Avec ce fonctionnement, au moins 95 % de l'hydrogène réagit.
- Mode non bouché : Si la stœchiométrie est proche de l'unité, presque tout l'hydrogène peut être consommé. La partie restante est évacuée vers un brûleur catalytique. Si, par contre, une grande quantité d'hydrogène ne réagit pas, elle est réinjectée à la PAC à travers un circuit de re-circulation après un traitement. Ce dernier mode de fonctionnement est plus complexe mais conduit à un meilleur rendement.

A la cathode, l'air appauvri en oxygène et saturé en eau, peut être réutilisé ou par contre être rejeté dans l'atmosphère. On peut en tirer partie du fait de la pression résiduelle, de son énergie calorifique et de la présence d'eau à la température de la PAC.

Après une séparation entre l'air et l'eau, il est assez fréquent d'utiliser cette eau pour humidifier les gaz en amont et pour le processus du reformeur. Cependant, de l'eau est aussi produite par la PAC, donc il faudra également prévoir de l'évacuer.

Si la PAC travaille sous pression, une turbine utilisant cet air permet de récupérer une partie de l'énergie de compression, augmentant ainsi le rendement global.



Figure 1.15 Principe d'échappement de l'hydrogène



1.2.2.2 Interface électrique

Comme il a déjà été indiqué, l'énergie générée par une PAC a la particularité de l'être avec de forts courants continus et généralement avec une dynamique lente.

Néanmoins la nature des charges électriques est généralement alternative et requiert une dynamique rapide, bien qu'elle puisse être très variée. Cela exige donc l'utilisation d'une interface électrique de puissance entre les deux. C'est sur cet élément que nous avons concentré notre travail de recherche au cours de la thèse.

1.2.2.3 Gestion de la chaleur

La réaction globale d'une PAC est exothermique. Il y a de plus d'autres sources de chaleur dans le système global : le reformeur où ont lieu des réactions exothermiques, le compresseur, et d'autres éléments électriques tels que les moteurs de pompes et les convertisseurs. Toutefois, quelques éléments consomment de la chaleur : réactions endothermiques du reformage (vapo-reformage) ou l'apport de chaleur nécessaire pour l'humidification des gaz.

Le générateur a donc besoin d'un système de gestion thermique, plus précisément de **refroidissement**, pour que la température reste toujours dans une plage garantissant le bon fonctionnement de la PAC. Pour évacuer la chaleur, on utilise généralement des échangeurs (la plupart du temps avec de l'eau liquide ou surchauffée) composés de **deux circuits** : un circuit interne pour la PAC et un autre externe pour son utilisation.

Dans certains cas, cette chaleur est simplement évacuée vers l'atmosphère et donc, un module de refroidissement est indispensable. Par contre, dans d'autres cas, la quantité de chaleur générée permet son exploitation (système de chauffage, réseau de chaleur et même **cogénération**). Cette exploitation dépend énormément du type de PAC et de l'application. Un cycle combiné est aussi possible, mais à l'état actuel, il n'est envisageable que pour des grandes unités utilisant une MCFC ou SOFC.

1.2.2.4 Gestion de l'eau

Dans le cas d'une PEM, l'eau est produite sous forme liquide à la cathode ; pour d'autres PAC (SOFC ou MCFC) elle l'est à l'anode. Comme il a été indiqué précédemment, la gestion de l'eau constitue un point vital et elle doit toujours être régulée. Pour plus d'information, le lecteur peut consulter §1.1.4.2.

1.2.3 Générateurs auxiliaires

Même si le générateur est autonome en régime permanent, il ne l'est pas lors du démarrage. Ainsi, le système a besoin d'une source auxiliaire d'énergie pour assurer sa propre consommation. Cette source d'énergie auxiliaire est aussi nécessaire par des raisons de sécurité (panne au niveau de la PAC ou de la charge).

Ce besoin énergétique se matérialise par deux sources :

- Une source d'énergie thermique : Certaines PAC et des éléments du générateur comme le reformeur travaillent à des températures élevées. Pour démarrer, ils doivent être chauffés par un élément externe, généralement des brûleurs.
- Une source d'énergie électrique : Pour démarrer, le contrôle et l'IP ont besoin d'électricité. Celle-ci est généralement fournie par des batteries rechargeables, lorsque le système arrive au régime permanent, cette source peut alors être utilisée pour améliorer le rendement et la dynamique du système.

1.2.4 Architecture et contrôle commande du générateur

Du fait des caractéristiques de la PAC, le contrôle commande représente un point essentiel et complexe. Physiquement, il comprend tous les capteurs et tous les actionneurs de commande du groupe électrogène. Il inclut également le système nécessaire à l'implémentation du code de contrôle.

En fonction de certains critères, ce contrôle réalise la gestion d'énergie du générateur en assurant la sécurité de fonctionnement et le respect des contraintes imposées par la charge. Il déterminera le flux optimal de la puissance générée par la PAC et celle de l'ES. Tout cela complexifie son implémentation. Le contrôle de l'IP s'avère donc une pièce vitale dans la gestion d'énergie du générateur. Nos efforts de recherche se focaliseront sur cet aspect.

Ce contrôle commande concerne plusieurs modes de fonctionnement :

- Le régime transitoire la phase de démarrage, les séquences d'arrêt et le mode dégradé.
- Le régime permanent.



Figure 1.17 Schéma global du contrôle commande d'un générateur à PAC

1.3 Domaine d'application

Le domaine d'application des PAC est très vaste du fait de la diversité des caractéristiques de chaque type de PAC. Par exemple, la puissance peut aller de quelques watts jusqu'à plusieurs mégawatts.

En tenant compte de cette diversité, le but de ce paragraphe est de présenter sommairement les applications réelles où la PAC pourrait remplacer un générateur d'énergie traditionnel ou l'ES actuel tel des batteries. On présente également des nouvelles applications potentielles qui combinent de la PAC et l'électrolyse. Cette étude permet de déterminer les applications les plus prometteuses sur lesquelles on focalisera nos efforts.

On peut classer ces applications suivant trois grandes catégories :

- Applications embarquées, transport
- Applications portables
- Applications stationnaires

1.3.1 Applications embarquées, transport

La source d'énergie motrice est la PAC dont la puissance peut varier de quelques kilowatts à plusieurs centaines de kW. Elle peut être utilisée aussi bien pour des voitures que des scooters ou pour des autobus et des tramways. Ces derniers, par exemple, constituent l'une des applications les plus importantes en terme de puissance : la puissance requise peut aller jusqu'à plusieurs centaines de kilowatts avec d'importantes phases de récupération d'énergie lors des freinages, ce qui implique la nécessité d'employer plusieurs stacks (Voir Figure 1.18).



Figure 1.18 Comparaison du tramway classique avec un tramway à base de PAC

<u>Nota</u>: Dans les schémas, le terme « PAC » englobe la PAC et ses auxiliaires ainsi que le stockage du combustible.

Dans le cas d'un autobus, la puissance demandée est inférieure et donc l'intégration d'une PAC peut se faire avec un seul stack (Voir Figure 1.19).



Figure 1.19 Schéma d'un bus urbain à base de PAC

Cependant, dans ce domaine, l'application à laquelle est consacrée la plupart des efforts de recherche est la voiture électrique dont la puissance est environ de 50 - 70 kW.



Figure 1.20 Comparaison d'une voiture thermique classique avec une voiture à PAC

Historiquement, cette filière a été largement étudiée suite aux incitations des institutions. Ceci a conduit de nombreux constructeurs automobiles à s'intéresser au sujet et explique la mise au point de prototypes déjà très avancés. Cependant, les applications les mieux adaptées à une future commercialisation sont le bus urbain et le tramway, car ils constituent une flotte facile à entretenir avec des contraintes bien connues. Pour plus d'information, le lecteur peut se référer à l'annexe A3.

Pour ce type d'applications, les caractéristiques critiques sont la compacité, le type de combustible utilisé et la faculté de production à grande échelle. Du fait des rapides appels de puissance et des périodes de freinage, la PAC doit être associée par un ES.

Le type de PAC le plus utilisé est la PEM. Cependant, les DMFC et les SOFC commencent à attirer l'attention du fait du type de carburant utilisé.

1.3.2 Applications portables

La PAC peut aussi être utilisée pour fournir de l'énergie à des appareils tels les téléphones, les ordinateurs, les installations de télécommunication, des applications pour le loisir... Dans ce cas, la puissance peut atteindre quelques centaines de watts. Du fait de la diversité des applications, il est difficile de donner un schéma représentatif global. Néanmoins, on peut se référer à la Figure 1.21 à titre d'exemple.



Figure 1.21 Schéma d'un véhicule électrique de faible puissance ou d'une installation portable

Même si ce domaine a pendant longtemps été laissé de côté, il connaît actuellement de grandes avancées grâce aux travaux faits dans les autres domaines.

L'autonomie et la haute densité d'énergie sont les éléments déterminants à prendre en compte pour ce type d'application.

Là encore, la PAC la plus utilisée est la PEM mais l'utilisation des DMFC est de plus en plus envisagée.

1.3.3 Applications stationnaires

Dans ce domaine, on peut classer les applications comme suit :

1.3.3.1 Charge isolée

La PAC doit alimenter en permanence et d'une façon autonome une charge isolée. Elle peut être associée à un ES pour fournir la puissance nécessaire de la charge. Le temps de démarrage et la réponse dynamique de la PAC sont des critères rédhibitoires, car ils conditionnent la taille de l'ES. Le rendement et l'utilisation de la chaleur sont les paramètres fondamentaux pour valoriser l'installation. Tous ces aspects font de la SOFC et de la PEM les meilleures candidates. Dans ce domaine, la PAC s'intègre généralement facilement dans les installations existantes lesquelles utilisent principalement des générateurs diesel (Voir Figure 1.22).



Figure 1.22 Comparaison du générateur diesel classique avec un générateur à base de PAC

1.3.3.2 Source de secours - ASI

La PAC ne doit fonctionner que dans le cas où il y a une défaillance dans le système principal d'énergie (en général le réseau). Ces systèmes sont connus sous le nom d'Alimentaion Sans Interruption, ASI, en anglais Uninterruptible Power Systems, UPS. Leur domaine d'application est très vaste : hôpitaux, centrales téléphoniques, bâtiments administratifs mais aussi simplement ordinateurs.

La puissance nominale peut varier de plusieurs kilowatts jusqu'à quelques centaines de kilowatts. Ces applications exigent généralement un **démarrage rapide** et un **taux de défaillance minimal**. Pour ces raisons, les PAC les mieux adaptées sont celles fonctionnant à basse température telles les PEM ou les PAFC.

La PAC peut être intégrée de plusieurs manières en fonction de l'application. En général, les PAC remplacent des batteries dans le cas des faibles puissances ou des générateurs diesel dans le cas de puissances plus importantes.



Figure 1.23 Exemple d'utilisation des PAC pour une ASI quelconque.

1.3.3.3 Raccordement au réseau

La PAC, raccordée au réseau, envoie toute l'énergie au réseau électrique. Elle peut être employée par exemple comme soutien de poste ou pour améliorer la qualité de l'énergie. Ces applications s'inscrivent dans le contexte de la production décentralisée ou de la génération d'énergie dispersée. La puissance délivrée est habituellement constante avec des variations

très lentes liées aux variations journalières de la consommation. La PAC seule peut donc satisfaire les variations dynamiques sans aucun ES (Voir Figure 1.24).



Figure 1.24 PAC raccordée en parallèle au réseau



Figure 1.25 Utilisation d'une PAC pour un Dynamic Voltage Restorer, DVR

Les aspects-clés de ce domaine sont le **rendement** et l'utilisation de la **chaleur** dont l'exploitation aide à rentabiliser le générateur. Cette chaleur est néanmoins fortement conditionnée par la température de fonctionnement. C'est pourquoi la pile de type SOFC semble bien adaptée pour ce type d'application. La Figure 1.26 illustre une telle application. A la différence des autres cas, le fonctionnement en cogénération est possible et même celui d'un cycle combiné.



Figure 1.26 Système combiné PAC – turbine à gaz

1.3.3.4 Combinaison avec des énergies renouvelables

Comme il a été indiqué précédemment, la PAC combinée avec l'électrolyse constitue un système réversible en terme de stockage d'énergie. Ce système réversible peut répondre à l'aspect aléatoire de la production électrique à partir d'énergies renouvelables.

On peut donc imaginer de stocker l'énergie lors de périodes de grands vents ou de fort ensoleillement sous forme d'hydrogène. Cet hydrogène serait transformé en électricité via une PAC, lorsque les énergies renouvelables ne pourraient pas satisfaire la demande. En outre, cela permettrait d'atténuer énormément les variations de puissance provoquées par les variations instantanées de l'ensoleillement ou du vent.

Dans ces applications, le **rendement global** du système réversible Electrolyse-PAC est le principal facteur critique. La PEM semble la PAC la mieux adaptée.



Figure 1.27 Système réversible PAC - Electrolyse combinée à des générateurs d'énergies renouvelables

1.3.4 Sélection des applications

Historiquement, dans le domaine stationnaire, les efforts se sont d'abord concentrés sur les PAFC. Cependant, dans les dernières années, d'autres PAC se sont positionnées telles que la PEM ou la SOFC. Du fait principalement de problèmes techniques, la PAFC n'a pas atteint les objectifs espérés. Par contre, les PEM ainsi que les SOFC se sont beaucoup améliorées et les perspectives d'amélioration futures sont encourageantes.

Pour la PEM, les efforts menés par les constructeurs d'automobiles qui n'hésitent pas à investir des milliards d'euros pour des recherches, favorisent son développement. Ainsi, actuellement, de nombreux constructeurs de PEM se sont associés tant à des constructeurs automobiles qu'à des compagnies électriques, ce qui laisse imaginer qu'une production à grande échelle de ce type de PAC sera envisageable pour les domaines automobile et stationnaire.

Cependant, l'utilisation des PAC pour des usages stationnaires reste en général au stade du prototype voire à celui de l'expérimentation à cause du fort coût du kW installé. Ceci n'empêche pas de faire des projections pour l'avenir. Il est ainsi possible d'envisager des marchés « niches » où il y aurait rentabilité. Ainsi, les PAC sont déjà utilisées comme **source d'énergie de secours de grands bâtiments** (hôtels, hôpitaux...) toujours raccordés au réseau. Les puissances de ces installations vont de 75 kW à 300 kW [FEBUSS].

En ce qui concerne les applications de type transport, les initiatives publiques sont le moteur qui incite au développement des PAC. Le secteur le mieux adapté pour l'entrée des PAC est celui du parc de transport public : **bus urbain et tramway** principalement. Les puissances de telles applications sont comprises entre 100 kW et plusieurs centaines de kilowatts.

En définitive, tout cela nous a conduit à nous focaliser sur les PEM d'une puissance aux alentours de 100 kW utilisées pour les applications suivantes : bus urbain, tramway et source d'énergie de secours de grands bâtiments.

Pour une analyse plus détaillée des applications, le lecteur peut se référer à l'annexe A3.

1.4 Modélisation de la pile à combustible

Actuellement, la modélisation d'une PAC peut être envisagée de deux manières différentes :

- Utilisation des lois physiques, modèle de connaissance.
- Utilisation de résultats expérimentaux, modèle de représentation.

La première méthode cherche à comprendre et à représenter le fonctionnement du système, tandis que l'autre ne vise qu'à représenter un cas particulier. En conséquence, la première démarche couvre un domaine d'applications plus large du fait qu'elle est plus scientifique et plus quantitative. Cependant, à l'heure actuelle, un calage empirique du modèle à la PAC réelle s'avère le plus souvent nécessaire. Pour notre étude, nous avons choisi un modèle de connaissance.

Le modèle de simulation d'une PAC **dépend principalement de son utilisation**. Un modèle très précis exige un niveau de complexité très élevé, ce qui a comme conséquence un poids de calcul plus important et donc une utilisation plus limitée. Néanmoins, dans certains cas, cette précision est nécessaire.

Certains **phénomènes physiques relatifs à la PAC** peuvent, suivant l'analyse à réaliser, revêtir plus ou moins d'importance. Ainsi, par exemple, les modèles destinés au contrôle commande ne nécessitent pas la prise en compte des phénomènes physiques au niveau des électrodes. Par contre, pour l'étude des matériaux visant à leur amélioration, il sera impératif de comprendre et modéliser ces comportements. Les modèles se focalisent donc sur les phénomènes qui influent notablement sur les paramètres à prendre en compte dans l'étude. La complexité du modèle augmente évidemment en fonction du nombre de phénomènes simulés.

L'échelle de temps de simulation constitue également un facteur déterminant pour le choix du modèle, puisque les dynamiques des différents phénomènes physiques mis en jeu sont différentes. La Figure 1.28 illustre l'importance de ce paramètre.



Constantes de temps

Figure 1.28 Echelle de temps de quelques phénomènes intervenant dans un générateur à PAC [Can-02]

En conclusion, tout cela nous conduit à un compromis entre la précision et la complexité du modèle retenu suivant son utilisation. L'étude s'intéressera aux principaux phénomènes qui auront une influence sur la réponse électrique globale de la PAC.

A l'heure actuelle, les travaux concernant la modélisation d'une PAC sont déjà nombreux. Néanmoins, il reste encore certains aspects à analyser et améliorer. Au sein du LEG, quelques travaux ont déjà été faits sur la modélisation des PAC : [Ger-96][AWa-01][Can-02]. En se basant sur ces travaux -principalement [Can-02]- et d'autres [Lar-00][Wal-01][FEBUSS], on a réalisé la modélisation de la PAC.

La PAC modélisée est une PAC de type PEM dont la puissance brute est égale à 120 kW. Les principaux paramètres de cette PAC répondant au cahier des charges des applications choisies précédemment sont présentés dans le Tableau 1.2. Ils correspondent notamment à certaines études réalisés au LEG [Can-02] et au cahier des charges du projet européen FEBUSS auquel le LEG participe [FEBUSS].

Nombre de cellules	600	Densité de courant	0.6 A / cm ²	
Surface active	$\approx 600 \text{ cm}^2$	Tension maximale	$pprox 600 \ \mathrm{V}$	
Courant maximal	$\approx 350 \text{ A}$	Tension minimale	$\approx 370 \text{ V}$	
Consommation des auxiliaires20 kW à P _{nominale} , 100 kW		Alimentation en hydrogène Stocké sous pression des réservoirs spécif		
Nombre de stacks		6 stacks égaux connectés en série		

Fableau	1.2	Princi	paux	paramètres	de la	PAC	modélisée
annea			putan	pur unicer es		1110	mouchisee

Les études théoriques ont permis d'estimer la réponse statique d'une telle PAC. Les courbes les plus représentatives de cette PAC sont données par Figure 1.29 et par Figure 1.30. Il y est également représenté la courbe de polarisation d'une seule cellule.

12

10







Figure 1.30 Puissance attendue en fonction du courant de la PAC



Figure 1.31 Courbe de polarisation attendue d'une cellule composant la PAC

Malheureusement, cette PAC qui aurait dû permettre la validation du modèle, n'a pas été faite dans le délai imparti dans le cadre du projet européen FEBUSS. La validation expérimentale du modèle n'a donc pas été possible avec cette pile. Toutefois, on a établi le modèle à partir de ces courbes et la validation expérimentale a été réalisée sur une pile de 1.5 kW.

1.4.1 Modèle stationnaire

De l'équation (1.11), la PAC peut être représentée par une source de tension continue mise en série avec une impédance non-linéraire dépendant des conditions de fonctionnement et du courant.

Cette impédance non-linéaire ainsi que la variation non-linéaire d' E_{Rev} ont été l'objet de nombreuses études théoriques qui ont établi différentes lois, plus ou moins complexes, en fonction des paramètres de la PAC. Les auxiliaires du générateur influencent également la manière de modéliser ces phénomènes physiques.

Ces lois se traduisent par une ou plusieurs équations selon les aspects pris en compte, bien que leur principe soit toujours le même.

D'un point de vue électrique, les principaux phénomènes physiques à modéliser sont:

- Les surtensions à la cathode et à l'anode qui ont déjà été présentées.
- Les pertes ohmiques : influence conjuguée de la résistance de la membrane, des électrodes, des collecteurs et des contacts. Parmi elles, la résistance de la membrane est généralement la plus importante.
- L'influence du transfert de charges.

[Can-02][Bul-97][Lar-00] analysent en détail ces phénomènes : leur origine, leur influence...

D'après ces études, la réponse d'une cellule pourrait se représenter de plusieurs manières. Parmi les équations existantes [Can-02], on a sélectionné les mieux adaptées à notre cas. La première d'entre elles peut s'écrire sous la forme (1.18).

$$V_{PAC}(I_{PAC}) = E_{Rev} - R_t \cdot I_{PAC} - \beta_1 T_{PAC} \ln\left(\frac{I_{PAC}}{I_0}\right) + \beta_2 T_{PAC} \ln\left(1 - \frac{I_{PAC}}{I_l}\right)$$
(1.18)

Où I₀ représente le courant d'échange qui conditionne la vitesse de la réaction et I₁ est défini par rapport à la limite de densité de courant de la PAC. Ces deux paramètres sont des limites spécifiques de la PAC. β_1 et β_2 sont des paramètres dépendants de T_{PAC}, mais qui peuvent être modifiés pour caler la réponse du modèle à celle de la cellule [Can-02].

Egalement, on peut décrire le comportement d'une PAC sans tenir compte de la limitation par diffusion mais en tenant compte des concentrations des réactifs (Voir Equation (1.19)).

$$V_{PAC}(I_{PAC}) = E'_{rev} - R_t I_{PAC} + \beta'_1 + \beta'_2 T_{PAC} + \beta'_3 T_{PAC} \ln(I_{PAC}) + \beta'_4 T_{PAC} \ln([O_2]) + \beta'_5 T_{PAC} \ln([H_2])$$
(1.19)

Avec : β'_1 , β'_2 , β'_3 , β'_4 et β'_5 paramètres dont le rôle est similaire à celui de β_1 et β_2 .

$$[O_2] = \frac{0.21 P'_{Air}}{5.08 \cdot P_0 \cdot e^{\frac{-498}{T_{PAC}}}}$$
(1.20)

$$[H_2] = \frac{P'_{H_2}}{8.314 \cdot T_{PAC} \cdot 1.09 \cdot P_0 \cdot e^{\frac{77}{T_{PAC}}}}$$
(1.21)

$$E'_{\text{Rev}} = E_0 + \frac{R \cdot T_{PAC}}{2 \cdot F} \cdot \ln\left(\frac{P'_{H_2}}{P_0} \sqrt{\frac{0.21 P'_{Air}}{P_0}}\right)$$
(1.22)

 $O\dot{u}$: P'_{H2} et P'_{Air} sont les pressions partielles de référence de l'hydrogène et de l'air respectivement.

Connaissant la méthode utilisée pour l'alimentation en hydrogène du générateur, on peut considérer que la concentration en hydrogène est toujours constante. Cela nous conduit à écrire la tension de la PAC sous la forme (1.23).

$$V_{PAC}(I_{PAC}) = E''_{rev} - R_t \cdot I_{PAC} + \beta''_1 + \beta''_2 T_{PAC} + \beta''_3 T_{PAC} \ln(k I_{PAC}) + \beta''_4 T_{PAC} \ln([O_2])$$
(1.23)

Avec : β''_1 , β''_2 , β''_3 , et β''_4 variables dont la fonction est similaire à celle de β_1 et β_2 .

$$[O_2] = \frac{P'_{O_2}}{P_0 \cdot 5.08 \cdot 10^6 \cdot e^{\frac{-498}{T_{PAC}}}}$$
(1.24)

Où : P'₀₂ est la pressions partielle de référence de l'oxygène.

$$E''_{Rev} = E^{0} + \frac{R \cdot T_{PAC}}{2 \cdot F} \cdot \ln\left(\frac{P'_{H2}}{P_{0}} \sqrt{\frac{P'_{O2}}{P_{0}}}\right)$$
(1.25)

Malgré sa complexité relative, ce modèle s'adapte bien à nos besoins. La Figure 1.32 montre la courbe de polarisation qui en découle comparée à celle d'une cellule de la PAC prévue. Pour définir les valeurs des paramètres, on s'est basé sur [FEBUSS][Can-02].



Paramètres du modèle

$P'_{H2} = 2 \ 10^{3} Pa$	$P' = 2 10^5 P_0$
$R_t = 0.4 \ 10^{-4} \ \Omega$	$P_{02} = 2 10 Pa$
P'' = 0.022	$T_{PAC} = 343 \text{ K}$
p ₁ 0.922	$k = 35 \ 10^{-3}$
$\beta''_2 = 0.00312$	$R'' = 0.02 10^{-5}$
$B''_{4} = 7.4 \ 10^{-5}$	p ₃ 9.92 10

Figure 1.32 Comparaison des courbes de polarisation

Ce modèle de PAC peut être cependant simplifié mathématiquement. Cette simplification a pour but d'obtenir un modèle plus facile à implémenter et par conséquente un poids de calcul moindre. L'équation résultante (Voir Equation (1.26)) ainsi que les valeurs des composants se basent sur [FEBUSS].

$$V_{PAC}(I_{PAC}) = E''_{Rev} - R_t \cdot I_{PAC} - \alpha_{PAC} \cdot I_{PAC}^{Kc} + \beta''' \ln(X_{\%O2})$$
(1.26)

Où β ''' est un paramètre de calage de l'équation dépendant de T_{PAC}, K_c et α_{PAC} sont des paramètres représentant les surtensions et X_{%O2} le pourcentage d'oxygène en sortie de la PAC.

On note que ce modèle dépend de $X_{\%O2}$ au lieu de sa pression partielle. Le calcul du pourcentage d'oxygène est analysé dans le chapitre 4 §4.2 avec le compresseur. Dans notre modèle, il est considéré égal à sa référence.

Cependant ces modèles ne représentent que la réponse statique d'une cellule. Pour obtenir la réponse de tout le stack, il faut tenir compte du nombre de cellules mises en série (N_C) pour la tension et de la surface active de chaque cellule pour le courant. Néanmoins, l'empilement des cellules de PAC n'est pas aussi simple à modéliser, car toutes les cellules n'ont pas la même réponse et ne sont pas dans les mêmes conditions physiques. Pour pallier cette difficulté, nous nous sommes inspirés des travaux réalisés dans le cadre du projet FEBUSS pour bien adapter la réponse théorique à celle attendue dans la réalité.

L'équation déterminant la réponse de tout le stack est présentée ci-dessous.

$$V_{PAC}(I_{PAC}) = N_C \cdot E''_{Rev} - R_t \cdot I_{PAC} - \alpha_{PAC} \cdot I_{PAC}^{Kc} + \beta''' \ln(X_{\%O2})$$
(1.27)

La Figure 1.33 compare les courbes de polarisation : celle de la PAC estimée avec celle du modèle simplifié pour tout le stack. Notons la similitude entre les deux réponses. Cela valide la modélisation proposée.



Figure 1.33 Comparaison des courbes de polarisation, modèle simplifié et estimé

1.4.2 Modèle dynamique

Le comportement dynamique d'une PAC est conditionné par des phénomènes additionnels à ceux présentés précédemment. Par exemple, la concentration des espèces n'est plus considérée comme constante. Ces phénomènes obligent donc à une approche différente pour la modélisation d'une PAC.

L'analyse dynamique ici dévoilée prend en compte les phénomènes de transport de matière dans la couche de diffusion et les transferts de charge aux interfaces. Cependant, les phénomènes de transport de matière et de charge dans la couche active sont négligés.

L'étude dynamique se base sur la réponse de la PAC face aux petites perturbations autour d'un point de fonctionnement. En fonction de la fréquence de ces perturbations, le comportement de la PAC sera différent.

Le principe de modélisation se base sur l'impédancemetrie [Can-02][Wal-01]. Elle consiste en la modélisation de la PAC par des circuits électriques équivalents qui représentent les Fonctions Transfert (FT) des éléments composants une cellule : membrane, électrodes... La structure des ces circuits équivalents varie en fonction des fréquences analysées, car certains phénomènes sont prépondérants par rapport à d'autres. Or la dynamique constitue le principal paramètre pour l'utilisation d'un modèle.

Le circuit électrique équivalent d'une PAC peut être illustré par la Figure 1.34.



Figure 1.34 Circuit équivalent complet d'une cellule de PAC

Le rôle de chaque élément est décrit ci-dessous :

- Le terme inductif, L_C, modélise l'impédance des circuits électriques comme celle des fils de connexion. Son influence se situe principalement aux hautes fréquences.
- La résistance R_t concerne la modélisation de la membrane principalement.
- Les impédances faradiques de chaque électrode se décomposent en plusieurs éléments. Z_{H_1}, Z_{H_2}, Z_{O_1} et Z_{O_2} représentent la concentration de chaque espèce au sein des électrodes. Ces impédances prennent en compte les conditions de transfert de charge. La structure de ces impédances peut varier en fonction de la plage de fréquence à analyser.
- R_{Transfert_1} et R_{Transfert_2} sont les résistances de transfert de chaque électrode.
- Les condensateurs, C_{2C_1} et C_{2C_2}, modélisent un phénomène parasite capacitif des électrodes. Ce phénomène est connu sous le nom de « capacité de double couche » qui est liée à la diffusion des espèces [Can-02].

Compte tenu de tout cela, on a développé deux modèles en fonction de la plage de fréquence de fonctionnement. On s'est basé sur [Ger-96][Can-02][FEBUSS][Wal-01].

Modèle hautes fréquences

Ce modèle englobe les impédances des deux électrodes en une seule pour faciliter la simulation. Le domaine d'utilisation est celui des fréquences supérieures à 1 kHz. Ce modèle est donc destiné à l'analyse de l'IP à hautes fréquences : influence de la commande rapprochée, évaluation des ondulations du courant, validation des régulateurs...

La Figure 1.35 illustre le modèle utilisé.



Figure 1.35 Modèle hautes fréquences

Les paramètres et les équations représentatives de ce modèle sont donnés ci-dessous.

$$C_{M} \frac{dV_{CM}}{dt} = I_{PAC} - \frac{V_{CM}}{R_{Mp}}$$
(1.28)

$$L_C \frac{dI_{PAC}}{dt} = V_{PAC} - I_{PAC} \cdot R_{Ms} - E_{PAC} - V_{CM}$$

$$(1.29)$$

$$E_{PAC_{HF}}(I_{PAC}) = E''_{Rev} - \alpha \cdot I_{PAC}{}^{Kc} + \beta''' \ln(X_{\%O2})$$
(1.30)

Les valeurs numériques de ces paramètres sont celles prévues dans le rapport FEBUSS concernant la PEM de 100 kW [FEBUSS].

<u>Nota</u>: A très hautes fréquences, on pourrait assimiler le terme $\beta^{\prime\prime\prime} \ln(X_{\%02})$ à une constante, car la dynamique d'alimentation de l'oxygène est lente.

Modèle moyennes fréquences

Egalement, les deux électrodes sont représentées par une seule impédance. La plage de fréquence se situe entre plusieurs hertz et 1 kHz. Son utilisation principale est le réglage des correcteurs. Il sert également pour le dimensionnement de l'IP et pour l'analyse de certains auxiliaires de la PAC. Le modèle est présenté par la Figure 1.36.



Figure 1.36 Modèle basses fréquences

Les équations décrivant le modèle sont (1.28) et (1.30). Les valeurs des paramètres sont les mêmes que celles du modèle hautes fréquences.

1.5 Conclusions

Actuellement, l'exploitation performante des sources d'énergie est un aspect capital pour garantir un développement durable. Cette situation a motivé la recherche de nouvelles sources d'énergie ainsi que de nouveaux générateurs plus performants pour la génération et l'exploitation de l'énergie électrique.

Parmi les technologies existantes, la PAC apparaît comme une solution performante à cet égard. Pour illustrer cela, ce chapitre a décrit sommairement son fonctionnement en mettant en avant ses performances en tant que générateur d'énergie électrique. Cette description a d'abord présenté les différents éléments composant une PAC, pour ensuite se focaliser plus particulièrement sur les PAC de type PEM, l'une des plus développées et la plus prometteuse actuellement.

Le chapitre s'est poursuivi par la présentation des éléments composant le générateur à PAC et on a montré l'importance de l'IP. En fait, le fonctionnement d'une PAC est totalement dépendant de son IP qui permet de mettre en valeur les performances de la PAC tout en respectant les contraintes imposées par chaque application. Compte tenu de cela, nous avons porté nos efforts sur l'optimisation de cet élément crucial pour le développement de cette technologie. Nous avons ensuite présenté les domaines d'application des PAC en précisant les installations existantes ainsi que les applications futures possibles. Ceci est complété par une analyse visant les applications les mieux adaptées pour l'entrée des PAC sur le marché. Il découle que la PAC reste toujours un générateur trop coûteux pour la génération électrique. Malgré tout, elle semble être déjà viable pour certaines applications. Les conclusions de cette étude ont servi pour la suite de notre recherche, puisque c'est à ces applications que nous nous sommes plus particulièrement intéressés par la suite.

Pour une analyse du comportement de tels générateurs, la première étape consiste à connaître le comportement électrique de la PAC. C'est pourquoi ce chapitre se termine par la modélisation d'une PAC destinée aux applications choisies. Plusieurs modèles ont été proposés en fonction de la dynamique requise- c'est le paramètre le plus important- et en se basant sur de précédents travaux faits au sein du LEG. Malheureusement, nous n'avons pu disposer d'une PAC avec les caractéristiques requises pour valider expérimentalement nos modèles.

En conclusion, ce chapitre est la base indispensable à l'analyse complète et détaillée de l'IP d'une PAC qui va être faite ultérieurement.

<u>CHAPITRE 2</u> <u>L'interface de puissance d'un generateur a PAC</u> <u>- dimensionnement et optimisation-</u>

L'objectif de ce chapitre est de sélectionner l'IP le plus représentatif pour une PAC et de réaliser son dimensionnement optimal. De par sa nature de source continue non linéaire, la PAC se doit d'être interfacée de manière à l'adapter à l'usage que l'on en veut, et par ailleurs à contrôler son mode de fonctionnement. De ce fait, la conception de l'interface revêt une grande importance. En plus, l'IP s'avère être un élément vital pour l'exploitation optimale des performances de la PAC, ce qui faciliterait énormément son développement.

Le chapitre expose tout d'abord la nécessité d'une IP pour l'exploitation de l'énergie produite par la PAC. L'étude se focalise sur des applications stationnaires et le transport utilisant une PEM similaire à celle présentée dans le chapitre précédent. Dans ce contexte, le chapitre précise sommairement les tâches à remplir par l'IP.

Compte tenu de ces aspects, on analysera par la suite les structures et les topologies de puissance actuellement utilisées sans pour autant négliger des architectures non encore commercialisées. La structure qui nous semble la plus représentative sera enfin sélectionnée.

Cette dernière structure fera ensuite l'objet d'une optimisation dont la technique se base principalement sur les AG qui sont des algorithmes d'optimisation choisis du fait de leur bonne adéquation au problème posé. Afin d'améliorer la performance de la technique, les AG ont été couplés à une méthode déterministe. A cet effet on présentera une comparaison des différentes méthodes de dimensionnement : les AG, la méthode hybride AG/déterministe et enfin une méthode analytique classique.

2.1 Les interfaces de puissance – cas particulier d'une PEM

Pour cette analyse, on s'est basé sur l'étude présentée dans §1.3. Ainsi, les applications sur lesquelles on s'est focalisé, sont : le tramway et le bus urbain pour le domaine transport, et la source d'énergie de secours d'un bâtiment de bureaux pour le domaine stationnaire. On rappelle que la puissance de ces applications est autour de 100 kW.

2.1.1 Rôle des interfaces

Comme on l'a dit précédemment, l'énergie électrique produite par la PAC l'est sous forme d'une tension continue basse et d'un courant fort. Il est donc nécessaire d'intercaler, entre l'unité de production et l'application, une interface permettant l'adaptation des caractéristiques des PAC aux caractéristiques de l'application. L'interface sert donc de tampon entre deux entités : la source primaire et l'application (réseau ou charge indépendante). Elle est donc soumise à des contraintes des deux cotés (Voir Figure 2.1).



Figure 2.1 Contraintes de l'interface de puissance

De plus, ces interfaces vont permettre d'ajouter de nouvelles fonctions à ces unités de production du point de vue de la sécurité, de la qualité et de la gestion d'énergie.

Ainsi les interfaces seront utilisées principalement pour :

- Adapter les caractéristiques de tension.
- Optimiser les performances de la PAC.
- Gérer la quantité et la qualité de l'énergie produite, stockée ou fournie.

Sur ces deux derniers aspects, la gestion d'énergie faite par l'IP est cruciale. Ainsi, sa fonction peut se résumer par :

• l'optimisation de la transformation et du transfert de l'énergie primaire (choix du mode de fonctionnement, contrôle des grandeurs physiques à travers les grandeurs électriques...) tout en respectant les demandes de la charge d'une manière optimale.

2.1.1.1 Contraintes imposées par l'application

Les contraintes dépendent énormément de l'application. Il serait donc impossible de lister en détail les contraintes inhérentes à toutes les applications possibles : bus, tramway, ASI, soutien de poste, système de stockage etc.... Cependant, on peut lister les principaux aspects imposés par la plupart d'entre elles [Cru-01][P-1547][Min-00] :

- Tension de raccordement (niveau et fréquence).
- Respect des limites de courant de court-circuit.
- Conditions de connexion et déconnexion.
- Puissance active et réactive (positives et négatives).
- Respect de l'intensité maximale des ouvrages du réseau.
- Qualité de l'énergie : Harmoniques de tension et courant, niveau de comptabilité harmonique, déséquilibre de tension...
- Conditions de la mise à la terre.
- Présence d'une protection de découplage.

A titre d'illustration, les tableaux suivants listent sommairement les contraintes pour le raccordement au réseau électrique français d'un système de 100 kW. Cela donne une idée de la nature des contraintes imposées par l'application.

Tension de raccordement		Basse tension, triphasée 230 V				
Energie réactive		Pouvoir fournir jusqu'à 40 % de l'énergie apparente				
Maintien de la tension		Variations lentes à 95 % du temps : entre -10% et $+6\%$ Variations rapides : entre $\pm 5\%$				
Fréquence		50 Hz moyennée sur 10 s. Variations à 95 % du temps : 1%				
Surtension	IS	< 6 kV crête				
Mode de connexion		L'unité ne doit pas provoquer une variation de \pm 5% de la tension nominale. Elle ne pourra pas se raccorder si la tension et la fréquence sont hors des intervalles : [253-203] V et [49.4-50.4] Hz				
	Niveau de compatibilité	Tableau 2.2 pour la tension				
Qualité de l'onde	Injection des harmoniques	Tableau 2.3 pour l'intensité				
	Injection de composante continue.	L'intensité fournie au réseau ne doit pas avoir une composante continue supérieure à 0.5 % de la valeur du courant fourni au réseau.				
	Déséquilibre de la tension engendre par le producteur	Le rapport entre la composante indirecte et celle direct doit être inférieur au 2 %, moyennée sur 10s.				
	Papillotement	Pt ≤ 1				
Conditions de la mise à la terre		Le neutre de basse tension ne doit pas être raccordé à la terre dans l'installation de production tant qu'elle est reliée au réseau. Ceci implique un asservissement entre la mise à la terre du neutre et le couplage pour le passage en réseau isolé.				
Régulation	1	Régulation en courant (Pas de Régul. en tension ni en fréquence)				
Protection de découplage en cas de défaut sur le réseau		 3 relais de tension à action instantanée, entre phase et neutr réglés à 85 % V 1 relais de tension à action instantanée, entre phase et neutr réglé a 110% V 1 relais de fréquence 49.5 50.5 Hz à action instantanée raccordé entre phase et neutre 				
Protection de découplage en cas de défaut chez le client		Définie par la norme C14 – 100 pour la basse tension				

Tableau 2.1 Synthèse des normes pour le raccordement au réseau électrique français d'un générateur de 100 kW

Le calcul du Taux de Distorsion Harmonique (THD) d'une variable quelconque est donné par l'équation (2.1).

$$THD_X = \frac{\sqrt{\sum_{i=2}^{\infty} X_i^2}}{X_{fond}}$$

Harmoniques impairs Harmoniques pairs Non multiple de 3 Multiple de 3 Tension Tension *Tension relative* Rang Rang Rang relative relative 5 6% 3 5% 2 2% 9 7 5% 1.5% 4 1% 6...24 11 15 0.5% 0.5% 3.5% 2% 21 0.5% 17 19 1.5% 23 1.5% 25 1.5% Le THD global pour les rangs de 2 à 40 ne doit pas dépasser 8 %

 $O\dot{u}$: X_{fond} est le fondamental de la variable X.

Tableau 2.2 Valeurs admissibles maximales des harmoniques de la tension au point de raccordement

Ordre de <11	Distorsion harmonique maximale admissible de courant *						
Valeur relative % 4.0 2.0 1.5 0.6 0.3 5.0	Ordre de l'harmonique impair	<11	11≤ h <17	17≤ h <23	23≤ h <35	$35 \le h$	THD
	Valeur relative %	4.0	2.0	1.5	0.6	0.3	5.0

* Valeur maximale ramenée au fondamental du courant fourni par le poste source en l'absence d'un système de génération dispersée.

Tableau 2.3 Valeurs admissibles maximales des harmoniques de l'intensité fournie au réseau

2.1.1.2 Contraintes imposées par la PAC

Les principales contraintes imposées par la PAC sont décrites ci-dessous :

• Limitation dynamique. La réponse électrique de la PAC est limitée par la manière de fournir les réactifs chimiques. Les constantes de temps correspondantes, généralement mécanique ou hydraulique, sont très grandes par rapport aux constantes de temps. Ainsi, les variations de la puissance de référence demandées à la PAC doivent être limitées pour assurer dans tous les cas un taux de réactifs correct.

Cette sécurité est implantée à travers le contrôle commande de l'IP.

• Limitation des ondulations du courant. Pour ne pas endommager la PAC ni réduire sa durée de vie, son courant de sortie doit être le plus lissé possible.

Pour réduire les ondulations, plusieurs options sont possibles : placer un condensateur aux bornes de la PAC, travailler à une fréquence élevée de découpage pour le hacheur ou encore utiliser une inductance série élevée.

(2.1)

Egalement, l'interface doit réagir en limitant la puissance fournie par la PAC, si ses conditions physiques de fonctionnement (Température, tension...) sortent de leurs gabarits de sécurité.

L'allure de la référence de la PAC joue un rôle important, car c'est un facteur essentiel influant sur la durée de sa vie. Actuellement, du fait d'un faible retour d'expérience, on n'est pas en mesure de corréler parfaitement durée de vie d'une part et puissance demandée et qualité des courants, d'autre part. Toutefois, on est en mesure d'affirmer que certains aspects comme garantir des consignes les plus constantes possibles favorisent une durée de vie plus longue. Le contrôle commande joue donc un rôle crucial, car il détermine la référence à suivre.

2.1.1.3 Résumé :

Compte tenu de toutes ces exigences, l'IP a principalement trois fonctions à assurer qui conditionnent l'architecture de l'IP:

- Elever la tension de la PAC à une tension qui permet sa connexion à l'application.
- Transformer l'énergie continue de la PAC en énergie alternative.
- Contrôler l'énergie fournie par la PAC.

2.1.2 Structures des interfaces

élévateur + OT

Actuellement il existe une grande diversité des structures envisageables pour une IP d'un générateur à PAC. Certaines d'entre elles ont déjà été présentées dans §1.3. Ce point est un complément : on y présente des structures spécifiquement dédiées aux PAC.

Du fait de leur grande diversité, les possibles structures possibles ont été classées **en fonction de leur domaine d'application.**

2.1.2.1 Structure pour les applications de type transport

Le but de la structure est d'alimenter le(s) moteur(s) électrique(s) de traction. Dans ces applications, la structure se décompose généralement en deux étages, DC/DC et DC/AC couplés via un bus continu.

Les tensions d'alimentation du(des) moteur(s) peuvent varier selon la puissance de l'application, ce qui autorise plusieurs configurations.

La différence de ces structures réside principalement dans la manière de contrôler l'énergie fournie par la PAC et par l'ES (Voir Figure 2.2 et Figure 2.3). Cet ES est connecté fréquemment au bus continu à travers un convertisseur spécifique. Du fait de la diversité des structures d'EP possibles ainsi que des différentes technologies de stockage possibles, cette IP sera analysée dans §4.5.



Figure 2.3 Condensateur + Hacheur élévateur + PAC + OT



Figure 2.4 PAC + Condensateur + OT

Pour les puissances considérées la structure la plus habituelle est celle illustrée par la Figure 2.5. L'avantage de cette structure réside dans la possibilité de découpler l'énergie fournie par chaque élément.



Figure 2.5 PAC + Hacheur élévateur + Condensateur + OT

Dans cette structure, le rôle de chaque partie est bien différencié :

- **DC/DC** : Le hacheur DC/DC connecté aux bornes de la PAC, doit généralement asservir la puissance fournie par la PAC. Le hacheur intègre également certaines fonctionnalités garantissant la sûreté de fonctionnement de la PAC.
- **DC/AC** : Cette partie assure la transformation de l'énergie continue du bus continu en énergie alternative. Elle doit répondre aux contraintes imposées par l'application.

Dans notre étude, on a tenu compte d'une structure modulaire concernant la partie DC/DC. La connexion des convertisseurs en parallèle est de plus en plus utilisée, car elle est bien adaptée aux caractéristiques de la PAC. Dans ce contexte, on peut aussi englober les structures de type multiniveaux, même si elles restent encore au stade de développement pour l'objet de l'étude.



Figure 2.6 Structure modulaire, connexion en parallèle

Figure 2.7 Structure multi-niveaux

Pour l'étage DC/DC, les principaux avantages d'une structure modulaire sont :

- **Réduction des ondulations du courant** de la PAC, car la fréquence équivalente de commutation est multipliée par le nombre de modules.
- Réduction des pertes de puissance.
- Augmentation de la fiabilité et en même temps fonctionnement possible en mode dégradé du générateur facilité.
- Structure mieux adaptée aux PAC qui sont organisées en stacks indépendants.

Cependant, la modularité n'est pas sans inconvénients : plus de composants, coût économique plus élevé, contrôle plus compliqué... Donc, le nombre optimal de modules résulte d'un compromis technico-économique analysant principalement le coût économique des composants et les pertes de puissance. Le nombre de modules dépend également de la fiabilité exigée par l'application : une structure modulaire peut être plus robuste face à une défaillance. De plus, lors des défaillances, elle permet un fonctionnement plus performant, dit fonctionnement en mode dégradé. **Suite à des travaux sur la modularité, on a conclu que le nombre maximal de modules pour notre cas est de 4 (Voir l'annexe 5 et [FEBUSS]).**

2.1.2.2 Structure pour des applications stationnaires

Il existe plusieurs types de raccordement d'un générateur au réseau électrique [Bac].

- **Connexion série.** L'unité de production est assimilée à une source de tension en série avec le réseau (Voir Figure 2.8).
- **Connexion en parallèle ou shunt.** Le système est représenté par une source de courant connectée à un point donné du réseau et commandée en puissance (Voir Figure 2.9).



Figure 2.8 Connexion série, source de tension

Figure 2.9 Connexion parallèle, source de courant

Générateur

Charge

mm

Z réseau

Avec :

I_r Courant net fourni au réseau.

Z_{réseau} Impédance équivalente du réseau.

I_g Courant total fourni par le générateur.

I_E Courant net des charges connectées en parallèle.

Généralement, un générateur à PAC se connecte en parallèle, car ce type de connexion a des avantages par rapport à la connexion série :

- Il n'y a pas forcément besoin d'un transformateur.
- Il permet le contrôle du courant et de la puissance active et réactive.

Dans les cas d'une charge isolée, le générateur est connecté à la charge en parallèle. La connexion est similaire à celle illustrée par la Figure 2.9, sans le réseau évidemment. Par contre, le générateur se comporte comme une source de tension.

Compte tenu du niveau de puissance sélectionné, le raccordement se fait toujours en triphasé.

Comme dans le domaine transport, l'interface des applications stationnaires se divise en **deux parties DC/DC et DC/AC**. Cependant, les hauts niveaux de tension exigés par les applications stationnaires restreignent les structures utilisables. Ainsi, la structure la plus répandue et presque la seule à être utilisée est celle illustrée par la Figure 2.5.

Les indications faites sur la modularité et sur l'ES pour le domaine transport sont aussi valables dans ce cas.

En conclusion, on constate donc que pour les puissances analysées, la structure de l'IP pour les applications stationnaire et transport est similaire.

2.1.3 Topologie de l'interface de puissance

Comme on l'a montré précédemment, l'interface se décompose principalement en deux parties avec des rôles différents. Nous montrons dans ce paragraphe les topologies envisageables inhérentes aux deux étages.

- Convertisseur DC/DC.
- Convertisseur DC/AC.

2.1.3.1 Convertisseur DC/DC

Grâce à sa simplicité et ses performances, la topologie la plus employée est le hacheur parallèle classique (boost en anglais). Elle est illustrée par la Figure 2.10.

Des variantes de cette topologie existent comme le double hacheur parallèle (Voir Figure 2.11). Cela permet de réduire les ondulations du courant de PAC. En outre, la tension maximale aux bornes du semi-conducteur est réduite à la moitié de celle du bus continu. Par contre, elle a besoin du double de composants et d'un contrôle plus élaboré.



Figure 2.10 Hacheur parallèle classique

Figure 2.11 Double hacheur parallèle

Où V_{Bus} est la tension du bus continu, I_{Charge} est le courant équivalent demandé aux bus continu, L_{DC} représente l'inductance du hacheur et C_{Bus} la capacité connectée au bus continu.

D'autres structures possibles de hacheur sont données ci-dessous. Néanmoins, elles nécessitent une plus grande quantité de composants et dans certains cas, le courant d'entrée n'est pas continu, ce qui complique leur utilisation pour une PAC.





Figure 2.12 Hacheur à accumulation capacitive



Le hacheur réversible est aussi une possibilité. Néanmoins, son aspect bidirectionnel en courant n'est pas ici exploitable et est donc non justifié.

Dans la famille des hacheurs élévateurs, il existe de nombreuses structures utilisant des transformateurs à hautes fréquences comme celles illustrées ci-dessous. Pourtant, pour le niveau de puissance de notre application, les hacheurs construits autour de transformateurs haute fréquence, ne sont pas actuellement envisageables [Awa-01].



Figure 2.16 Onduleur à isolation galvanique

2.1.3.2 Convertisseur DC/AC

Dans le cas d'une connexion shunt, la structure de puissance la plus utilisée est l'OT à IGBT. Il peut être considéré comme une source de courant alternatif commandée en puissance, ou comme une source de tension alternative selon l'application. Cet OT est muni d'un filtre pour sa connexion au réseau (L ou LCL) ou à une charge indépendante (LC).

Pour alimenter des moteurs électriques, l'OT est aussi la topologie la plus répandue grâce à ses bonnes performances. Ses caractéristiques les plus représentatives sont :

- Structure et contrôle simple.
- Contrôle de la puissance active et réactive.
- Nécessité d'une source de tension continue en amont.
- Isolation galvanique utilisant un transformateur.



Figure 2.17 Onduleur de tension + Filtre LC + Application

 C_{AC} est la capacité du filtre de raccordement, L_{AC} est l'inductance du filtre de raccordement, E est la tension dans le point de raccordement, I_S est le courant de sortie de l'OT, V_{Appli} est la tension de l'application et L_{Charge} et R_{Charge} sont l'inductance et la résistance respectivement de la charge indépendante ou du réseau.

Concernant l'OT, deux architectures sont possibles : **avec ou sans neutre raccordé au point milieu du bus continu** qui est crée. Le neutre est dit raccordé quand le point milieu du bus continu est connecté au neutre de la charge. Les tensions de branche de l'OT sans le neutre raccordé sont dépendantes de l'état des autres branches. Ce type d'OT ne permet pas le transit des courants homopolaires. Dans notre cas l'OT utilisé est du type « sans neutre raccordé ».

Une variante possible de l'OT est la structure à quatre bras qui permet la gestion du courant homopolaire. Néanmoins, le coût est plus élevé et le contrôle plus complexe.

Une alternative prometteuse pour remplacer l'OT est **l'onduleur de courant à pulsation**. Il se base sur un commutateur de courant classique utilisant des composants unidirectionnels commandables à la fermeture et à l'ouverture [Dom-98] [Riv-00]. Le principe de fonctionnement, basé sur un contrôle du courant en amont, est mieux adapté aux caractéristiques d'une PAC : source de courant en amont. Cela permettrait d'éliminer le hacheur élévateur. Des études comparatives ont déjà été faites [Riv-00]. Les résultats montrent que jusqu'à l'apparition d'un nouveau composant qui réduirait les pertes en conduction pour cette topologique, l'OT plus un hacheur élévateur restera la meilleure option.





Figure 2.19 Commutateur de courant à injection harmonique

D'autres alternatives au commutateur de courant existent, le commutateur à injection harmonique en est une. Il permet d'améliorer la qualité de l'énergie produite. Il a cependant besoin de quelques composants et d'un transformateur additionnels.

Il existe d'autres topologies de puissance pour la partie DC/AC comme par exemple celle de la Figure 2.20. Elles sont néanmoins beaucoup moins employées, car elles n'ont pas d'avantages flagrants [Awa-01].



Figure 2.20 Onduleur à structures Zeta

2.2 Interface universelle - Briques élémentaires

Compte tenu des topologies présentées précédemment et suite à une recherche bibliographique avancée, on a constaté que malgré la diversité des structures possibles, les IP présentent un très large dénominateur commun pour les applications analysées.

Cela nous a conduit à développer le concept d'Interfaçage Universel de Puissance pour PAC. L'interfaçage universel des PAC représente la plus large structure commune d'EP utilisée par des générateurs à PAC pour des applications à la fois transport et stationnaire.

La structure de l'interface universelle est celle de l'IP employée pour le soutien de poste. Elle est illustrée par la Figure 2.21. L'interface se compose de :

- Un OT triphasé sans le neutre raccordé et muni d'un filtre passif LC ou LCL selon le cas (partie DC/AC).
- Un hacheur parallèle qui peut former une structure modulaire (partie DC/DC).

Pour la partie DC/DC, on a retenu aussi la topologie du double hacheur parallèle et la structure modulaire grâce à ses perspectives intéressantes.

Cette topologie constitue l'IP sur lequel nos efforts de dimensionnement se sont focalisés. Dans le point suivant on dévoile les éléments fondamentaux de cet IP.



Figure 2.21 Topologie globale

Néanmoins, cette structure de puissance n'est pas la plus utilisée, car celle-ci comporte aussi l'ES et son EP (Voir Figure 3.1). Compte tenu de l'influence de chaque application, l'étude et le dimensionnement de cette deuxième structure seront analysés dans les chapitres suivants.

2.2.1 Modélisation de l'interface de puissance

La modélisation d'un convertisseur se base sur les lois physiques décrivant leur fonctionnement. Ces équations physiques constituent un modèle de connaissance, on distinguera trois niveaux de ces modèles. L'utilisation de chaque modèle dépendra des objectifs de l'étude.

- Le modèle statique pour le dimensionnement des composantes de l'interface et des grandeurs électriques.
- Le modèle moyen pour l'analyse de régimes permanents et transitoires. Il permet également l'obtention de modèles de réglages et l'analyse de modes de fonctionnement. Ce modèle basé sur les variations fondamentales des grandeurs, réduit le poids de calcul et accélère ainsi les simulations.
- Le modèle instantané ou topologique pour observer le système réel et valider le modèle moyen. Il simule en détail les grandeurs physiques, hautes fréquences incluses.

Pour notre étude, les hypothèses suivantes ont été faites pour la modélisation.

- Les interrupteurs sont idéaux : quand ils conduisent, leur résistance est nulle. Elle est infinie, quand ils ne conduisent pas. Les commutations sont considérées comme instantanées.
- Les éléments passifs (résistances de charge ou de perte, inductances et capacités) sont linéaires et invariants.
- Les sources de tension maintiennent leur tension continue indépendamment du courant fourni.

2.2.1.1 Modèle du hacheur parallèle classique

Les équations du modèle topologique sont données ci-dessous (Voir Figure 2.10) [Bac].

$$L_{DC} \frac{dI_{PAC}}{dt} = V_{PAC} - V_{Bus} (1 - u_{DC})$$
(2.2)

$$C_{Bus} \frac{dV_{Bus}}{dt} = (1 - u_{DC})I_{PAC} - I_{Ch} \arg e$$
(2.3)

 $O\dot{u}$: u_{DC} est l'ordre de commande du hacheur qui peut être 1 ou 0 ; 1 quand l'interrupteur est fermé, 0 quand il est ouvert.

Le modèle moyen est simplement obtenu par la substitution de l'ordre de commande u_{DC} par α_{DC} . Ce signal pourra avoir des valeurs comprises entre 0 et 1. Le modèle statique est représenté par les équations (2.4) et (2.5).

$$V_{Bus} = \frac{V_{PAC}}{1 - \alpha_{DC}}$$
(2.4)

$$I_{PAC} = \frac{I_{Charge}}{1 - \alpha_{DC}}$$
(2.5)

2.2.1.2 Modèle du double hacheur parallèle

Pour équilibrer la tension des condensateurs, le contrôle des IGBT est indépendant mais décalés d'une demi période. Malgré les possibles différences, au régime permanent, les temps de commutation des deux IGBT doivent être égaux.

On crée donc deux variables indépendantes concernant le contrôle de chaque IGBT, u_{DC1} et u_{DC2} , elles peuvent valoir 1 ou 0 : 1 quand l'interrupteur est fermé, 0 quand il est ouvert. Cela nous permet donc d'écrire :

$$L_{DC} \frac{dI_{PAC}}{dt} = V_{PAC} - V_{C1}(1 - u_{DC1}) - V_{C2}(1 - u_{DC2})$$
(2.6)

$$Ci \frac{dV_{Ci}}{dt} = I_{PAC} (1 - u_{DCi}) - I_{Ch \text{ arg } e} \qquad i = 1, 2.$$
(2.7)

$$\mathbf{V}_{\mathrm{C1}} + \mathbf{V}_{\mathrm{C2}} = \mathbf{V}_{\mathrm{Bus}} \tag{2.8}$$

Où:

V_{Ci} Tension aux bornes du condensateur i.

C_i Capacité de chaque cellule du double hacheur.

Ce modèle topologique est la base du modèle moyen qui est obtenu par la substitution de u_{DC1} et u_{DC2} par α_{DC1} et α_{DC2} respectivement. Ces signaux auront des valeurs comprises entre 0 et 1.

Comme on considère que les deux cellules ont un comportement similaire, leur valeur α_{DCi} , et les tensions V_{Ci} sont égales en régime permanent. Cela fait que le modèle équivalent se traduit donc par des équations similaires à celles du hacheur parallèle.

2.2.1.3 Modèle de l'OT triphasé

L'OT modélisé est celui illustré par la Figure 2.17. Pour le modéliser, on introduit dans un premier temps la tension de sortie par rapport au pôle négatif du bus continu V_{sb} imposée directement par la commande, et la tension de sortie par rapport au neutre, V_s (Voir Figure 2.22).



Figure 2.22 Modèle d'une phase de l'OT triphasé

Le neutre n'étant pas raccordé, les courants alternatifs n'ont pas de composante homopolaire.

$$\sum_{i=1}^{3} i_{s_i} = \sum_{i=1}^{3} I_{SMAX} \cdot \sin\left(2\pi \cdot f_{Appli} \cdot t - \varphi - \frac{2\pi(i-1)}{3}\right) = 0$$
(2.9)

 I_{SMAX} est l'amplitude maximale du courant de sortie de l'OT et ϕ est le déphasage entre la tension de sortie de chaque phase (V_{si}) de l'OT et le courant.

Pour la même raison, V_{si} dépend de l'état des interrupteurs des autres phases :

$$\frac{V_{sb1} - V_{s1} + V_{s2} - V_{sb2} = 0}{+ V_{sb1} - V_{s1} + V_{s3} - V_{sb3} = 0}$$

$$2 V_{sb1} - 2 V_{s1} + V_{s2} + V_{s3} - V_{sb2} - V_{sb3} = 0$$
(2.10)

En supposant que le système est équilibré :

$$V_{s1} + V_{s2} + V_{s3} = 0 ag{2.11}$$

Donc

$$\begin{bmatrix} V_{s1} \\ V_{s2} \\ V_{s3} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_{sb1} \\ V_{sb2} \\ V_{sb3} \end{bmatrix}$$
(2.12)

Si la commande est aussi équilibrée, on a donc :

$$V_{sb1} + V_{sb2} + V_{sb3} = 0 ag{2.13}$$

On prend comme convention que les commandes prennent leurs valeurs dans l'ensemble discret $\{\text{-}1, \text{+}1\}$:

 $u_i = 1 \implies$ l'interrupteur du haut K_h conduit et celui du bas K_b , est fermé.

 $u_i = -1 \Rightarrow$ l'interrupteur du bas K_b conduit et celui du haut K_h, est fermé.

On peut donc écrire la relation entre la commande u_i et les tensions V_{sbi} .

$$\begin{bmatrix} V_{sb1} \\ V_{sb2} \\ V_{sb3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \end{bmatrix} \cdot \frac{V_{Bus}}{2} + \frac{V_{Bus}}{2}$$
(2.14)

Avec cette équation et (2.12), on trouve donc la relation entre la tension de sortie et la commande.

$$\begin{bmatrix} V_{s1} \\ V_{s2} \\ V_{s3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \end{bmatrix} \cdot \frac{V_{Bus}}{6}$$
(2.15)

Les tensions de sortie peuvent aussi se traduire par l'équation (2.16).

$$V_{s1} = \frac{V_{Bus}}{6} (2u_1 - u_2 - u_3) \qquad V_{s2} = \frac{V_{Bus}}{6} (-u_1 + 2u_2 - u_3) \qquad V_{s3} = \frac{V_{Bus}}{6} (-u_1 - u_2 + 2u_3)$$
(2.16)

Pour une meilleure représentation, les grandeurs électriques seront représentées par des vecteurs.

$$I_{s} = \begin{bmatrix} i_{s1} & i_{s2} & i_{s3} \end{bmatrix}^{T} \qquad E = \begin{bmatrix} e_{1} & e_{2} & e_{3} \end{bmatrix}^{T} \qquad U = \begin{bmatrix} u_{1} & u_{2} & u_{3} \end{bmatrix}^{T}$$
$$A_{c} = \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \qquad \text{Matrice de commande.}$$

Dans le modèle de l'OT, on a pris en compte un filtre LC. Ce filtre ne représente qu'un exemple, il peut être modifié en fonction de l'application (Voir §3.3).

$$L_{AC} \frac{dI_s}{dt} = \frac{V_{Bus}}{6} A_c \cdot U - E - R_{AC} \cdot I_S$$
(2.17)

$$C_{AC} \frac{dE}{dt} = \mathbf{I}_{s} - I_{g}$$
(2.18)

Avec : R_{AC} qui représente la résistance équivalente de toutes les pertes de conduction.

A partir de ces équations, le courant demandé au bus continu peut être calculé.

$$I_{Charge} = \sum_{i=1}^{3} \frac{is_i * U_i}{2} = \frac{i_{s1} \cdot u_1 + i_{s2} \cdot u_2 + i_{s3} \cdot u_3}{2}$$
(2.19)

Concernant la charge, l'équation (2.20) décrit son mode de fonctionnement.

$$L_{Charge} \frac{dI_g}{dt} = E - V_{Appli} - I_g \cdot R_{Charge}$$
(2.20)

$$O\dot{u}: V_{Appli} = [V_{Appli1} V_{Appli2} V_{Appli3}]^{T}$$

Le modèle moyen ne s'intéresse qu'aux variations du fondamental. On doit donc substituer dans les équations le vecteur X par son fondamental $\langle X \rangle_1$. Concernant le contrôle, on analyse u_i lors d'une période de commutation (T_{MLI}). Pour calculer la valeur moyenne (α_i) de u_i , on utilise l'équation :

$$\alpha_i = \left\langle u_i \right\rangle_0 = \frac{1}{T_{MLI}} \int_{t-T_{MLI}}^t u_i(t) \cdot dt \tag{2.21}$$

En sachant que le système est équilibré, on peut écrire :

$$\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3 = 0 \tag{2.22}$$

Avec (2.16) et (2.22), on peut écrire par exemple écrire pour la phase 1:

$$\widetilde{u}_{1} = 2\alpha_{1} - \alpha_{2} - \alpha_{3} = 2\alpha_{1} - \alpha_{2} - \alpha_{3} + (\alpha_{1} + \alpha_{2} + \alpha_{3}) = 3\alpha_{1}$$
(2.23)

$$\widetilde{u}_{2} = 2\alpha_{2} - \alpha_{1} - \alpha_{3} = 2\alpha_{2} - \alpha_{1} - \alpha_{3} + (\alpha_{1} + \alpha_{2} + \alpha_{3}) = 3\alpha_{2}$$
(2.24)

$$\widetilde{u}_{3} = 2\alpha_{3} - \alpha_{2} - \alpha_{1} = 2\alpha_{3} - \alpha_{2} - \alpha_{1} + (\alpha_{1} + \alpha_{2} + \alpha_{3}) = 3\alpha_{3}$$
(2.25)

Où \tilde{u}_i est le signal continu de commande d'une branche dont la valeur est comprise entre -1 et 1. Avec ce signal et (2.16), on peut représenter chaque phase d'une manière découplée.

$$\begin{cases} L_{AC} \frac{d\langle I_{S1} \rangle_{1}}{dt} = \frac{V_{Bus}}{2} \widetilde{u}_{1} - \langle I_{S1} \rangle_{1} R_{AC} \\ L_{AC} \frac{d\langle I_{S2} \rangle_{1}}{dt} = \frac{V_{Bus}}{2} \widetilde{u}_{2} - \langle E_{2} \rangle_{1} - \langle I_{S2} \rangle_{1} R_{AC} \\ L_{AC} \frac{d\langle I_{S3} \rangle_{1}}{dt} = \frac{V_{Bus}}{2} \widetilde{u}_{3} - \langle E_{3} \rangle_{1} - \langle I_{S3} \rangle_{1} R_{AC} \end{cases}$$

$$\begin{cases} C_{AC} \frac{d\langle E_{1} \rangle_{1}}{dt} = \langle I_{s1} \rangle_{1} - \langle I_{g1} \rangle_{1} \\ C_{AC} \frac{d\langle E_{2} \rangle_{1}}{dt} = \langle I_{s2} \rangle_{1} - \langle I_{g2} \rangle \\ C_{AC} \frac{d\langle E_{3} \rangle_{1}}{dt} = \langle I_{s3} \rangle_{1} - \langle I_{g3} \rangle \end{cases}$$

$$(2.27)$$

On considère que la tension du bus continu est toujours continue et constante.

$$\left\langle V_{Bus}\right\rangle_0 = V_{Bus} \tag{2.28}$$

Pour le modèle moyen, la tension de branche de sortie de l'onduleur peut être écrite comme :

$$V_{si} = \frac{V_{Bus}}{2} \cdot \widetilde{u}_i$$
(2.29)

La valeur moyenne du courant demandé au bus continu est :

$$\left\langle I_{Charge} \right\rangle_0 = \frac{3 \cdot \sqrt{2}}{\pi} I_{SMAX} \cdot \cos(\varphi)$$
 (2.30)

Sa valeur efficace est :

$$I_{Charge_efficace} = I_{SMAX} \cdot \sqrt{2} \cdot \sqrt{\frac{1}{2} + \frac{3\sqrt{3}}{4\pi}} \cos(2\varphi)$$
(2.31)

En annulant les dérivés du modèle moyen de l'onduleur, on obtient son modèle statique.

$$\langle I_s \rangle_1 = -\frac{\langle E \rangle_1 - \frac{\langle V_{Bus} \rangle_0}{6} \langle AU \rangle_1}{i \cdot L_{AC} \omega}$$
(2.32)

$$\langle E \rangle_1 = j \cdot \omega \cdot \left| \langle I_g \rangle_0 - \langle I_s \rangle_1 \right|$$
 (2.33)

2.2.2 Filtre de raccordement

Le rôle du filtre de raccordement est de réduire la dynamique de la tension ou du courant de sortie pour permettre son contrôle. Le filtre doit également « **convertir** » **l'OT en une source de courant ou de tension selon le cas.** Le filtre joue aussi un rôle crucial pour garantir la qualité de l'énergie fournie en réduisant entre autres les harmoniques de découpage.

Le filtre dépend de l'application. Ainsi, si le générateur est connecté au réseau qui est une source de tension, le filtre doit être de caractère inductif. Cela permet de contrôler le courant de sortie de l'OT. Or, on peut modéliser le raccordement comme la connexion de deux sources de tensions à travers un filtre L (Voir Figure 2.23 et Figure 2.24). Les structures potentielles des filtres inductifs sont de type L ou LCL.



Figure 2.23 Raccordement à travers un filtre inductif



Figure 2.24 Diagramme de Kapp du raccordement

La grande différence entre ces deux filtres est leur **atténuation en haute fréquence et le déphasage qu'ils impliquent.** Le filtre LCL conduit à une atténuation plus élevée (-60 dB par décade) des harmoniques polluants. Le filtre L par contre n'atténue que de -20 dB. Néanmoins, le filtre LCL introduit un déphasage de 270° qui rend plus difficile son contrôle. Cela est illustré par les FT des filtres et leurs diagrammes de Bode.

$$FT_{Filtre_L}(s) = \frac{1}{L_{AC}s + R_{AC}}$$
(2.34)

$$FT_{Filtre_LCL}(s) = \frac{1}{L_{AC2}L_{AC}C_{AC} \cdot s^3 + (R_{AC2}L_{AC} + R_{AC}L_{AC2})C_{AC} \cdot s^2 + (R_{AC}R_{AC2}C_{AC} + L_{AC2} + L_{AC}) \cdot s + R_{AC}R_{AC2}}$$
(2.35)

$$f_{\text{résonance_LCL}} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{L_{AC2} + L_{AC}}{L_{AC2} L_{AC} C_{AC}}}$$
(2.36)





Figure 2.26 Diagramme de Bode de la FT Filtre LCL

Le filtre LCL conduit à une meilleure atténuation pour la même Bande Passante (BP) et une meilleure qualité d'onde. En effet, pour le filtre L, la tension aux bornes de l'inductance est carrée. Cela ne permet donc pas d'avoir en sortie une tension très sinusoïdale. Dans le cas LCL, la tension d'entrée de l'inductance est déjà presque sinusoïdale grâce à la branche LC.



Figure 2.27 Raccordement travers un filtre LCL

Par contre, le filtre LCL nécessite plus de composants, ce qui élève le coût. Cet inconvénient est toutefois moindre, car les composants sont plus petits et donc moins onéreux.

Si le générateur doit se comporter comme une source de tension (Alimentation d'une charge indépendante, source de secours, ASI...), un filtre de type capacitif est utilisé. Ce filtre permet une atténuation de -40 dB/décade.

$$FT_{Filtre_LC}(s) = \frac{1}{C_{AC}L_{AC} \cdot s^2 + C_{AC}R_{AC} \cdot s + 1}$$
(2.37)

$$f_{\text{Résonance LC}} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{L_{AC} \cdot C_{AC}}}$$
(2.38)

 $O\dot{u}$: $f_{R\acute{e}sonance_LC}$ est la fréquence de résonance du filtre LC.

Une analyse du filtre LC est présentée dans l'annexe A5.

Il faut noter que dans certains cas un OT muni d'un filtre LC peut être utilisé comme source de courant. Cela est possible, si la capacité est faible et qu'elle n'intervient donc pas dans le transit des énergies entre l'OT et le réseau. Cette capacité permet de mieux filtrer la tension au point de raccordement

Compte tenu de cet aspect et du fait que l'interface universelle doit englober la structure commune la plus grande possible, on a retenu le filtre LC comme filtre de raccordement.

2.2.3 Commande rapprochée

Le but de la commande rapprochée est de **déterminer les instants de commutations des interrupteurs**. La commande rapprochée est le niveau de contrôle le plus proche des semiconducteurs.

Il existe plusieurs commandes rapprochées :

• Pleine onde, Modulation de Largeur d'Impulsions (MLI) vectorielle et scalaire (intersective), hystérésis, commande glissante.

Le choix du type de commande dépend principalement :

- Des contraintes de la tension de sortie (alternative ou continue, distorsion harmonique...).
- De la fréquence de découpage.



Figure 2.28 Niveau du contrôle rapproché

La fréquence de découpage est antithétique à la puissance commutée, ainsi, pour des applications de haute puissance, les interrupteurs ne peuvent pas commuter à de très hautes fréquences.

Compte tenu de tous ces aspects, on a choisi pour notre cas la commande MLI intersective. Cette commande qui travaille à haute fréquence est employée tant pour le contrôle du hacheur que pour celui de l'OT. On a sélectionné la MLI scalaire du fait de son bon rapport performances/poids de calcul.

2.2.3.1 Modulation de largeur d'impulsions scalaire

Son principe de fonctionnement se base sur la comparaison d'un signal de référence avec un signal modulant à une fréquence beaucoup plus élevée que celle du fondamental de la référence. En jouant avec les temps d'application de la tension négative ou positive en sortie par rapport au bus continu, la valeur moyenne de la tension de sortie est égale à la valeur moyenne de la tension de référence pendant cette période.

La modulante qui impose la fréquence de modulation est en général un signal triangulaire. Le signal de référence représente la tension de sortie. Le signal de commande vaut 1 quand la modulante est supérieure au signal de référence. Dans le cas contraire, le signal de sortie vaut -1 ou 0.

Dans le cas d'une structure modulaire composée par n-hacheurs en parallèle, on a n-signaux modulants déphasés entre eux, et n-signaux de référence, un signal par hacheur. Pour le cas de l'onduleur triphasé, on a trois signaux de référence, un pour chaque bras et une seule modulante.



Figure 2.29 Signaux d'une MLI scalaire

MLI dont le signal de référence est sinusoïdal

Avec une amplitude maximale, X_{Max Ref}. Le signal de référence, x_{Ref}, est :

$$x_{\text{Re}f}(t) = X_{Max_{\text{Re}f}} \cdot \sin(2\pi \cdot f_{Appli} \cdot t + \varphi)$$
(2.39)

 $O\hat{u}$: f_{Appli} est la fréquence de la tension alternative de l'application. Le rapport des amplitudes (m_{AC}) entre la référence et la modulante, X_{Max Mod}, conditionne l'amplitude du signal de sortie.

$$m_{AC} = \frac{X_{Max_Ref}}{X_{Max_Mod}}$$
(2.40)

Si $m_{AC} \leq 1$, on fonctionne dans la zone linaire. Dans ce cas, la relation entre la tension de référence et l'amplitude de l'harmonique fondamental de la tension de sortie, $V_{S \text{ fond.}}$, est :

$$V_{S_{-fond}} = m_{AC} \cdot \frac{V_{Bus}}{2}$$
(2.41)

Un rapport similaire, k_f , peut être défini pour les fréquences de la modulante, $f_{Modulante}$ et celle de la référence - application.

$$k_f = \frac{f_{Modulante}}{f_{Appli.}} \tag{2.42}$$
Les harmoniques de découpage du signal de sortie dépendent de ce rapport. Ainsi, pour une valeur de k_f impair, la tension de sortie n'a que des harmoniques impairs centrés autour de la fréquence de modulation et de ses multiples. Cet aspect est crucial pour le dimensionnement du filtre de sortie. La Figure 2.30 illustre ce fait.



Figure 2.30 Spectre du signal de sortie

Si $m_{AC} > 1$, on fonctionne dans la zone non-linéaire. Dans ce cas, la tension de sortie est partiellement saturée. Elle n'est plus sinusoïdale et cela provoque des harmoniques à basses fréquences. La relation (2.41) n'est plus valable.

Dans notre cas, on travaillera avec m_{AC}=1.

Du fait que le neutre n'est pas raccordé, l'amplitude maximale de l'harmonique fondamental de la tension composée de sortie peut être amplifiée pour une tension de bus continu donnée via une commande rapprochée adéquate. Cette amplification de l'harmonique fondamental n'implique pas une dégradation de la qualité du signal. Le principe est basé sur un signal de référence composé de diverses harmoniques et qui n'entre jamais en saturation.

$$x_{ref}(t) = X_{Max_Fond} \cdot \sin(2\pi \cdot f_{fond_ref} \cdot t + \varphi) + X_{Max_3} \cdot \sin(3 \cdot 2\pi \cdot f_{fond_ref} \cdot t)$$
(2.43)

Le signal se compose du fondamental, $X_{Max Fond}$, et de l'harmonique 3, $X_{Max 3}$. Cet harmonique et ses multiples disparaissent pour les tensions composées. Ainsi, on obtient une tension entre phases la plus élevée possible sans que la tension de branche dépasse la tension du bus continu (Voir Figure 2.31).



Figure 2.31 Tension de branche (rouge), harmonique 3 (bleu) et tension entre phases (noir)

Comme la tension de branche ne doit pas dépasser la tension du bus continu, les coefficients X_{MAX_Fond} et X_{MAX_3} ne peuvent pas prendre n'importe quelle valeur. La composante du troisième harmonique peut atteindre jusqu'à 1/6 du fondamental qui est déjà majoré de 15% par rapport à une modulation sinusoïdale.

En conclusion, les amplitudes maximales du fondamental sont :

- MLI scalaire $\rightarrow \frac{V_{Bus}}{2\sqrt{2}}$.
- MLI scalaire + 3^{eme} harmonique $\rightarrow \frac{V_{Bus}}{\sqrt{3}}$.

MLI dont le signal de référence est continu

Le signal de référence est continu, car le but ici est d'obtenir en sortie une tension moyenne continue la plus stable et la plus lissée possible. Une fréquence de découpage élevée est un élément aidant dans ce sens.

L'analyse des harmoniques de la tension de sortie n'a pas ici le même sens que pour le cas sinusoïdal. On ne peut pas définir de coefficient k_f ni appliquer une technique basée sur le troisième harmonique. Cependant, on peut aussi définir un rapport entre les amplitudes, m_{DC}. Dans ce cas, m_{DC} doit être toujours inférieur ou égal à 1, sinon la saturation est atteinte.

2.3 Dimensionnement optimal

Apres le choix de l'IP, **le pas suivant vers l'exploitation « optimisale » du générateur consiste dans sa conception « optimale »**. En effet, le dimensionnement optimal est une étape nécessaire pour qu'on puisse profiter des performances maximales de la PAC.

Le dimensionnement classique de l'IP se base sur l'analyse de l'influence de chaque élément en fonction des contraintes et des critères d'optimisation, cette méthode est par essence analytique. Cependant, elle exige divers compromis du fait de l'influence contradictoire de certains paramètres sur les critères de dimensionnement. Aucun moyen ne permet donc de garantir que les valeurs choisies soient un optimum global, ce qui entraîne de fait une perte des performances du générateur. Malheureusement, ces compromis, basés principalement sur l'expertise de l'auteur, sont nécessaires, même pour des cas simples où les contraintes et les critères de dimensionnement ne sont pas nombreux.

Pour illustrer cette problématique, on peut analyser l'influence de la fréquence de la MLI du hacheur parallèle sur les pertes de ce hacheur et sur les ondulations du courant délivré par la PAC. Une fréquence élevée implique des pertes importantes. Par contre, cela réduit les ondulations du courant de sortie de la PAC et donc la taille de l'inductance du hacheur (Voir Figure 2.32 et Figure 2.33).





Figure 2.32 Taux des Ondulation d' I_{PAC} vs Fréquence de commutation (L_{DC} =1 mH C_{PAC} =50 µF)



 C_{PAC} est un condensateur connecté aux bornes de la PAC pour réduire les ondulations du courant de sortie.

Cela exige donc un compromis entre les pertes et les ondulations du courant. Pour une analyse plus approfondie quant au dimensionnement classique de l'interfaçage de puissance, le lecteur peut se référer à l'annexe A5.

En définitive, la méthode analytique classique ne permet pas d'exploiter au maximum les performances du générateur. Pour résoudre ce problème, l'utilisation d'un algorithme d'optimisation apparaît comme une solution bien adaptée. Il peut déterminer l'interface optimale de puissance en fonction des critères choisis et des contraintes.

2.3.1 Formulation mathématique du problème d'optimisation

Le dimensionnement de l'IP d'un générateur à PAC peut être facilement assimilé à un problème d'optimisation. Il peut s'écrire sous la forme classique d'un problème d'optimisation :

Minimiser	F (x)	
Avec	$\mathbf{g}_{i}\left(\mathbf{x}\right) \leq 0$	i = 1,, n
	$\mathbf{h}_{j}\left(\mathbf{x}\right)=0$	j = 1,, k
	$\mathbf{x_t}^{\min} \leq \mathbf{x_t} \leq \mathbf{x_t}^{\max}$	t = 1,, m

x est un vecteur de m composantes qui représente une solution possible du dimensionnement de l'IP. Chaque composante de x est la valeur d'un paramètre de l'interfaçage de puissance (fréquence, tension du bus...). Ces valeurs sont bornées par x^{min} et x^{max} (Tension et fréquences maximales et minimales...). F (x) est la fonction à optimiser, appelée Fonction Objective (FO) qui représente les critères à optimiser : le rendement, le volume, le poids. g (x) et h (x) représentent les contraintes d'égalité et d'inégalité (taux de distorsion harmonique, oscillations maximales du courant de PAC, fiabilité...).

2.3.2 Sélection de l'algorithme d'optimisation

Le dimensionnement d'une interfaçage de puissance constitue donc un problème d'optimisation avec des caractéristiques bien définies :

- Variables bornées.
- Variables continues et discrètes.
- Plusieurs contraintes d'inégalité.

En électrotechnique, la FO ne présente communément pas des caractéristiques mathématiques qui facilitent la recherche de l'optimum global [Sal-97]. Par exemple, la convexité qui permet de caractériser l'optimum global, fait rarement partie des caractéristiques de la FO. De même, la continuité et la connaissance du gradient posent souvent des problèmes.

En outre, les problèmes d'électrotechnique présentent souvent plusieurs critères d'optimisation (**multi-objectifs**), ce qui complique encore plus l'analyse mathématique.

Il existe de nombreuses méthodes d'optimisation. Néanmoins, on peut les classifier en deux grandes familles :

- Les méthodes déterministes : A partir d'un point, elles explorent l'espace des solutions avec une direction donnée par leur connaissance du problème comme le gradient. Rien n'est donc laissé au hasard : le même point de départ conduit toujours à la même solution. Ces méthodes ont besoin que l'espace de recherche ait certaines caractéristiques et que le point de départ soit proche de l'optimum global.
- Les méthodes stochastiques : Leur exploration se base principalement sur un procédé aléatoire. Un point de départ peut conduire à plusieurs solutions. Elles n'ont besoin d'aucune connaissance mathématique du problème, ni d'aucune propriété de l'espace des solutions, il suffit de connaître la valeur de la FO.

L'élection d'une méthode ou d'une autre se fait en fonction des caractéristiques du problème d'optimisation et des objectifs du travail. La Figure 2.34 illustre graphiquement le mode de sélection de l'algorithme d'optimisation.

Avec ce schéma, on constate que les méthodes d'optimisation les mieux adaptées à notre problème sont les **méthodes stochastiques**.

Parmi les méthodes stochastiques, plusieurs options sont possibles ; l'algorithme tabou, les réseaux neuronaux ou les AG. Pour notre cas, les AG ont été la méthode choisie pour diverses raisons expliquées postérieurement.



Figure 2.34 Schéma des méthodes d'optimisation [Neo-04]

2.3.3 Les algorithmes génétiques

En 1975, J. H. Holland utilisa par la première fois les AG comme méthode d'optimisation. Depuis cette première expérience, leur utilisation est en constante progression. Leur principe de fonctionnement est **le concept Darwinien de la sélection naturelle** :

Les individus les mieux adaptés ont une plus grande probabilité de survie. Donc, leur code (information) perdure pour la prochaine génération. Ce code évolue par sa mutation et la combinaison avec les codes des autres individus performants aussi sélectionnés. Cette évolution, guidée vers une meilleure adaptation au milieu, nous conduit donc vers l'individu le mieux adapté, donc vers l'optimum.

Cette évolution darwinienne qui repose sur des lois probabilistes, fait des AG un procédé d'optimisation stochastique.

Pour une description en détail des AG, le lecteur peut se référer à l'annexe A4.

2.3.3.1 Avantages des AG

Les AG utilisent une population des solutions possibles pour chercher en parallèle l'optimum dans l'espace des solutions. Ceci les rend donc **plus robustes et plus fiables** que les méthodes ayant recours aux optimaux locaux et aux problèmes dérivés du point de départ ou conditions initiales.

Les AG n'exigent pas une **connaissance mathématique spécifique** du problème. Ils évaluent chaque solution possible avec une FO qui les conduit vers l'optimum global. Les AG ne requièrent pas de la FO certaines propriétés (la linéarité, la connaissance du gradient...), ce qui fait que c'est un outil très utile pour des cas de grande complexité, difficiles à traduire mathématiquement ou ayant des caractéristiques très particulières : gradient inconnu, difficulté de modélisation, discontinuité, pas différentiable... Par contre il faut impérativement représenter tous les problèmes de **manière mono-objectif**.

En outre, cette méthode permet une **rapide implémentation** du procédé d'optimisation grâce à une programmation très simple. De plus, leur adaptation à de nouveaux cas n'engendre guère de travail supplémentaire. Pour notre cas, cela constitue un grand avantage, car on se voit pas obligé à analyser chaque problème et ensuite à choisir et développer l'algorithme d'optimisation.

2.3.3.2 Inconvénients des AG

Le principal inconvénient est la **grande puissance de calcul** exigée. Cela a freiné notablement leur utilisation. Néanmoins, les récentes améliorations des performances de calcul des ordinateurs ont facilité énormément leur application.

La nature heuristique des AG oblige à les utiliser **plusieurs fois**, car la méthode de recherche aléatoire peut conduire parfois à de faux optimums.

Du fait de la faible diversité de la population, on peut constater les problèmes suivants lorsqu'on approche l'optimum :

- Une vitesse de conversion finale lente
- Une faible exactitude de l'optimum trouvé

Un autre problème est celui de déterminer quand on doit **arrêter les AG**. Généralement, les AG sont stoppés après un nombre donné d'interactions (générations), mais cela ne garantit pas d'avoir trouvé l'optimum. Aujourd'hui, de nombreuses alternatives à cette méthode existent déjà, la plupart d'elles se basent sur l'évolution du meilleur individu.

Actuellement, une solution permettant de contourner les principaux problèmes des AG est de les combiner avec une méthode déterministe. Cette combinaison permet d'enrayer :

- La faible précision des AG
- La vitesse de convergence finale des AG lente

En outre, le nombre de générations peut être réduit, ce qui permet de réduire le temps de calcul.

On a utilisé un procédé d'optimisation utilisant seulement les AG pour le dimensionnement d'une IP. Néanmoins, suite à l'analyse de ces premiers travaux, on a constaté les inconvénients indiqués précédemment. C'est pourquoi on a implémenté une méthode hybride d'optimisation qui est décrite ci-dessous. Les résultats obtenus sont présentés plus loin.

2.3.4 Optimisation hybride

L'optimisation hybride consiste à utiliser pour un même problème deux algorithmes d'optimisation d'une manière complémentaire. Dans notre cas, les AG ont été complémentés par une méthode déterministe d'optimisation, comme la Figure 2.35 l'illustre.



Figure 2.35 Schéma de l'optimisation hybride

Cette combinaison permet de profiter des meilleures caractéristiques de chaque méthode.

Concernant la méthode déterministe, le problème du **point de départ** est résolu, puisque la commutation se fait autour du point optimal. Ainsi, la nécessité d'avoir une FO avec certaines caractéristiques (continuité, pas de minimaux locaux, etc) n'est plus un problème.

Cette méthode permet également d'exploiter les performances des AG face à des optimaux locaux, à des problèmes de non-linéarités et au problème du point de départ dans le domaine de recherche.

Par contre, cette méthode n'est pas sans inconvénient. La **détermination du moment de commutation**, passage des AG à la méthode déterministe, constitue le principal problème. Il n'y a pas de norme précise, car cela dépend du procédé aléatoire des AG. Cela doit être défini empiriquement et par conséquence cela ne permet pas de rentabiliser au maximum la complémentarité des deux méthodes.

2.3.4.1 Méthode déterministe

La méthode déterministe choisie est du type programmation quadratique et séquentielle-'en anglais sequantial quadratic programming [Cul-94][Opt-02][Cai-04]. Cette méthode se base sur les multiplieurs de Lagrange et sur les équations de Kuhn Tucker lesquelles s'écrivent sous la forme suivante :

$$\nabla F(x^*) + \sum_{i=1}^m \lambda_i^* \nabla G_i(x^*) = 0$$
(2.44)

$$\lambda_i^* \cdot G_i(x^*) = 0 \quad i = 1, ..., b$$
(2.45)

$$\lambda_i^* \ge 0$$
 $i = 1, ..., b$ (2.46)

 $O\dot{u}$: x^{*} est une solution possible, G représente les contraintes, λ_i sont les multiplicateurs de Lagrange et b est le nombre de contraintes.

Dans des cas convexes, ces équations sont une condition suffisante et nécessaire pour définir l'optimum global. L'utilisation de cette méthode exige que :

- Les variables soient continues.
- Les FO et les contraintes soient dérivables.

En plus, cette méthode est très sensible aux optimaux locaux. Cependant, ces aspects ne sont plus un problème avec la combinaison hybride. En plus, elle est facilement implantable sous Matlab grâce à un outil spécifique.

2.3.5 Implémentation

Cette méthode d'optimisation hybride a été implémentée en simulation. Pour réaliser ce procédé, on a dû utiliser plusieurs outils différents :

- Un outil de simulation, Matlab Simulink.
- Un outil d'optimisation utilisant les AG et/ou la méthode déterministe, disponible sous Matlab.

La communication entre ces outils a permis d'employer les méthodes d'optimisation sans besoin d'une modélisation spécifique de l'interface (Voir Figure 2.36). Les mêmes modèles employés pour le contrôle commande, sont aussi utilisés pour l'évaluation de la FO. Cela constitue un grand avantage pour son implémentation.



Figure 2.36 Schéma de communication entre l'outil d'optimisation et celui de simulation

Compte tenu des contraintes habituelles, les modèles d'EP employés sont nécessairement des modèles exacts. Ceci implique un temps de calcul très important. Par contre, la PAC a été simplement modélisée par sa courbe de polarisation. Ce simple modèle suffit largement pour l'optimisation, car on ne s'intéresse qu'à la réponse statique de la PAC.

2.3.6 Application

Pour analyser l'intérêt de ce procédé d'optimisation, on l'a appliqué au dimensionnement de l'interface universel de puissance. Compte tenu que l'interface universel de puissance est similaire à l'IP d'une application de type **installation de soutien de poste, on s'en est inspirée pour définir les contraintes imposées par la charge.**

Les caractéristiques techniques sont données dans le Tableau 2.4.

CARACTERISTIQUES GENERALES	$P = 100 \text{ kW et } Q_{Max} = \pm 40 \text{ kVA}$ Tension de connexion 230/400 V Triphasé Fréquence 50-60 Hz Impédance de court-circuit variable
PARTIE DC/DC PAC	PAC de 100 kW nette de type PEM Courant maximal 300 A Structure modulaire
Partie DC/AC Charge et/ou reseau	Raccordement à travers un filtre LC et sans transformateur Un seul OT

Tableau 2.4 Spécifications

La **réponse électrique de la PAC** utilisée pour cette application est inspirée de celle présentée dans §1.4 (Voir Figure 1.29).

Le critère d'optimisation est le rendement énergétique global de l'IP : les pertes de puissance doivent être minimisées. Cet aspect est important voire fondamental quand on connaît le coût du kW installé d'un générateur à PAC.

Les pertes calculées ne concernent que celles produites dans les semi-conducteurs : par conduction et commutation. Les pertes dans les composants passifs (inductances et condensateurs) n'ont pas été évaluées du fait d'un manque de données. Pour calculer les pertes des semi-conducteurs, on a utilisé des modèles moyens. Ils sont basés sur [Bas-01]. Ces modèles sont bien adaptés pour être intégrés dans le procédé d'optimisation.



Figure 2.37 Modèles des composants pour le calcul despertes

 $O\dot{u}$: E_{Diode} et E_{IGBT} représentent l'énergie dissipée dans les composants en fonction du courant.

Les **contraintes** d'optimisation sont présentées dans le Tableau 2.5. Leurs valeurs limites ont été déterminées par les normes de raccordement [P-1547] et par les indications des constructeurs de PAC.

PARTIE DC/DC PAC	Ondulations maximales du courant de sortie de la $PAC < 5 \%$ de la valeur nominale
PARTIE DC/AC	Taux de distorsion harmonique < 4 %

Tableau 2.5 Contraintes

Les **paramètres** à déterminer sont indiqués sur la Figure 2.38.



Figure 2.38 Eléments à optimiser

D'un point de vue mathématique, ce dimensionnement n'est pas très complexe, car les critères d'optimisation et les contraintes ne sont pas nombreux. Cependant, ceci suffit largement à illustrer les avantages d'une méthode d'optimisation hybride. En plus cela sert à mettre en place et tester l'outil d'optimisation des IP.

2.3.7 Résultats

Ce point illustre les résultats obtenus avec une méthode d'optimisation hybride. Ces résultats sont ensuite comparés aux résultats obtenus avec les AG et à ceux obtenus avec la méthode

analytique classique. Tous les procédés d'optimisation ont été réalisés avec un PC Pentium III à 800 MHz avec 512 MG de mémoire RAM.

2.3.7.1 Résultats de la méthode hybride

Le tableau qui suit présente les valeurs des paramètres obtenus avec le procédé hybride.

C _{Bus}	1410µF	V_{Bus}	500 V
L _{AC}	0.9 mH	$f_{DC/AC}$	5 kHz
C _{AC}	25 µF	$f_{DC/DC}$	5 kHz
Nombre de modules	4	C _{PAC}	286 µF
L _{DC}		2.9	mH

Tableau 2.6 Valeurs obtenues avec la méthode hybride

 $f_{DC/AC}$ et $f_{DC/DC}$ sont les fréquences de découpage de l'OT et du hacheur respectivement.

Avec ces paramètres, les valeurs pour le critère d'optimisation et pour les contraintes sont :

Contraintos	Ondulations du courant PAC	1.59 %
Contraintes	THD	3.28 %
Critère d'optimisation	Pertes de puissance	2891 W

Tableau 2.7 Résultats de l'optimisation hybride

Le Tableau 2.1 présente le temps de calcul pour chaque partie. Si, le lecteur désire plus d'informations concernant les paramètres des AG, il peut se référer à l'annexe A4.

Nombre de générations, AG = 210	Temps de calcul des $AG = 3 h. 21 min.$	
Itération du procédé déterministe = 8	Temps de calcul du méthode déterministe = 33 min	
Temps de calcul total $= 3$ h. 54 min.		

Tableau 2.8 Temps de calcul de l'optimisation hybride

On note que le procédé d'optimisation déterministe n'a pas besoin de beaucoup d'interactions ni de temps. En effet, les AG ont donné comme meilleur individu un point très proche de l'optimum. L'évolution des AG le confirme, puisqu'il n'existe pas de grandes variations lors des dernières générations (Voir Figure 2.39).



Figure 2.39 Evolution du meilleur individu des AG, méthode hybride

Cette courbe permet de constater la grande vitesse de convergence des AG vers l'optimum au début du procédé, quand la diversité est élevée. Cependant, cette vitesse décroît notablement

après les premières générations, population plus uniforme, parce que les AG convergent lentement vers l'optimum à la fin du procédé. Cela confirme les caractéristiques mentionnées précédemment et justifie l'utilisation d'une méthode hybride.

En conclusion, malgré sa simplicité, le cas analysé permet tout à fait de montrer la puissance et l'utilité de cette méthode hybride.

2.3.7.2 Comparaison des résultats

Comme il a été précédemment indiqué, ce dimensionnement a été réalisé avec :

- Une méthode analytique dite classique, sans aucun algorithme d'optimisation.
- Une méthode totalement heuristique, avec AG.

Pour ce dernier cas, les paramètres des AG ont été les mêmes que ceux employés pour les AG lors de l'optimisation hybride. La seule différence est le nombre de générations. Dans le cas hybride, le nombre de générations est inférieur de 30 %. Cette valeur à été choisie suite à une analyse de l'évolution du meilleur individu avec la méthode totalement heuristique. Le temps de calcul de la méthode totalement heuristique est de 4 heures et 40 minutes.

	Méthode analytique	AG	Optimisation hybride
C_{Bus}	1500 μF	1346 µF	1410µF
L _{AC}	1.5 mH	1.1 mH	0.9 mH
C_{AC}	30 µF	39 µF	25 µF
Nombre de modules	4	4	4
L _{DC}	1 mH	2.3 mH	2.9 mH
V_{Bus}	600 V	553 V	500
$f_{DC/AC}$	7 kHz	5070 Hz	5000
f _{DC/DC}	5 kHz	5200 Hz	5000
C _{PAC}	200 µF	267 μF	286 μF

Les tableaux suivants illustrent la comparaison des résultats obtenus.

		Méthode analytique	AG	Optimisation hybride
Contraintes	Ondulations du courrant PAC	3.36 %	1.39 %	1.59 %
	THD	2.37 %	1.57 %	3.28 %
Critère d'optimisation	Pertes de puissance	3432 W	3039 W	2891 W

Tableau 2.10 Comparaison des résultats

Cet exemple simple a validé l'intérêt de la méthode d'optimisation proposée comme outil de dimensionnement. En effet, même si le nombre des contraintes et critères d'optimisation est réduit, les résultats montrent que l'utilisation de la méthode hybride permet d'améliorer les caractéristiques de l'IP.

La méthode hybride conduit à une amélioration de 16 % par rapport à la méthode classique et de 6 % par rapport à la méthode totalement heuristique en terme de critère choisi. En outre, l'hybridation permet une réduction du temps de calcul de l'ordre de 20 % par rapport au temps nécessaire avec les AG. Tout cela fait de la méthode hybride une méthode très bien adaptée aux problèmes relatifs à l'électrotechnique. Cependant, il faut noter que les résultats obtenus avec ces trois méthodes ne sont pas trop éloignés du fait du faible nombre de paramètres intervenant pour l'optimisation.

2.4 Conclusions

Ce chapitre a montré que les IP sont actuellement des éléments à considérer de très près pour le développement des PAC, car l'interface doit satisfaire les conditions imposées par la PAC et par l'application. En outre, l'IP doit assurer une gestion optimale de l'énergie produite. Tout cela conditionne énormément les structures et les topologies possibles de l'interface.

Suite à une analyse des interfaces existantes, on a constaté que pour des puissances de l'ordre de 100 kW, il existe une structure de puissance dénominateur commun à toutes les applications étudiées. Cette IP correspond à l'interface utilisée dans l'application stationnaire, soutien de poste. Ce dénominateur commun a été appelé interface universelle de puissance.

En partant de cette structure, on a réalisé un procédé d'optimisation pour définir l'interface optimale pour une PAC en utilisant diverses méthodes.

Les AG sont bien adaptés aux problèmes de l'électrotechnique, car ils son robustes face aux non-linéarités et optimaux locaux. En outre, leur utilisation n'exige pas une modélisation spécifique, ce qui facilite énormément leur implémentation. Néanmoins, ils présentent quelques inconvénients lorsque leur population devient très uniforme.

Ce chapitre a illustré qu'un procédé hybride permet de faire face aux aspects négatifs des AG. En effet, une hybridation «AG / méthode déterministe » conduit non seulement à de meilleurs résultats mais aussi à une réduction du temps de calcul. Dans tous les cas, une amélioration, si minime soit elle, ne doit pas être négligée vu le prix élevé du kW installé pour une PAC.

Pour obtenir l'IP optimale pour une PAC, l'étape suivante consiste dans l'analyse et l'adaptation du contrôle commande aux caractéristiques de la PAC. Dans ce sens, le chapitre suivant analyse le niveau de contrôle intermédiaire de l'IP.

CHAPITRE 3 CONTROLE COMMANDE DE L'INTERFACE DE PUISSANCE D'UNE PAC

Une partie vitale du contrôle d'une IP est la régulation de certaines grandeurs intermédiaires comme par exemple, la tension du bus continu ou le courant de sortie de la PAC. Ce contrôle se réalise via des régulateurs qui doivent assurer de bonnes performances sous des contraintes assez strictes.

Ce chapitre dévoile les correcteurs les plus représentatifs parmi les régulateurs existants. Ces régulateurs, autant continus que numériques, ont été sélectionnés du fait de bons rapports performance/complexité. Ces régulateurs sont comparés sur la base de leur robustesse vis-à-vis des erreurs paramétriques et autres perturbations.

La première partie de ce chapitre décrit les régulateurs sélectionnés. Pour faciliter leur compréhension, ils sont classifiés selon le convertisseur de la chaîne de génération que l'on désire commander. Pour chaque convertisseur, plusieurs correcteurs sont proposés en tenant compte des divers scenarii de fonctionnement. Leur réglage est validé par les résultats obtenus en simulation.

La dernière partie du chapitre présente la validation des contrôles proposés, sur un banc expérimental. Ces résultats concernent plus particulièrement le contrôle de l'OT. On a validé tant la régulation en courant que la régulation en tension.

3.1 Schéma global du contrôle

Ce chapitre se focalise sur la structure de puissance la plus répandue. Suite à une recherche bibliographique avancée, la structure choisie est celle illustrée par la Figure 3.1. A la différence de la structure sélectionnée dans le chapitre 2, qui était la plus large structure commune, celle-ci tient compte de l'ES et de son EP. Cette structure est valide pour des applications à la fois transport et stationnaire.

L'ES est connecté au bus continu par un hacheur réversible en courant qui est décrit postérieurement. Le type et la taille de l'ES dépendent énormément de chaque application. Dans ce chapitre, l'ES est modélisé comme une source d'énergie et de puissance infinie par rapport à nos besoins et dont la tension reste toujours constante. Une analyse plus détaillée et réaliste de l'ES (Dimensionnement, gestion...) est faite au §4.4.



Figure 3.1 Topologie de puissance de l'IP

Les valeurs des paramètres de l'EP sont celles obtenues avec l'optimisation hybride dans §2.3. Néanmoins, la tension du bus continu a été augmentée à 775 V, car cette valeur permet d'avoir une meilleure dynamique (Voir équation (2.17)). En effet, cela facilite le contrôle des variables alternatives de l'OT. Par ailleurs, ce choix se voit aussi confirmé par d'autres travaux [FEBUSS].

Niveaux de commande et régulateurs

Le contrôle commande de l'IP se compose de plusieurs niveaux de contrôle. Chacun a une fonction déterminée et des spécifications propres. Cependant, la communication et la coordination entre ces niveaux sont indispensables pour assurer un fonctionnement correct (Voir Figure 3.2). Les différents niveaux sont ci-dessous listés :

- **Contrôle rapproché :** Il a déjà été présenté dans §2.2.3. On rappelle que la MLI scalaire est le type de commande rapprochée choisie.
- **Contrôle intermédiaire Régulateurs.** Il doit contrôler les variables intermédiaires de l'IP comme par exemple, la tension du bus continu ou le courant de la PAC. Ce niveau reçoit comme entrée les consignes de courant et de tension du niveau supérieur et en déduit le signal de commande pour la MLI en ajustant la variable à la référence. Le régulateurs formant ce niveau peuvent être connectés en cascade, c'est-à-dire que la sortie d'un régulateur constitue la consigne d'un autre. Par des raisons de stabilité et de commandabilité [Bac], les régulateurs de courant sont ceux qui envoient les signaux au contrôle rapproché.
- **Gestion d'énergie.** Il correspond au niveau supérieur et c'est lui qui génère les consignes en fonction de la charge. Le système de sécurité (limites dynamiques de la PAC) fait également partie de ce niveau. Le chapitre suivant analyse en détail ce niveau de commande.

Comme on l'a présenté précédemment, ce chapitre se focalise principalement sur le niveau **Contrôle intermédiaire** de l'IP. Pour faciliter sa compréhension, les parties successives analyseront les différents convertisseurs, car le contrôle de chacun peut être analysé séparément en supposant dans un premier temps un découplage représenté par une tension de bus continu constante.

- Hacheur parallèle DC/DC de la PAC.
- Hacheur réversible DC/DC de l'ES.
- Onduleur de tension.



Figure 3.2 Niveaux de contrôle commande

Actuellement, les régulateurs les plus représentatifs pour l'asservissement des grandeurs continues sont le proportionnel, Proportionnel Intégral (PI) et RST. Ce dernier est un correcteur numérique, tandis que les P/PI peuvent être continus ou numériques. Pour des grandeurs alternatives, on peut ajouter l'intégrateur généralisé et le PI en repères tournant.

L'utilisation de ces correcteurs est très intéressante du fait de leur bon compromis performances/simplicité. Compte tenu de tout cela, ces régulateurs seront testés pour le contrôle d'une IP utilisant une PAC.



Figure 3.3 Schéma des correcteurs analysés en fonction des niveaux de contrôle et des hacheurs

L'outil de simulation employé pour tester les régulateurs ici présentés est Matlab/Simulink. Les modèles utilisés sont des modèles moyens déjà décrits, car de par leur caractéristique (poids de calcul réduit sans grande perte de précision) ils sont très bien adaptés pour le réglage et l'analyse des régulateurs.

3.2 Contrôle du hacheur DC/DC de la PAC

Le fait que la PAC se doit d'être bien contrôlée via son courant de sortie implique que le convertisseur en sortie de cette dernière doit maîtriser le courant ponctionné. Le hacheur élévateur connecté aux bornes de la PAC contrôlera la puissance fournie par celle-ci via le courant en sortie de la PAC. La PAC connectée à ce hacheur peut être assimilée à une source de courant contrôlée en puissance (Voir Figure 3.4). La référence en courant de cette boucle est calculée par le niveau supérieur de contrôle.

On pourrait imaginer une autre possibilité : Contrôler la tension du bus continu via le même hacheur. Or, cela implique que la PAC devra répondre aux sollicitations brusques de la charge, ce qui est à déconseiller lorsque les dynamiques sont importantes.

Néanmoins, la structure de contrôle en courant nécessitera un ES qui devra pallier les dynamiques élevées et qui pourra également réguler la tension du bus continu.



Figure 3.4 Schéma équivalent de la PAC et son contrôle commande

Pour l'asservissement du courant de la PAC, on a sélectionné deux régulateurs différents dont la méthode de réglage employée diffère aussi.

- Un régulateur continu : PI.
- Un régulateur numérique : RST.

Analyse de la fonction de transfert continue du hacheur élévateur

A partir de l'équation (2.2) on détermine l'équation représentant le comportement du courant de la PAC (Voir Equation(3.1)). Pour régler le correcteur, on considère que le hacheur élévateur est équivalent à un gain égal à V_{BUS} . Cette linéarisation simplifie le réglage du régulateur.

$$FT_{Filtre_L}(s) = \frac{I_{PAC}}{\alpha} = \frac{V_{Bus}}{L_{DC} \cdot s + R_{DC}}$$
(3.1)

 R_{DC} représente la résistance série de l'inductance et les pertes par conduction. Le régulateur dépendra de cette FT de premier ordre dont la constante de temps est τ_{DC} (L_{DC}/R_{DC}) et dont le gain est égal à $\frac{V_{Bus}}{R_{DC}}$. Sa réponse fréquentielle est présentée dans l'annexe 8, §A8.1.



Figure 3.5 Boucle de contrôle du courant $I_{PAC} \label{eq:PAC}$

Or, les valeurs de ces paramètres sont soumises à des erreurs qui peuvent être dues à la mesure (tolérance des capteurs) mais aussi à d'autres aspects : non-linéarités et dérive thermique. Pourtant, la modélisation se base sur des hypothèses concernant les éléments passifs (linéarité, exactitude). Cela nous conduit donc à une analyse de l'influence de ces paramètres sur la FT. Pour simplifier, dans la suite de la thèse, le terme « erreur paramétrique » fera référence à tous les types d'erreur.

Pour analyser l'influence des erreurs paramétriques, on a modifié les valeurs théoriques des paramètres dans un rapport de \pm 50 %.



Figure 3.6 Effets sur la réponse fréquentielle d'une sous et surestimation de la résistance

Figure 3.7 Effets sur la réponse fréquentielle d'une sous et surestimation de l'inductance

La résistance, R_{DC} , influence la constante de temps et le gain de la FT. A basse fréquence, on note clairement son influence sur le module du système : elle provoque donc une grande altération à basse fréquence. Cependant, son influence à haute fréquence est moins significative. La phase n'est pas autant influencée par la résistance hormis aux hautes fréquences (Voir Figure 3.6).

L'inductance, L_{DC} , n'influence que le pôle. Son influence ne se fait donc sentir qu'aux hautes fréquences. En ce qui concerne le module, une sous-estimation conduit à un système plus rapide : une BP plus grande. Egalement, la phase est principalement modifiée à hautes fréquences. Cela montre donc qu'une erreur paramétrique sur l'inductance n'influence pas les basses fréquences (régime permanent). Par contre, la marge de phase et de stabilité du système varient (Voir Figure 3.7).

3.2.1 Régulateur continu - PI

Les deux actions, proportionnelle et intégrale, permettent d'éliminer l'erreur au régime permanent et d'obtenir la réponse transitoire désirée pour des grandeurs continues (Voir Equation (3.2) et §A8.1). Le régulateur a théoriquement un gain infini pour des grandeurs continues.

$$FT_{PI}(s) = Kp \cdot \left(1 + \frac{Ki}{s}\right)$$
(3.2)

Avec (3.1), les FT complètes en BO et BF peuvent donc s'écrire sous les formes suivantes.

$$FT_{BO_{DC}}(s) = \frac{I_{PAC}}{I_{PAC}^*} = Kp \cdot \left(1 + \frac{Ki}{s}\right) \cdot \frac{V_{Bus}}{L_{DC} \cdot s + R_{DC}} = \frac{s + Ki}{s} \frac{Kp \cdot V_{Bus}}{L_{DC} \cdot s + R_{DC}}$$
(3.3)

$$FT_{BF_{DC}}(s) = \frac{I_{PAC}}{I_{PAC}^*} = \frac{Kp \cdot V_{Bus} \cdot (s+Ki)}{L_{DC} \cdot s^2 + (R_{DC} + Kp \cdot V_{Bus}) \cdot s + Kp \cdot V_{Bus} \cdot Ki}$$
(3.4)

Le réglage d'un régulateur type PI peut se faire de diverses manières :

Placement des pôles, réponse temporelle, réponse fréquentielle.

Dans notre cas, le PI est calculé en fonction des critères du domaine temporel : atteindre la référence dans un temps déterminé. Pour cela, on compense le pôle du système avec l'action intégrale et avec l'action proportionnelle, on fixe le temps du système en BF.

$$Ki = \frac{R_{DC}}{L_{DC}} \qquad \qquad Kp = \frac{3 \cdot L_{DC}}{T_{reps} \cdot V_{Bus}}$$
(3.5)

$$FT_{BF_{DC}}(s) = \frac{Kp \cdot V_{Bus}}{L_{DC} \cdot s + Kp \cdot V_{Bus}}$$
(3.6)

Où : T_{reps} est le temps de réponse à 95 % de la consigne.

L'inconvénient de ce réglage est que le pôle du système n'est pas compensé par rapport à la perturbation (variation de V_{PAC} , Voir équation (3.7)). La dynamique par rapport à la perturbation est fixée par le pôle du système. Cependant, dans notre cas, cela ne pose guère de problèmes, car V_{PAC} est liée au courant qui est contrôlé. En plus, le filtre de sortie C_{PAC} atténue ses variations brusques. Par ailleurs, si V_{PAC} sort du gabarit, un signal de sécurité se déclenche.

$$FT_{BF_DC_Per}(s) = \frac{I_{PAC}}{V_{PAC}} = \frac{s}{(L_{DC} \cdot s + Kp \cdot V_{Bus}) \cdot (s + \frac{R_{DC}}{L_{DC}})}.$$
(3.7)

La stabilité du système linéarisé est illustrée par son diagramme de Bode (Voir Figure 3.8 et Figure 3.9).



Figure 3.8 Réponse fréquentielle en BO du hacheur élévateur avec le PI

Figure 3.9 Réponse fréquentielle en BF du hacheur élévateur avec le PI

Le temps de réponse est fixé à 5 ms, ($V_{Bus} = 775$ V, $L_{Hacheur} = 2.9$ mH, $R_{Hacheur} = 10$ m Ω). La Figure 3.10 illustre la réponse du système face à un échelon de courant de 50 à 150 A à 10 ms ($V_{PAC} = 350$ V).

On note que la réponse du système a un dépassement, cela est parce que le pôle du système réel n'est pas exactement le même que celui de la FT linéarisée et donc il n'est pas exactement compensé. La réponse n'est plus celle d'un système du premier ordre mais du deuxième ordre. D'ailleurs, le temps de réponse n'est pas exactement celui fixé. Tout cela est

du à la non-linéarité du système. En effet, le PI a été réglé en utilisant une FT simplifiée du modèle exact dit topologique. Malgré tout, la réponse obtenue est satisfaisante.

Le régulateur est robuste par rapport aux perturbations. Cependant, son diagramme de Bode montre que certaines fréquences ne sont guère atténuées, (Voir annexe 8 §A8.1). Toutefois, le comportement du système « réel » basé sur le modèle moyen, est satisfaisant, comme la Figure 3.11 l'illustre.



Figure 3.10 Réponse de la boucle d' I_{PAC} avec un PI face à un échelon de la référence de 50 à 150 A



Le régulateur a été par ailleurs testé face à des erreurs paramétriques ; variation de 50 % de R_{DC} et L_{DC} . Le comportement du système tant au niveau stabilité que performances demeure toujours satisfaisant.

3.2.2 Régulateur numérique – RST

Grâce à sa facilité d'implémentation et à ses possibilités, la commande numérique est une approche élégante. Parmi les régulateurs numériques existants, on a choisi la structure de type RST. Le principal avantage du régulateur RST réside dans les degrés de liberté liés à ses réglages [Roy-98].



Figure 3.12 Schéma du contrôle numérique et du système

3.2.2.1 Discrétisation du hacheur élévateur

Pour régler le RST, on doit tout d'abord obtenir la FT du système échantillonné. Ce système a comme particularité l'inclusion des bloqueurs d'ordre 0 et le retard du calcul de la commande. Le schéma est illustré par la figure précédente.

La période d'échantillonnage (T_S), le retard de calcul (T_C) et la période de la MLI (T_{MLI}) peuvent être différentes. Dans la plupart des cas, le retard de calcul est suffisamment petit pour ne pas poser de problèmes. En plus, ses conséquences négatives ont moins d'importance à basses fréquences : 50 ou 60 Hz. Dans tous les cas, le contrôle numérique tient compte de cet aspect et le compense.



Figure 3.13 Chronogramme du système numérique

L'instant d'échantillonnage par rapport aux commutations liées à la MLI est un autre aspect à signaler. En effet, la mesure peut être perturbée par le « bruit » des commutations. Or, on doit synchroniser l'échantillonnage et la modulation. Dans notre cas, les mesures sont synchronisées et faites au maximum et minimum de la modulante de la MLI [Etx-03][Rog]. Ainsi, la mesure n'est pas perturbée.

Le bloqueur utilisé est d'ordre 0 (Voir équation (3.8)) et on considère que le retard de calcul est égal à une période d'échantillonnage. Avec cela et (3.1), on obtient la FT discrétisée linéaire. Le retard de calcul est égal à une période d'échantillonnage.

$$B_0(s) = \frac{1 - e^{s \cdot T_s}}{s} = L\left[\frac{z - 1}{z}\right] \cdot \frac{1}{s}$$
(3.8)

$$FT_{Filtre_L}(z) = \frac{I_{PAC}}{\alpha_{DC}} = Z \left\{ FT_{Filtre_L}(s) \cdot B_0(s) \cdot e^{-sT_s} \right\} = Z \left\{ \frac{V_{Bus}}{L_{DC} \cdot s + R_{DC}} \cdot B_0(s) \cdot e^{-sT_s} \right\}$$
(3.9)

Donc

$$FT_{Filtre_L}(z) = \frac{I_{PAC}}{\alpha_{DC}} = \frac{B_1}{z \cdot (z - a)}$$
(3.10)

Où :

$$a = e^{-\frac{R_{DC}T_{S}}{L_{DC}}} \qquad B_{1} = \frac{V_{Bus} \cdot (1-a)}{R_{DC}}$$
(3.11)

Concernant la FT par rapport à la perturbation, l'approche est différente : on ne peut que mesurer l'effet sur le système de la perturbation qui est un phénomène continu. Pour calculer la FT par rapport par rapport à la perturbation, on considère que la dynamique de la perturbation est très réduite par rapport à la fréquence d'échantillonnage [Rog][Etx-03]. Avec cette hypothèse, on obtient l'équation suivante.



Figure 3.14 Modélisation de la perturbation

Erreurs paramétriques

L'analyse des erreurs paramétriques de cette FT montre que le système numérisé présente le même comportement que le système continu. L'influence des variations de la résistance et de l'inductance sont identiques au cas continu. En conséquence, les remarques sont similaires à celles formulées §3.2.1.

Retard numérique

La somme des retards, que l'on nommera retard de numérisation, a une grande importance sur le comportement du système discrétisé et par conséquence sur le réglage du correcteur. Il peut entraîner une instabilité, car réduisant la marge de phase.

En effet, le retard de calcul introduit un déphasage additionnel en fonction de la fréquence (Voir équation (3.13)). A hautes fréquences, ce retard réduit d'une manière ostensible la marge de phase, ce qui dans certains cas peut constituer un problème. Les diagrammes de Bode du système en BO l'illustrent (Voir Figure 3.15).

$$\Delta \phi = \frac{3}{2} \omega \cdot T_{Echan} \cdot \frac{180}{\pi}$$
(3.13)

Figure 3.15 Effets de la période d'échantillonnage sur la FT en BO

D'ailleurs, ce retard de calcul peut donner lieu à un pic de résonance en BF à haute fréquence que le système continu n'a pas. Cela est dû au déphasage supplémentaire en BO présenté précédemment [Etx-03]. Dans notre cas, cependant, ces aspects ne sont pas très problématiques car le retard de calcul est de 100 μ s et le système reste toujours stable sans aucun pic de résonance en BF. Sur les aspects négatifs du retard de calcul, [Etx-03] contient une analyse très détaillée.

3.2.2.2 Régulateur RST

Un régulateur de type RST fait intervenir trois polynômes R(z), S(z) et T(z) qui sont appliqués à la référence, à la mesure et à l'erreur comme il est décrit :



Figure 3.16 Schéma général d'un correcteur RST

 $O\dot{u}$: A₁ et B₁ représentent la FT discrète par rapport à la consigne (Voir Equation (3.10)). A₂ et B₂ représentent la FT discrète par rapport à la perturbation.

Les polynômes R, S et T peuvent être calculés de diverses manières. Dans notre cas, le réglage a été fait **par le placement de pôles du système** en BF. La FT souhaitée a des pôles multiples réels avec un gain unitaire.

$$I_{PAC} = \frac{T \cdot B_1}{A_1 \cdot R + S \cdot B_1} \cdot I_{PAC}^* + \frac{R \cdot B_2 \cdot A_1}{A_2 \cdot (A_1 \cdot R + S \cdot B_1)} \cdot V_{PAC}$$
(3.14)

Compte tenu de la non-linéarité du système réel, le réglage des polynômes sera fait de telle manière que le pôle multiple réel du système sera fixé indépendamment. C'est-à-dire, le degré choisi du régulateur RST est tel qu'on peut fixer librement le pôle multiple pour ainsi obtenir la réponse souhaitée du système réel. Cela constitue un avantage par rapport au régulateur PI.

$$FT_{BF_DESIREE}(z) = \frac{T \cdot B_1}{A_1 \cdot R + z \cdot B_1} = \frac{1}{(z - P\hat{o}le)^n}$$
(3.15)

Le degré du polynôme S est calculé en fonction de l'ordre de la FT et de la forme de la consigne et la perturbation (échelon, ordre 1). En tenant compte de S, on calcule le polynôme R. Son degré doit être supérieur ou égal à celui de S pour que le système soit causal. Notons que le polynôme R a un pôle égal à l'unité pour éliminer l'erreur face à un échelon.

$$R(z) = (z-1) \cdot (z^2 + z \cdot r_0 + r_1)$$
(3.16)

$$S(z) = (z^2 \cdot s_0 + z \cdot s_1 + s_2) \tag{3.17}$$

Le dénominateur du système en boucle fermé est donc :

$$A_1R + B_1S = (z-1) \cdot (z^2 + z \cdot r_0 + r_1) \cdot z \cdot (z-a) + B_1 \cdot (z^2 \cdot s_0 + z \cdot s_1 + s_2)$$
(3.18)

Avec cela, le degré du système en BF est égal à 5.

$$A_1 R + B_1 S = (z - P\hat{o}le)^5$$
(3.19)

Avec (3.18) et (3.19), on détermine la valeur des coefficients.

$$\begin{cases} r_0 = 1 + a - 5 \cdot P \delta le \\ r_1 = 10 \cdot (P \delta le^2 - P \delta le^3) + r_1 \cdot (1 + a) - a \end{cases}$$
(3.20)

$$\begin{cases} s_0 = \frac{r_2 \cdot (1+a) - a \cdot r_1 - 10 \cdot P \hat{o} l e^3}{B_1} \\ s_1 = \frac{5 \cdot P \hat{o} l e^4 - a \cdot r_2}{B_1} \\ s_2 = \frac{-P \hat{o} l e^5}{B_1} \end{cases}$$
(3.21)

Pour que la gain du système en BF soit unitaire, le polynôme T doit être égal à :

$$T(z) = \frac{(1 - P\hat{o}le)^2}{B_1} \cdot (z - P\hat{o}le)^3$$
(3.22)

Le pôle multiple réel est fixé pour obtenir un temps de réponse égal à 5 ms sans dépassement. La valeur du pôle est 0.62 (Voir Figure 3.17). A la différence du régulateur continu, le réglage du régulateur numérique permet d'éviter le dépassement de la référence.



Figure 3.17 Réponse de la boucle d'I_{PAC} avec un RST face à un échelon de la référence de 50 à 150 A

Figure 3.18 Réponse de la boucle d' I_{PAC} avec un RST face à un échelon de la perturbation, +50 V

L'analyse fréquentielle montre que le système est stable avec le pôle choisi (Voir Figure 3.19 et Figure 3.20).





Figure 3.20 Réponse fréquentielle en BF du hacheur élévateur avec le correcteur RST

Par rapport aux perturbations, le comportement est robuste, comme le résultat des simulations et le diagramme de Bode l'illustrent. Il faut souligner que le RST conduit à une claire atténuation des perturbations pour toutes les fréquences.

A la différence du PI, ce régulateur est plus sensible aux erreurs paramétriques relatives à l'inductance. Concernant la résistance le comportement ne change pas : la robustesse est assurée. Néanmoins, les erreurs paramétriques concernant l'inductance provoquent des oscillations notables notamment en cas de surestimation.



Figure 3.21 Effets sur la réponse fréquentielle d'une sous et surestimation de L_{DC}

Figure 3.22 Effets sur la réponse temporelle d'une sous et surestimation de L_{DC}

Pour résoudre cet aspect, on déplace le pôle multiple réel : Une réduction qui éloigne le pôle de la zone d'instabilité, permet d'atténuer les ondulations du système. Néanmoins, ceci implique une réponse plus lente que la précédente (Voir Figure 3.23). Dans notre cas, on a modifié empiriquement le pôle de 0.62 à 0.55. En définitive, un compromis s'avère nécessaire entre la robustesse face aux erreurs paramétriques et les performances du système.



Figure 3.23 Effets sur la réponse fréquentielle d'une sous et surestimation de L_{DC}

3.2.2.3 Conclusions

Les régulateurs ici présentés ont montré qu'ils sont bien adaptés aux besoins et contraintes d'une PAC. Les deux régulateurs présentent des performances satisfaisantes malgré la non-linéarité du système.

Le régulateur numérique RST est bien plus complexe que le PI, tant en ce qui concerne son réglage que son implémentation. En plus, la sensibilité du RST aux erreurs paramétriques exige une attention plus importante que le PI. Cependant, le degré de liberté de réglage du RST permet de pallier ces aspects négatifs, ce qui est un grand avantage compte tenu de l'aspect non-linéaire du hacheur. En outre, sa réponse est plus rapide que celle du PI. Donc, le choix entre ces deux correcteurs sera déterminé par un compromis entre leurs caractéristiques.

	PI	RST
+/-	2	15
*/÷	3	15
Variables à stocker	2	12

Tableau 3.1 Opérations mathématiques pour l'implémentation des correcteurs

3.3 Contrôle du hacheur de l'ES

3.3.1 Modèle du hacheur réversible

Une IP est nécessaire entre l'ES et le bus continu. Cette IP adapte les niveaux de tension de l'ES au bus continu. En outre, ceci contrôle l'énergie fournie ou absorbée par l'ES. Le hacheur doit être donc réversible en puissance.



Figure 3.24 Hacheur réversible en courant connecté à l'ES

Dans notre cas, le hacheur choisi est un hacheur classique réversible en courant (Voir Figure 3.24). Les équations décrivant son comportement sont (3.23) et (3.24).

$$L_{ES} \frac{dI_{ES}}{dt} = V_{ES} - V_{BUS} \cdot u_{ES}$$
(3.23)

$$C_{BUS} \frac{dV_{BUS}}{dt} = I_{ES} \cdot u_{ES} - \frac{V_{Bus}}{R_{Bus}} - I_{Charge}$$
(3.24)

 $O\dot{u}$: L_{ES} est l'inductance du hacheur et u_{ES} est l'ordre de commande : quand il est égal à 1, l'interrupteur est fermé, quand il est 0, le semi-conducteur est ouvert. Notons ici que la commutation des semi-conducteurs est complémentaire. I_{ES} et V_{ES} sont la tension et le courant respectivement de l'ES. R_{Bus} est une résistance connectée en parallèle au bus continu représentant des diverses pertes.

Le modèle moyen est obtenu par la substitution de u_{ES} par α_{ES} dont les valeurs sont comprises entre 0 et 1.

Le dimensionnement de l'inductance a été fait selon les critères décrits dans l'annexe 5, A5.1.7. Avec une fréquence de découpage de 10 kHz, $V_{Bus} = 775$ V et une ondulation maximale d'I_{ES} égale à 5A, la valeur obtenue de inductance est 2 mH. On suppose que la tension nominale de l'ES est de 400 V.

Compte tenu de la structure modulaire du hacheur de la PAC, de nombreux schémas de contrôle de la tension du bus pourraient être conçus. Par exemple, une répartition active de la charge ou le contrôle de V_{Bus} par un (des) hacheur(s) de la PAC seraient possibles [Luo-99].

Cependant, comme dit plus haut, les caractéristiques de la PAC ne rendent pas cela souhaitable. Les travaux réalisés dans ce domaine l'ont confirmé. En conséquence, l'ES avec son IP se doit d'asservir la tension continue du bus si un convertisseur tiers n'est pas affecté à cette tâche.

En tenant compte de la stabilité du hacheur, le contrôle direct de la tension du bus n'est pas aisé. En conséquence, le contrôle se compose de deux boucles imbriquées dont celle qui est extérieure asservit la tension du bus continu (Voir Figure 3.25).



Figure 3.25 Boucles imbriquées de contrôle de la tension de bus avec l'ES

3.3.2 Boucle de courant

En faisant fi des contraintes liées à l'ES, le contrôle du courant I_{ES} est moins contraignant en performances, si ce n'est qu'il doit être suffisamment rapide pour être imbriqué dans la boucle de réglage de tension. En sachant ceci, le régulateur choisi est un régulateur dit Proportionnel. Son réglage est fait en garantissant une BP déterminée. Cette BP doit être suffisamment grande pour que la boucle de courant puisse être assimilée à un gain unitaire, lors du réglage du régulateur du bus continu.



Figure 3.26 Schéma de la boucle de courant

R_{ES} représente diverses pertes ohmiques.

Pour le réglage, on modélise le hacheur avec son contrôle rapproché par un gain égal à la tension de l'ES. L'équation résultante est très similaire à celle obtenue pour le hacheur élévateur classique (Voir Equation (3.1)). Les remarques faites sur les erreurs paramétriques sont ici aussi valables.

Donc, les FT en BO et BF sont illustrées ci-dessous.

$$FT_{BO_ES}(s) = \frac{I_{ES}}{I_{ES}^*} = Kp \cdot \frac{V_{Bus}}{L_{ES} \cdot s + R_{ES}}$$
(3.25)

$$FT_{BF_ES}(s) = \frac{I_{ES}}{I_{ES}^*} = \frac{Kp \cdot V_{Bus}}{L_{ES} \cdot s + R_{ES} + Kp \cdot V_{Bus}}$$
(3.26)

La fréquence de la BP ($f_{BP_{ES}}$) est donnée par l'équation (3.27).

$$f_{BP_ES} = \frac{Kp \cdot V_{Bus} + R_{ES}}{L_{ES}}$$
(3.27)

La BP est fixée à 1000 rad/s. Avec cette valeur, le contrôle ne se voit pas perturbé par la fréquence de découpage et sa réponse est assez rapide par rapport à la boucle de tension. La fréquence de la boucle de tension est supposée autour de 100 rad/s.

Les digrammes de Bode, illustrés dans l'annexe 8 §A8.2, valident les calculs présentés. D'ailleurs, les performances sont satisfaisantes, comme les simulations du système nonlinéaire (grands signaux) le montrent. Le temps de réponse est autour de 5 ms sans dépassement. Notons qu'au régime permanent, il existe une erreur entre la référence et la mesure.



Figure 3.27 Réponse temporelle de la boucle du courant du hacheur réversible face à un échelon

Par rapport aux erreurs paramétriques, la réponse du système ne se voit guère modifiée. Le système résultant est très robuste. Son comportement également n'est guère modifié lors de perturbations, si ce n'est que l'erreur au régime permanent varie légèrement, car le gain du système varie.

3.3.3 Boucle de tension du bus continu

Compte tenu de l'équation (3.24), on peut ici appliquer un réglage basé sur une méthode de linérisation [Bac][Guf-00]. Cela permet de résoudre les problèmes constatés lors des réglages des régulateurs précédents.

A partir de l'équation (3.23), en supposant qu'on est en régime permanent, on trouve la commande équivalente relative à I_{ES}^* ; cette dernière est ensuite introduite dans l'équation (3.24). On obtient alors la dynamique équivalente de V_{Bus}.

$$C_{Bus} \frac{dV_{Bus}}{dt} = I^*_{ES} \cdot \frac{V_{ES}}{V_{Bus}} - \frac{V_{Bus}}{R_{Bus}} - I_{Charge}$$
(3.28)

Malheureusement cette équation n'est pas linéaire, ce qui rend plus difficile le réglage du correcteur. Néanmoins en s'intéressant à l'énergie, c'est-à-dire en faisant le changement de variable $X = V_{Bus}^2$, on obtient la relation linéaire qui suit :

$$C_{Bus} \frac{dX}{dt} = 2 \cdot I^*_{ES} \cdot V_{ES} - 2 \frac{X}{R_{Bus}} - I_{Charge}$$
(3.29)

Avec la transformée de Laplace, cette fonction peut s'écrire sous la forme (3.30).

$$FT_X(s) = \frac{V_{ES} \cdot R_{Bus}}{\frac{R_{Bus}C_{Bus}}{2} \cdot s + 1}$$
(3.30)

Erreurs paramétriques

On modifie les paramètres R_{BUS} et C_{BUS} de ± 50 % par rapport à leurs valeurs nominales : 10 Ω et 1410 μ F respectivement. L'analyse des erreurs paramétriques montre que l'influence des composants est similaire à celle du hacheur élévateur classique : C_{bus} à rapprocher de $L_{Hacheur}$ et R_{Bus} de $R_{Hacheur}$ (Voir §3.2.1).



Figure 3.28 Effet sur la réponse fréquentielle d'une Figure 3.2 sous et surestimation de la résistance R_{Bus} sous

Figure 3.29 Effet sur la réponse fréquentielle d'une sous et surestimation de la capacité C_{BUS}

Donc, la capacité a principalement une influence à hautes fréquences sur la marge de phase et la BP. Elle influence uniquement la constante de temps. La variation de la résistance change le module à basse fréquence au travers du gain. A hautes fréquences, elle influence la phase au travers de la constante de temps.

A la différence de la boucle de courant, l'asservissement de V_{Bus} ne peut pas présenter une erreur au régime permanent. Cela nous amène à envisager des régulateurs dont le principe de fonctionnement se base sur une action intégrale. Grâce à son bon rapport performances/complexité, on a choisi un régulateur de type PI (Voir §A8.2).

Les FT en BO et BF du système sont ci-dessous illustrées.

$$FT_{BO_X}(s) = \frac{X_{ES}}{X_{ES}^*} = Kp \cdot \left(1 + \frac{Ki}{s}\right) \cdot \frac{2 \cdot V_{ES} \cdot R_{Bus}}{R_{Bus} \cdot C_{Bus} \cdot s + 2}$$
(3.31)

$$FT_{BF_{-X}}(s) = \frac{X_{ES}}{X_{ES}^*} = \frac{2 \cdot V_{ES} \cdot R_{Bus} \cdot Kp \cdot (s+Ki)}{R_{Bus} \cdot C_{Bus} \cdot s^2 + 2 \cdot (1+V_{ES} \cdot R_{Bus} \cdot Kp) \cdot s + 2 \cdot V_{ES} \cdot R_{Bus} \cdot Kp \cdot Ki}$$
(3.32)

Le PI est réglé pour assimiler le système en BF à une FT de 2^{eme} ordre.

$$FT_{BF_Des}(s) = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2 \cdot \varsigma \cdot \omega_n \cdot s + \omega_n^2}$$
(3.33)

Les paramètres du régulateur PI en fonction de ceux de la FT souhaitée sont :

$$Kp = \frac{1}{V_{ES}} \cdot \left[\varsigma \cdot \omega_n \cdot C_{Bus} - \frac{1}{R_{Bus}} \right] \qquad \qquad Ki = \frac{C_{Bus} \cdot \omega_n^2}{2 \cdot V_{ES} \cdot Kp}$$
(3.34)

Notons que le système réel présente un pôle en BF que l'on n'a pas dans l'équation (3.33). Ce pôle non-désiré peut donc modifier légèrement la réponse transitoire du système (Voir Figure 3.31).

$$FT_{BF_X}(s) = \frac{X_{ES}}{X_{ES}^*} = \frac{\omega_n^2}{Ki} \cdot \frac{(s+Ki)}{s^2 + 2 \cdot \varsigma \cdot \omega_n \cdot s + \omega_n^2}$$
(3.35)

Les valeurs de ω_n et ζ sont choisies égales à 100 rad/s et 1. ω_n assure ainsi que la boucle de courant présente une réponse quasi-instantanée par rapport à la boucle de tension : Cette dernière est à une décade de moins que la BP de la boucle de courant. ζ est choisi pour obtenir un compromis entre la vitesse de la réponse et le dépassement.

Les diagrammes de Bode du système en BO et BT sont illustrés par la Figure 3.30 et la Figure 3.31.





Figure 3.31 Réponse fréquentielle en BF de la boucle de V_{BUS} contrôlée avec hacheur réversible

Le système est stable et sa BP est celle souhaitée. On note que le système en BF n'a que -90° de déphasage à cause du zéro non-désiré. Les différences entre le système idéal (Voir équation (3.32)) et celui de l'équation (3.33) sont illustrées par la Figure 3.31.



Figure 3.32 Réponse du hacheur réversible avec le PI face à un échelon de la référence

Figure 3.33 Détail de la Fig. 3.32 (zéro instable)

Les résultats obtenus en simulation sont très satisfaisants. Le modèle de simulation a tenu compte de la boucle de courant et des non-linéarités du système. La Figure 3.32 illustre la réponse du système face à un échelon de la tension du bus de 775 V à 800 V à l'instant 0.1 s. Notons que le zéro instable provoque au démarrage un dépassement négatif (Voir Figure 3.32 et Figure 3.33).

Dans tous les cas, la réponse temporelle du modèle dit linéaire (sans le zéro, voir équation (3.33)) et du système réel avec son contrôle sont très similaires, comme la Figure 3.34

l'illustre. Les deux systèmes ont été soumis à une même variation de la référence : de 775 V à 800 V à t = 0.1 s.

Les différences entre les deux réponses sont dues aux non-linéarités du système. Lors du transitoire, la commande du système réel se sature, tandis que dans le modèle linéaire, cette saturation n'existe pas. En conséquence, on peut affirmer que les performances du système sont conformes aux objectifs fixés.

En ce qui concerne les erreurs paramétriques, le système présente un comportement robuste. La réponse transitoire n'est guère modifiée et le système est toujours stable. Par rapport aux perturbations, le contrôle atténue également les perturbations du courant de charge. (Voir Figure 3.35).



Figure 3.34 Comparaison du modèle non-linéaire et celui linéarisé en asservissement

 $\begin{array}{l} Figure \ 3.35 \ Réponse \ du \ hacheur \ réversible \ (modèle non-linéaire) \ face \ à un \ échelon \ de \ la \ perturbation, \\ +50 \ \% \ P_{Nominale} \end{array}$

En conclusion, le système de contrôle ici proposé est stable et robuste. Les deux boucles imbriquées sont bien dimensionnées et les performances du système sont satisfaisantes.

3.4 Contrôle de l'onduleur de tension

L'OT est, comme on l'a dit précédemment, la partie de l'IP qui transforme la tension continue du bus en une tension alternative triphasée. L'OT permet d'assimiler le générateur à une source de tension ou à une source de courant contrôlée en puissance en fonction du contrôle et du filtre de raccordement. La topologie de l'OT avec le filtre de raccordement est celui de la Figure 3.1 dont les équations sont (2.17) et (2.18).

3.4.1 Source de courant contrôlée en puissance

Dans ce cas, on distingue deux modes de fonctionnement selon la méthode de calcul du courant de référence.

• **Référence directe en puissance**. La consigne est calculée directement en fonction de la puissance demandée par l'application et de la tension de raccordement. Cette référence de puissance est généralement externe à l'IP. Le contrôle se compose d'une seule boucle de courant.



Figure 3.36 Contrôle directe en puissance de l'OT

• Référence calculée par la boucle de la tension du bus. Le contrôle se compose de deux boucles imbriquées (Voir Figure 3.37). Cette méthode est utilisée principalement par des IP qui n'ont pas d'ES et qui sont toujours connectés au réseau électrique. Le domaine d'application se limite aux systèmes pour le soutien de poste avec une lente dynamique.



Figure 3.37 Régulation de la tension du bus continu avec l'OT

Pour le contrôle de la **boucle de courant**, il existe deux méthodes:

- Le contrôle à structure variable est très robuste et performant. D'ailleurs, il n'a pas besoin d'une grande connaissance du système. Cependant, le système fonctionne à fréquence variable ce qui complique le dimensionnement des composants passifs.
- Le contrôle à fréquence fixe est aussi robuste et performant mais plus complexe. Il se base sur une boucle interne de modulation qui reçoit la référence d'une boucle de courant. Le système travaillant à fréquence fixe de commutation facilite le dimensionnement des composants passifs.

Dans notre cas, on a choisi le contrôle à fréquence fixe. Les correcteurs possibles pour la boucle de courant peuvent également se classifier en deux grandes familles.

- **Régulateurs basés sur l'intégration**. Leur principe de fonctionnement est la mémorisation de l'erreur entre la consigne et la mesure en annulant l'erreur de phase et d'amplitude. Le **PI**, déjà présenté pour des grandeurs continues et l'**Intégrateur Généralisé** (IG, ou correcteur résonant) sont les principaux représentants de cette famille. Ils seront l'objet de notre étude.
- **Correcteurs à réponse pile**. Leur caractéristique principale est que la sortie est similaire à la référence mais retardée. Leur réglage peut être fait de plusieurs manières. Dans cette famille, le **RST** numérique est le correcteur choisi.

Le filtre de raccordement est similaire à celui obtenu avec l'optimisation hybride. Cependant la capacité a été fixée à 10 μ F pour réduire la puissance réactive absorbée par le filtre.

On a modélisé l'OT et la MLI par un gain égal à $V_{Bus}/2$. Avec cette simplification, on établit l'équation représentant le comportement du courant dans l'inductance, (3.37).

$$FT_{Filtre_L_{AC}}(s) = \frac{I_{S_i}}{u_i} = \frac{V_{Bus}/2}{L_{AC} \cdot s + R_{AC}} , i = 1, 2, 3.$$
(3.37)

En fonction du point de raccordement au réseau électrique de l'IP, l'impédance de courtcircuit vue par le générateur varie. Ceci est important pour le comportement de l'IP surtout lors des transitoires. Compte tenu de la puissance de notre système, le raccordement se fait généralement à basse tension. Cette ligne de basse tension peut être connectée au réseau de distribution à travers un transformateur qui élève la tension à 20 kV. Dans ce contexte, on a distingué trois cas de raccordement possibles :

- **Réseau parfait :** La puissance de court-circuit du réseau au point de raccordement est infinie par rapport à la puissance fournie par le générateur. Or, la tension au point de raccordement ne varie jamais du fait de la puissance du générateur. Cela peut être le cas d'une connexion directe à un départ de HTA (Haute Tension type A).
- **Réseau urbain :** La puissance de court-circuit est plus basse, car le générateur n'est pas directement rattaché aux départs de HTA. Dans tous les cas, les câbles de connexion sont courts (moins d'un kilomètre), souterrains mais aussi aériens. L'influence de l'IP sur la tension au point de raccordement est faible.
- **Réseau rural :** Les conducteurs sont plus longs qu'1 km et dans la plupart des cas, ils sont aériens. De ce fait, la tension au point de raccordement peut varier en fonction de la puissance fournie par l'IP.

Compte tenu de tout cela, on définit trois réseaux représentant chacun des cas décrits pour l'analyse du comportement de l'OT. Les données des réseaux urbain et rural sont illustrées par les Tableau 3.2 et Tableau 3.3 [Mar-01]. L'impédance du réseau parfait est simplement égale à 0 Ω . La topologie choisie pour simuler ces connexions a été un générateur de Thévenin (Voir Figure 3.38).

Réseau de distribution	Transformateur	Réseau urbain	Réseau rural
Pcc= 5 MVA	Sn=100kVA	BT, 500 m	BT, 1000 m
U= 20kV	Up=20kV Us=400V	Souterrain, Al	Aérien, Cu
Rcc/Xcc=40%	Ucc= 4% Rt/Xt= 50%	0.15 +j 0.8 Ω/Km	0.5 +j 0.8 Ω/Km

Tableau 3.2 Paramètres des réseaux simulés

Ligne urbaine	$\approx 0.11 \ \Omega \ / \approx 1.3 \ mH$
Ligne rurale	$pprox 0.45 \ \Omega \ / pprox 2.5 \ mH$



Tableau 3.3 Impédances totales des lignes

Figure 3.38 Schéma de raccordement au réseau électrique d'une phase

Avec ce schéma, la consigne du courant varie en fonction du réseau étudié. En effet, la consigne de courant est calculée à partir de la puissance souhaitée et de la tension au point de raccordement : tension aux bornes des condensateurs C_{AC} . Or, si cette tension varie, le courant demandé aussi. Ces interactions font que le système est plus riche en dynamique. Cependant, cela nous permet de tester le système dans des cas plus proches de la réalité. Même si tous les résultats ne sont pas ici présentés, les trois correcteurs ont été simulés dans les trois cas.

Donc, on présente les résultats obtenues en simulation d'un OT régulé en courant avec :

- PI dans des repères tournants
- Intégrateur généralisé
- Régulateur RST
- PI contrôlant la tension du bus continu

3.4.1.1 PI dans des repères tournants, régulation en courant

Le régulateur PI classique ne permet d'éliminer l'erreur statique que pour des grandeurs continues : il n'a une réponse idéale (déphasage et gain unitaire) qu'à la fréquence nulle. En conséquence, il n'est pas bien adapté pour l'asservissement des grandeurs alternatives.

Pour résoudre ce problème, il existe quelques possibilités : augmenter le gain, PI complexe... Dans notre cas, une autre solution plus performante peut être envisagée. Son principe se base sur la représentation par un phaseur des signaux triphasés déphasés de 120° et ayant la même fréquence. Avec ce principe, on peut représenter les tensions et les courants du système via la transformée de Concordia.



Figure 3.39 Schéma de la boucle de courant avec PI en repère tournant

Si le repère des phaseurs tourne également et à la même fréquence que celle des grandeurs, ils deviennent des valeurs continues. C'est la représentation de Park. En utilisant cette nouvelle représentation, ces valeurs continues peuvent être asservies par des PI classiques sans aucune erreur (ni de phase ni de module) au régime permanent.

La représentation de l'OT dans le repère de Concordia est donnée ci-dessous.

$$V_{S\alpha} = i_{\alpha} \cdot R_{AC} + L_{AC} \cdot \frac{di_{\alpha}}{dt} + e_{\alpha} \rightarrow L_{AC} \cdot \frac{di_{\alpha}}{dt} = V_{S\alpha} - i_{\alpha} \cdot R_{AC} - e_{\alpha}$$
(3.38)

$$V_{S\beta} = i_{\beta} \cdot R_{AC} + L_{AC} \cdot \frac{di_{\beta}}{dt} + e_{\beta} \quad \longrightarrow \quad L_{AC} \cdot \frac{di_{\beta}}{dt} = V_{S\beta} - i_{\beta} \cdot R_{AC} - e_{\beta}$$
(3.39)

Les équations de la transformée de Park sont présentées par (3.40) et (3.41). Dans ce cas, le phaseur du réseau est en phase avec l'axe q.

$$V_{Sd} = i_d \cdot R_{AC} + L_{AC} \cdot \omega \cdot i_q + L_{AC} \cdot \frac{di_d}{dt} \longrightarrow L_{AC} \cdot \frac{di_d}{dt} = V_{Sd} - i_d \cdot R_{AC} - L_{AC} \cdot \omega \cdot i_q$$
(3.40)

$$V_{Sq} = i_q \cdot R_{AC} - L_{AC} \cdot \omega \cdot i_d + L_{AC} \cdot \frac{di_q}{dt} + e_q \quad \longrightarrow \quad L_{AC} \cdot \frac{di_q}{dt} = V_{Sq} - i_q \cdot R_{AC} + L_{AC} \cdot \omega \cdot i_d - e_q \tag{3.41}$$

Le PI est appliqué à ces équations. Notons le couplage entre les deux axes, ce couplage sera vu par les régulateurs comme des perturbations, ceci simplifie les équations et le réglage. Par contre, les correcteurs ne devront pas être trop rapides, car il y a aura des interactions entre les deux axes lors des transitoires. La limitation des correcteurs ainsi que les couplages constituent une dégradation des performances. Dans tous les cas, le comportement du système ne se voit pas affecté en régime permanent et des correcteurs assez simples peuvent être employés.

Avec (3.40) et (3.41), on a donc :

$$FT_{L_{d/q}}(s) = \frac{1}{L_{AC} \cdot s + R_{AC}}$$
(3.42)

L'influence des erreurs paramétriques sur ces équations est similaire à celle décrite pour le hacheur élévateur, la FT ayant la même structure. Le réglage ici employé se base sur la réponse fréquentielle souhaitée du système en BF. Cette méthode est similaire à celle employé pour le correcteur de la tension du bus continu.

Avec (3.2) et (3.42), on peut écrire les équations du système en BO et BF.

$$FT_{BO_{dq}}(s) = \frac{I_{Sd/q}}{I_{Sd/q}^*} = Kp \cdot \left(1 + \frac{Ki}{s}\right) \frac{1}{L_{AC} \cdot s + R_{AC}} = \frac{s + Ki}{s} \frac{Kp}{L_{AC} \cdot s + R_{AC}}$$
(3.43)

$$FT_{BF_{d/q}}(s) = \frac{I_{Sd/q}}{I_{Sd/q}^*} = \frac{Kp \cdot (s + Ki)}{L_{AC} \cdot s^2 + (R_{AC} + Kp) \cdot s + Kp \cdot Ki}$$
(3.44)

Avec (3.33), les paramètres du correcteur sont définis par les relations ci-dessous illustrées. La BP choisie est de 1000 rad/s. Cette valeur est largement supérieure à la fréquence fondamentale, mais elle atténue les perturbations provoquées par les couplages d'axes et les commutations. L'amortissement est égal à 1.

$$Kp = 2 \cdot \varsigma \cdot \omega_n \cdot L_{AC} - R_{AC} \qquad Ki = L_{AC} \cdot \omega_n^2 \qquad (3.45)$$

L'analyse fréquentielle montre que le système a la BP souhaitée et qu'il est stable. Notons le léger pic du système en BF, il est dû au zéro du système.







Les résultats obtenus en simulation confirment ces performances, car le système a un temps de réponse autour de 10 ms pour le réseau idéal. On constate également en simulation l'influence des couplages entre le deux axes, car le système présente des oscillations lors des transitoires et l'axe oscille avec les échelons de référence de puissance active.

Concernant le point de raccordement, on note que le système est robuste. Néanmoins, il y a une perte de performances due aux interactions entre axes. En effet, un échelon de puissance active peut provoquer également une variation dans la référence de l'axe d pour compenser la chute de tension additionnelle dans le filtre (Voir Figure 3.42 et Figure 3.43). Dans tous les cas, le transitoire n'est pas brusque et les puissances fournies en régime permanent sont correctes (Voir Figure 3.44 et Figure 3.45).

-100

-120

-160

-180

-200

0.05



Figure 3.42 Réponse de l'axe d face à un échelon de la référence, + 50 % P_{Nominale}, réseau rural



Figure 3.44 Puissances fournies au réseau

Figure 3.43 Réponse de l'axe q face à un échelon de la référence, + 50 % P_{Nominale} réseau rural

0.15

Temps (s)

0.2

0.25

0.3

0.1



Figure 3.45 Courants fournis au réseau, Ig
Le comportement face à des perturbations est aussi satisfaisant (Voir Figure 3.46). Comme pour le hacheur, la réponse fréquentielle atténue toutes les fréquences même si certaines pourraient l'être plus (Voir §A8.3). Notons que lors d'un échelon de la perturbation, la consigne de courant varie, comme la Figure 3.46 l'illustre. Cela est dû au fait que l'OT est contrôlé en puissance et donc le contrôle compense le chutes de tension du réseau.



Figure 3.46 Réponse de l'axe q de l'OT face à un échelon de la perturbation, -10 % E

Le régulateur est robuste face aux erreurs paramétriques (\pm 50 % des valeurs de l'inductance et de la résistance). En effet, le comportement ne change guère : le dépassement et le temps de réponse sont similaires à ceux obtenus précédemment.

3.4.1.2 Intégrateur généralisé, régulation en courant

A la différence du PI dans repères tournants, l'IG, connu également sous le nom de régulateur résonant, élimine l'erreur tant en phase qu'en amplitude d'une grandeur sinusoïdale sans besoins d'aucun repère tournant. Pour cela, ce correcteur présente théoriquement un gain infini par rapport à la consigne et une réjection parfaite de la perturbation.

Son principe de fonctionnement réside sur le phénomène de résonance d'une FT dont les pôles à une fréquence donnée sont complexes conjugués et à partie réelle nulle. Cela permet d'avoir théoriquement un gain infini et un déphasage nul à la fréquence des pôles. Les perturbations à la fréquence de résonance sont également éliminées (Voir

Figure **3.47**). En conséquence, l'IG constitue un régulateur très bien adapté pour le contrôle d'OT, car les références et les perturbations ont toujours la même fréquence.







L'IG peut être représenté de plusieurs manières. Il peut être assimilé à un PI en repère tournants. Donc, on peut envisager une action intégrale et une action proportionnelle (Voir Figure 3.49). Cela est bien adapté pour des applications multi-fréquentielles, comme le filtrage actif [Etx-03]. Néanmoins, la méthode la mieux adaptée pour notre cas mono fréquentiel est celle basée sur la méthode dite de Naslin [Hau-99] explicitée ici :s



Figure 3.49 Schémas possibles d'un correcteur IG

La forme générale d'une FT ayant un gain à une fréquence de résonance donnée (ω est sa pulsation) est donnée par (3.46).

$$FT_{_Gen_IG}(s) = \frac{Num}{s^2 + \omega^2}$$
(3.46)

Pour obtenir une FT semi-causale et assez de paramètres pour le réglage, on prend un numérateur (Num) du 2^{eme} degré. Le calcul se fait en fonction de la dynamique souhaitée qui est déterminée par le dénominateur du système en BF (Voir Equation (3.48)).

Avec l'équation de la Figure 3.49 et l'équation (3.37), on obtient les FT en BO et BF.

$$FT_{OT_{IG}_{BO}}(s) = \frac{I_s}{I_s^*} = \frac{V_{Bus}/2}{L_{AC} \cdot s + R_{AC}} \cdot \frac{C_2 \cdot s^2 + C_1 \cdot s + C_0}{s^2 + \omega^2}$$
(3.47)

$$FT_{OT_{IG}_{BF}}(s) = \frac{I_s}{I_s^*} = \frac{V_{Bus} / 2 \cdot (C_2 \cdot s^2 + C_1 \cdot s + C_0)}{(s^2 + \omega^2) \cdot (L_{AC} \cdot s + R_{AC}) + V_{Bus} / 2 \cdot (C_2 \cdot s^2 + C_1 \cdot s + C_0)}$$
(3.48)

Ensuite, on assimile le dénominateur de $FT_{OT_IG_BF}$ à un polynôme caractéristique ($P_c(s)$) qui est déterminé en fonction de la réponse temporelle souhaitée.

$$(s^{2} + \omega^{2}) \cdot (L_{AC} \cdot s + R_{AC}) + V_{Bus} / 2 \cdot (C_{2} \cdot s^{2} + C_{1} \cdot s + C_{0}) = P_{C}(s)$$
(3.49)

$$Pc(s) = a_0 + a_1 \cdot s + a_2 \cdot s^2 + a_3 \cdot s^3 + \dots + a_n \cdot s^n$$
(3.50)

Le polynôme $P_c(s)$ peut se transformer sous la forme (3.51), dit polynôme de Naslin, $P_N(s)$. L'exactitude de la réponse de $P_c(s)$ par rapport au comportement désiré dépend de son ordre. Cependant, elle est quasi-identique, si l'ordre de $P_c(s)$ est au moins égal à trois, tandis que les rapports caractéristiques sont choisis de la même valeur (Voir Equation (3.52)).

$$P_N(s) = a_0 \cdot \left(1 + \frac{s}{\omega_0} + \frac{s^2}{\alpha_{RR} \cdot \omega_0^2} + \frac{s^3}{\alpha_{RR}^3 \cdot \omega_0^3} \dots + \frac{s^n}{\alpha_{RR}^{n.(n-1)/2} \cdot \omega_0^n} \right)$$
(3.51)

$$\alpha_{RR} = \frac{a_1^2}{a_0 \cdot a_2} = \frac{a_2^2}{a_1 \cdot a_3} = \dots = \frac{a_{n-1}^2}{a_{n-2} \cdot a_n}$$
(3.52)

Où α_{RR} est le rapport des coefficients du polynôme de Naslin et ω_0 la première pulsation caractéristique du polynôme de Naslin, $\omega_0 = \frac{a_0}{a_1}$. On peut écrire :

$$\omega_n = \alpha_{RR}^{\ n} . \omega_0 \qquad \qquad a_n = \alpha_{RR}^{-n(n-1)/2} . \omega_0^{-n} \qquad (3.53)$$

Par des lois empiriques, Naslin a défini l'influence de α_{RR} et ω_0 sur la réponse temporelle : le dépassement (D) en % et le temps de montée (t_m) sont donnés par les équations (3.54) et (3.55).

$$Log(D) = 4.8 - 2 \cdot \alpha_{RR} \tag{3.54}$$

$$t_m = \frac{2.2}{\omega_0} \tag{3.55}$$

La BP du système résultant (ω_c) peut donc s'écrire sous la forme :

$$\omega_C = \frac{4.4}{\alpha_{RR}} \,\omega_0 \tag{3.56}$$

Si l'on désire une réponse « cosinusoïdale » sur une demi-période, la relation entre la pulsation de résonance et la première pulsation caractéristique du polynôme est obtenue par l'équation (3.57).

$$\omega = \frac{\pi}{2.2} \cdot \omega_0 \tag{3.57}$$

Avec ces relations et (3.49), on obtient les valeurs des paramètres.

$$C_{0} = \frac{2 \cdot \left(L_{AC} \cdot \omega_{0}^{3} \cdot \alpha_{RR}^{3} - R_{AC} \cdot \omega^{2}\right)}{V_{Bus}}$$

$$C_{1} = \frac{2 \cdot \left(L_{AC} \cdot \omega_{0}^{2} \cdot \alpha_{RR}^{3} - L_{AC} \cdot \omega^{2}\right)}{V_{Bus}}$$

$$C_{2} = \frac{2 \cdot \left(L_{AC} \cdot \omega_{0}^{2} - R_{AC}\right)}{V_{Bus}}$$
(3.58)

 α_{RR} peut être modifié librement pour obtenir le comportement souhaité. [Hau-99] recommandent une valeur initiale égale à 2 qui est la valeur ici employée du fait de ses bonnes performances. La réponse fréquentielle du système est illustrée par la Figure 3.50 et la Figure 3.51. On constate clairement le pic de résonance à la fréquence du réseau du système en BO. Notons que le système présente un module égal à 1 et un déphasage nul à la fréquence souhaitée.



Figure 3.50 Réponse fréquentielle en BO de la boucle d'I_S avec un IG

Figure 3.51 Réponse fréquentielle en BF de la boucle d'I_S avec un IG

Les performances du régulateur sont satisfaisantes, comme les simulations l'illustrent (Voir Figure 3.52).

Il faut noter que la durée du transitoire est plus longue que la demi-période théorique quand l'OT est connecté à un réseau non-ideal. Ceci est dû au fait que la tension au point de raccordement est légèrement influencée par la puissance de l'IP. Cette tension est employée pour le calcul du courant de référence des correcteurs. Ainsi, dans le cas d'une ligne rurale, on constate que ce transitoire est plus important, car l'importance de l'IP pour le réglage de la tension est majeure. Dans tous les cas, les temps sont toujours réduits. (Echelon de 50 à 100 % de la puissance nominale à t = 50 ms).



Figure 3.52 Réponse de la boucle d'I_S avec un IG face à un échelon de la référence, + 50 % P_{Nominale}, réseau idéal

Figure 3.53 Réponse de la boucle d'I_s avec un IG face à un échelon de la référence, + 50 % P_{Nominale}, réseau rural

Dans tous les cas, le système est robuste. Le comportement du système par rapport au point de raccordement est satisfaisant.

La FT par rapport aux perturbations est présentée par (3.59). Cette FT a un zéro à la fréquence de résonance, ce qui permet au correcteur d'atténuer toutes les perturbations à cette fréquence. Les simulations l'illustrent (Voir Figure 3.54). Egalement, lors de l'asservissement, le régime transitoire a une durée légèrement plus longue qu'en théorie. La raison est celle évoquée antérieurement. Le système est soumis à une variation du -10 % de la tension du réseau à t = 50 ms.

$$FT_{OT_IG_Pert}(s) = \frac{I_s}{E} = \frac{(s^2 + \omega^2)}{V_{Bus} / 2 \cdot (C_2 \cdot s^2 + C_1 \cdot s + C_0) + (L_{AC} \cdot s + R_{AC}) \cdot (s^2 + \omega^2)}$$
(3.59)

Le correcteur est également robuste par rapport aux erreurs paramétriques. Le système a été testé face à des erreurs de \pm 50 % de la valeur de l'inductance et de la résistance. Le comportement du système est similaire à celui illustré par les figures précédentes.



Figure 3.54 Réponse de la boucle d'Is avec un IG face à un échelon de la perturbation, -10 % E

3.4.1.3 Régulateur RST, régulation en courant

Tout d'abord, on doit numériser l'équation (3.37) avec la même méthode que celle du hacheur élévateur : bloqueur d'ordre 0, échantillonnage synchrone, etc.... La FT numérique obtenue a la même forme que celle du hacheur parallèle classique (Voir §3.2.3). Donc l'influence des erreurs paramétriques ainsi que celle de la période d'échantillonnage sont similaires à celles présentées. Seuls **B**₁ et **a** changent.

$$a = e^{-\frac{R_{AC}T_{S}}{L_{AC}}} \qquad B_{1} = \frac{V_{Bus} / 2 \cdot (1-a)}{R_{AC}}$$
(3.60)

La structure du régulateur et du système est présentée sur la Figure 3.16. Le principe de fonctionnement du régulateur RST a déjà été présenté dans le paragraphe consacré au hacheur parallèle classique. Il existe de nombreux procédés de réglage [Roy-99] : réponse pile, PI...

$$I_{Si} = \frac{T \cdot B_1}{A_1 \cdot R + S \cdot B_1} \cdot I_{Si}^* + \frac{R \cdot B_2 \cdot A_1}{A_2 \cdot (A_1 \cdot R + S \cdot B_1)} \cdot E$$
(3.61)

Dans notre cas, le réglage est fait par **le placement de pôles**. Cela tient compte du type de référence et fixe un pôle multiple en BF. Ayant comme référence une sinusoïde, on peut déterminer le polynôme R qui éliminera l'erreur statique pour cette référence (Voir équation (3.62)). Avec cela, on détermine le degré du polynôme S et ses paramètres à régler en fonction de l'équation (3.15).

$$\sin(\omega \cdot t) \to Z[\sin(\omega \cdot t)] = \frac{z \cdot \sin(\omega \cdot T_S)}{z^2 - 2 \cdot \cos(\omega \cdot T_S) \cdot z + 1}$$
(3.62)

$$R(z) = (z^{2} + z \cdot r_{0} + r_{1}) \qquad S(z) = (z^{2} \cdot s_{0} + z \cdot s_{1} + s_{2}) \qquad (3.63)$$

Pour simplifier le correcteur et son implémentation, on prend T égal à S. Les paramètres du régulateur sont donc les suivants.

$$A_1R + B_1S = (z^2 + z \cdot r_0 + r_1) \cdot z \cdot (z - a) + B_1 \cdot (z^2 \cdot s_0 + z \cdot s_1 + s_2) = (z - P\hat{o}le)^4$$
(3.64)

$$\begin{cases} r_0 = -2 \cdot \cos(\omega \cdot T_S) \\ r_1 = 1 \end{cases}$$
(3.65)

$$\begin{cases} s_0 = \frac{6 \cdot P \delta l e^2 - a \cdot r_0 - r_1}{B_1} \\ s_1 = \frac{a \cdot r_1 - 4 \cdot P \delta l e^3}{B_1} \\ s_2 = \frac{P \delta l e^4}{B_1} \end{cases}$$
(3.66)

Le pôle multiplie en BF est donc :

$$P\hat{o}le = \frac{-2 \cdot \cos(\omega \cdot T_s) + a}{4}$$
(3.67)

La réponse fréquentielle en BO présente un pic de résonance à la fréquence souhaitée, ce qui constitue un comportement très similaire à celui avec un IG. (Voir Figure 3.55 et Figure 3.56).

En effet, le correcteur RST ici calculé base son principe dans la poursuite d'une référence sinusoïdale. C'est aussi le principe du régulateur résonant. Cette méthode a été choisie grâce à ses performances et aussi robustesse.



Figure 3.55 Réponse fréquentielle en BO de la boucle d'Is avec un RST

Figure 3.56 Réponse fréquentielle en BF de la boucle d'I_s avec un RST

Ce régulateur s'est montré plus sensible que les précédents par rapport au type de réseau auquel l'OT est raccordé (impédances de raccordement différentes). Ainsi, pour résoudre ce problème, on a dû élever la valeur de C_{AC} à 40 μ F. Cela a permis d'éliminer les oscillations du système.

Le comportement du système en régulation est satisfaisant. Ainsi, il est robuste face aux perturbations du réseau électrique, comme la Figure 3.57 et la Figure 3.58 l'illustrent. Notons que sa réponse fréquentielle par rapport à la perturbation est également très similaire à celle de l'IG. Elle est caractérisée par une forte atténuation de la fréquence de référence. Toutes les autres fréquences sont atténuées, mais pas autant.

150







Figure 3.58 Réponse de la boucle d'IS avec un RST face à un échelon de la perturbation, -10 % E

A la différence du RST calculé pour le hacheur parallèle classique, ce régulateur est robuste face aux erreurs paramétriques. Lors des transitoires, sa réponse ne change guère, et au régime permanent, son comportement ne change pas.

3.4.1.4 Boucle de tension du bus continu, régulation en courant

Dans le scénario où la PAC est régulée en puissance, l'ES n'étant pas là pour pallier sa dynamique, l'OT se contente d'envoyer au réseau cette puissance. Il le fait de manière « passive » en régulant lui-même la tension du bus continu. Ce contrôle se base sur le principe suivant :

Le régulateur de la tension du bus continu détermine la composante active du courant réseau. Ceci conjugué avec l'énergie réactive souhaitée définit le courant de référence pour la boucle interne de courant.

La technique de réglage du régulateur est similaire à celle employée avec le hacheur de l'ES : **linéarisation par poursuite du carré de la tension**, décrite par l'équation (3.24). Notons que l'on a changé la convention de signe du courant I_{Charge} pour faciliter la compréhension.

$$C_{BUS} \frac{dV_{BUS}}{dt} = I_{Charge} - \frac{V_{Bus}}{R_{Bus}} - I_H$$
(3.68)

 $O\dot{u}$: I_H est la somme des courant de sortie des hacheurs. Ce courant est considéré comme une perturbation.

Avec l'équation (2.19) et en considérant que la boucle de courant est beaucoup plus rapide que celle de la tension, on obtient la relation (3.69) pour le régime permanent [Guf-00].

$$I_{Charge} = \frac{3 \cdot I^* s_q \cdot E}{2 \cdot V_{Bus}}$$
(3.69)

La boucle de courant est implémentée avec des régulateurs PI en repère tournant, même si d'autres correcteurs plus simples pourraient être utilisés. La BP de ces correcteurs est fixée à 1.000 rad/s. (Voir §A8.3). En conséquence, celle du régulateur de tension devra être autour de 100 rad/s, ce qui est suffisant pour une grandeur continue. Notons que dans certains cas, un filtre passe-bas est ajouté à la sortie du correcteur pour éviter l'amplification des phénomènes liés à la commutation [Guf-00].

Avec (3.68) et (3.69), on obtient une FT linéaire pour le contrôle de la tension de bus.

$$C_{BUS} \frac{dX_{OT}}{dt} = 3 \cdot I^*_{Sq} \cdot E - 2\frac{X_{OT}}{R_{Bus}}$$
(3.70)

Le régulateur utilisé est un PI dont la méthode de réglage est similaire à celle employée pour le cas du hacheur de l'ES. La BP du régulateur est fixée à 100 rad/s avec un amortissement unitaire.

Les équations ci-dessous présentent les relations en BO et BF du système et les valeurs des paramètres du PI.

$$FT_{BO_X}(s) = \frac{X_{OT}}{X_{OT}^*} = Kp \cdot \left(1 + \frac{Ki}{s}\right) \cdot \frac{3 \cdot E \cdot R_{Bus}}{R_{Bus} \cdot C_{Bus} \cdot s + 2}$$
(3.71)

$$FT_{BF_Des}(s) = \frac{X_{OT}}{X_{OT}^*} = \frac{3 \cdot Kp \cdot E \cdot R_{Bus} \cdot (s + Ki)}{(R_{Bus} \cdot C_{Bus}) \cdot s^2 + (2 + 3 \cdot Kp \cdot E \cdot R_{Bus}) \cdot s + 3 \cdot Kp \cdot E \cdot R_{Bus} \cdot Ki}$$
(3.72)

$$Kp = \frac{2}{3 \cdot E} \cdot \left[\varsigma \cdot \omega_n \cdot C_{Bus} - \frac{1}{R_{Bus}} \right] \qquad \qquad Ki = \frac{C_{Bus} \cdot \omega_n^2}{3 \cdot E \cdot Kp}$$
(3.73)

L'analyse fréquentielle du système illustre une réponse du système similaire à celle souhaitée. Les figures montrent également que le système est stable (Voir §A8.3). Les résultats de simulation confirment ces aspects : la réponse du système qui a un léger dépassement, est suffisamment rapide (Voir Figure 3.59).

La FT du système par rapport aux perturbations est (3.74). On note que le système annule l'effet des perturbations continues grâce à son zéro à l'origine. Cependant, sa réponse fréquentielle présente une faible atténuation à des fréquences autour de 100 rad/s.

$$FT_{BF_Des}(s) = \frac{X_{OT}}{I_H} = \frac{-3 \cdot E \cdot R_{Bus} \cdot s}{(R_{Bus} \cdot C_{Bus}) \cdot s^2 + (2 + 3 \cdot Kp \cdot E \cdot R_{Bus}) \cdot s + 3 \cdot Kp \cdot E \cdot R_{Bus} \cdot Ki}$$
(3.74)

Une solution à ce problème est la connexion d'un filtre à la sortie du régulateur, il sert également à éliminer les oscillations sur les grandeurs continues provoquées par le « redressement » des grandeurs alternatives ; néanmoins, ce filtre implique une perte de performances. Dans tous les cas, les résultats en simulation montrent que le système est robuste (Voir Figure 3.60) par rapport aux perturbations aussi bien que par rapport aux erreurs paramétriques.



Figure 3.59 Réponse de la boucle de V_{BUS} contrôlée avec l'OT face à un échelon de la référence de 775 V à 800 V à t = 50 ms



Figure 3.60 Réponse de la boucle de V_{BUS} contrôlée avec l'OT face à un échelon de la perturbation, +50 % P_{Nominale}

3.4.1.5 Conclusions

Les résultats obtenus avec les trois régulateurs ici présentés montrent que ces derniers sont performants, robustes et bien adaptés à nos applications.

Parmi eux, on constate que le PI en repère tournant est le plus performant : sa réponse est la plus rapide, en plus elle a un transitoire doux (Voir Figure 3.61). Cependant, les besoins techniques exigés pour son utilisation, sont les plus importants, comme le Tableau 3.4 l'illustre. Ceci est principalement dû à la conversion dans les repères tournants. D'ailleurs, le couplage entre axes implique qu'une modification de la référence dans l'un d'eux provoque une perturbation dans l'autre. Concernant la simplicité, l'IG est le régulateur le plus simple, car le nombre d'opérations est relativement réduit et il n'a pas besoin de discrétisation. Par contre, il n'a qu'un seul paramètre à régler librement. En outre, il n'atténue guère de perturbations dont la fréquence est différente de celle du réseau.

En conclusion, tous les régulateurs sont bien adaptés aux applications ici étudiées. Le choix parmi eux sera le résultat d'un compromis entre la simplicité, la robustesse et les performances désirées.

	PI, dq	IG	RST
+/-	$4 + 15^{*}$	15	15
* / ÷	$6 + 14^{*}$	15	15
Variables à stocker	4	12	12

Tableau 3.4 Opérations mathématiques pour l'implémentation des correcteurs



Figure 3.61 Erreur sur le courant I_S (Echelon de + 50% P _{Nominale} à wt = 90°)

3.4.2 Source de tension

Le contrôle de l'OT comme source de tension se compose de deux boucles imbriquées :

- La boucle externe asservit la tension aux bornes des condensateurs C_{AC}. La référence externe de cette boucle est la tension souhaitée au point de raccordement.
- La boucle interne régule le courant dans l'inductance, L_{AC}. Comme pour le hacheur réversible, cela est dû à des raisons de stabilité et de commandabilité.



Figure 3.62 Schéma de régulation en tension

Le contrôle de la tension peut se faire par une régulation en boucle fermée ou en boucle ouverte. Par des raisons de robustesse et de fiabilité, on a choisi un contrôle **en boucle fermée.** Les correcteurs sélectionnés sont les mêmes que ceux utilisés pour la régulation en courant, car ils représentent également les principales possibilités :

- PI dans des repères tournants
- Intégrateur généralisé
- Régulateur RST

Boucle de courant de l'OT régulé en tension

La boucle de courant sera la plus simple possible. Son but est d'assurer un minimum de rapidité et de stabilité par rapport à la boucle de tension. De cette manière-là, la boucle sera assimilée à un gain unitaire lors du réglage de la boucle de tension. Le correcteur choisi est un correcteur proportionnel. Son réglage est fait pour assurer une BP largement supérieure à celle du régulateur de la tension de raccordement. En fonction des équations (2.27) et (3.76), on

règle le correcteur proportionnel pour une BP de 5000 rad/s. Les essais en simulation et leur diagramme de Bode montrent que ce régulateur est suffisamment performant et robuste. (Voir §A8.3).

$$FT_{BO_{Ond_{I}}}(s) = \frac{I_{S}}{I_{S}^{*}} = \frac{Kp_{AC} \cdot V_{Bus} / 2}{L_{AC} \cdot s + R_{AC}}$$
(3.75)

$$FT_{BF_{Ond}_{I}}(s) = \frac{I_{s}}{I_{s}^{*}} = \frac{Kp_{AC} \cdot V_{Bus} / 2}{L_{AC} \cdot s + R_{AC} + Kp_{AC} \cdot V_{Bus} / 2}$$
(3.76)

Boucle de la tension de l'OT régulé en tension

Pour la régulation en tension, l'aspect le plus important du correcteur est sa robustesse face aux perturbations. C'est-à-dire, que **l'on privilège l'aspect régulation** par rapport à l'aspect asservissement, car la tension de référence est fixe en amplitude et module. Compte tenu de cela, on ne présente que les résultats en régulation des correcteurs, même s'ils ont été également testés en asservissement.

Pour les tester, on a défini trois charges ci-dessous listées. Ces charges ont été définies en fonction des données du projet européen dans lequel nous sommes impliqués [FEBUSS] et des normes de raccordement [P-1547][Min-00]. On ne s'intéressera qu'à l'harmonique fondamental.

- Une charge totalement résistive : $100 \text{ kW}_{\text{Max}}$.
- Une charge résistive et capacitive, 100 kW_{Max} et 40 kVar_{Max}.
- Une charge résistive et inductive, 100 kW_{Max} et 40 kVar_{Max}.

Les valeurs des composants du filtre de raccordement sont 100 μ F et 1 mH. Ces valeurs sont déterminées en fonction de §A5.1.4 et [Etx-03] en sachant que V_{Bus} = 775 V et que la fréquence de découpage de l'OT est égale à 10 kHz.

3.4.2.1 PI dans des repères tournants, régulation en tension

Le principe de fonctionnement est similaire à celui de la boucle de courant. A partir des équations 2.28 et avec la transformée de Concordia, on obtient les équations suivantes.

$$\frac{dE_{\alpha}}{dt} = \frac{i_{S\alpha}}{C_{AC}} - \frac{i_{g\alpha}}{C_{AC}}$$

$$\frac{dE_{\alpha}}{dE_{\alpha}} = \frac{i_{S\alpha}}{i_{S\alpha}} - \frac{i_{\alpha\beta}}{i_{\alpha\beta}}$$
(3.77)

$$\frac{dT}{dt} = \frac{r_{Sp}}{C_{AC}} - \frac{r_{Sp}}{C_{AC}}$$
(3.78)

Compte tenu que les condensateurs sont connectés physiquement en triangle, la capacité C_{AC} indiquée dans ces équation est trois fois supérieure que celle de la réalité.

Avec la transformée de Park, on a :

$$C_{AC} \cdot \frac{dE_d}{dt} = \frac{i_{Sd}}{C_{AC}} - \omega \cdot E_q - \frac{i_{gd}}{C_{AC}}$$
(3.79)

$$C_{AC} \cdot \frac{dE_q}{dt} = \frac{i_{Sq}}{C_{AC}} + \omega \cdot E_d - \frac{i_{gq}}{C_{AC}}$$
(3.80)

Avec l'équation (3.2), les équations du système en BO et BF pour chaque axe peuvent s'écrire sous les formes (3.81) et (3.82). Dans certains cas, une résistance en parallèle avec le condensateur est prise en compte pour représenter l'autodécharge du condensateur. En

sachant que sa valeur est très élevée, le courant qui y passe, est négligeable par rapport au courant de l'OT.

$$FT_{BO_{dq}}(s) = \frac{E_{d/q}}{E_{d/q}^*} = Kp \cdot \left(1 + \frac{Ki}{s}\right) \frac{1}{C_{AC} \cdot s} = \frac{s + Ki}{s} \frac{Kp}{C_{AC} \cdot s}$$
(3.81)

$$FT_{BF_{d/q}}(s) = \frac{E_{d/q}}{E_{d/q}^*} = \frac{Kp \cdot (s + Ki)}{C_{AC} \cdot s^2 + Kp \cdot s + Kp \cdot Ki}$$
(3.82)

Le réglage employé pour le régulateur se base sur le même principe que celui employé pour la régulation en courant, (Voir équation (3.83) et §3.4.1.1). Pour que la simplification de la boucle de courant soit valide, la BP de la boucle de tension a été fixée à 500 rad/s avec un amortissement égal à 1.

$$Kp = 2 \cdot \varsigma \cdot \omega_n \cdot C_{AC} \qquad Ki = C_{AC} \cdot \omega_n^2 \qquad (3.83)$$

L'analyse fréquentielle illustre que le système résultant est stable et qu'il respecte les critères fixés (Voir §A8.3). Notons que la phase en BO commence à 180° à cause du double intégrateur. Comme dans les cas précédents, il apparaît un zéro en BF.

La FT du système en régulation peut s'écrire sous la forme (3.84).

$$FT_{BF_d/q}(s) = \frac{E_{d/q}}{I_{gd/q}} = \frac{s}{C_{AC} \cdot s^2 + Kp \cdot s + Kp \cdot Ki}$$
(3.84)

Les résultats en simulation du système face aux variations brusques de charge ont été satisfaisants : le système est capable d'éliminer toutes les perturbations en échelon. La Figure 3.63 illustre un exemple. Le transitoire ne dure que quelques millisecondes (5 ms). Cela constitue un temps acceptable pour la plupart des charges compte tenu de la brusque variation de charge.



Figure 3.63 Réponse de la boucle de tension au point de raccordement, E, avec un PI dans un repère tournant lors d'un échelon de la perturbation, + 50 % P_{Nominale}

Les résultats en simulation avec les autres charges ont montré des résultats similaires. Ainsi, on peut conclure que la régulation est robuste face aux variations de la charge.

Egalement, le système est robuste face aux erreurs paramétriques du filtre de raccordement. Sa réponse ne change guère lors d'erreurs de l'ordre de \pm 50 % de a valeur nominale.

3.4.2.2 Intégrateur généralisé, régulation en tension

Son principe de fonctionnement est le même que celui du régulateur de courant, présenté § 3.4.1.2. Dans ce cas, l'équation pour identifier les paramètres du polynôme de Naslin est obtenue à partir de l'équation (2.27).

$$P_{C}(s) = (s^{2} + \omega^{2}) \cdot (C_{AC} \cdot s) + (C_{2} \cdot s^{2} + C_{1} \cdot s + C_{0})$$
(3.85)

Les FT du système en BO et BF du système peuvent alors s'écrire sous les formes (3.85) et (3.86).

$$FT_{OT_{IG_{BO}}(s)} = \frac{E_s}{E_s^*} = \frac{1}{C_{AC} \cdot s} \cdot \frac{C_2 \cdot s^2 + C_1 \cdot s + C_0}{s^2 + \omega^2}$$
(3.86)

$$FT_{OT_{IG}_{BF}}(s) = \frac{E_s}{E_s^*} = \frac{C_2 \cdot s^2 + C_1 \cdot s + C_0}{\left(s^2 + \omega^2\right) \cdot \left(C_{AC} \cdot s\right) + \left(C_2 \cdot s^2 + C_1 \cdot s + C_0\right)}$$
(3.87)

Avec cela, on calcule les paramètres du régulateur en fonction des paramètres du système et des paramètres du polynôme de Naslin (α_{RR} et ω_0) selon la méthode déjà décrite plus haute.

$$C_{0} = C_{AC} \cdot \omega_{0}^{3} \cdot \alpha_{RR}^{3}$$

$$C_{1} = C_{AC} \cdot \omega_{0}^{2} \cdot \alpha_{RR}^{3} - C_{AC} \cdot \omega^{2}$$

$$C_{2} = C_{AC} \cdot \omega_{0}^{2}$$
(3.88)

A la différence du régulateur de courant, le paramètre α_{RR} , est fixé à 8. L'augmentation de cette valeur suppose la réduction de la BP du système et en conséquence, l'augmentation du temps de réponse en poursuite. Cependant, le système est plus robuste face aux perturbations : plus rapide et transitoires moins brusques. La valeur a été définie empiriquement en fonction des critères décrits. Dans tous les cas, l'allure est similaire à celle obtenue avec le régulateur de courant (pic de résonance à la fréquence du réseau).

Les résultats obtenus en simulation ont validé les performances attendues. La FT du système en régulation est donnée par (3.89).

$$FT_{OT_{IG_{Pert}}(s)} = \frac{E_s}{I_g^*} = \frac{s^2 + \omega^2}{(s^2 + \omega^2) \cdot (C_{AC} \cdot s) + (C_2 \cdot s^2 + C_1 \cdot s + C_0)}$$
(3.89)

L'analyse fréquentielle de ce système montre qu'il y a une grande atténuation pour les signaux de perturbation à la fréquence du réseau (Voir §A8.3).



Figure 3.64 Réponse de la boucle de tension au point de raccordement, E, avec un IG face à un échelon de la perturbation, + 50 % P_{Nominale}

Cependant, l'atténuation des perturbations à d'autres fréquences est améliorable, surtout à haute fréquence. Dans tous les cas, les résultats obtenus en simulation montrent que le système est robuste et qu'il atténue les perturbations. La Figure 3.64 illustre la réponse du système face à une charge similaire à celle utilisée pour le PI en référentiel tournant : on y constate une durée du transitoire similaire, néanmoins, le transitoire est plus doux.

La réponse du système ne varie guère du fait d'erreurs paramétriques (\pm 50 % de la valeur nominale). La durée ainsi que le dépassement ne se voient guère modifiés.

3.4.2.3 Régulateur RST, régulation en tension

Comme dans les cas précédents, on doit d'abord numériser la FT (Voir équation 2.28). Le procédé de discrétisation est similaire à celui employé pour la régulation en courant. Pour faciliter la discrétisation du système, on a tenu compte de la résistance parallèle du condensateur (R_C). Cela fait que la fonction échantillonnée de la tension aux bornes de C_{AC} est similaire à celle du hacheur et de la régulation en courant. (Voir équation (3.90)).

$$FT_{FT_{-C}}(z) = \frac{E_i}{I_{gi}} = \frac{B_1}{z(z-a)}$$
 i =1, 2, 3. (3.90)

$$a = e^{-\frac{T_s}{R_C \cdot C_{AC}}} \qquad B_1 = (1 - a) \cdot R_C \tag{3.91}$$

L'influence des erreurs paramétriques ainsi que de la période d'échantillonnage est similaire à celle présentée pour les cas précédents.

Le mode de réglage est le même que celui employé pour la régulation en courant : On place les pôles du système en BF en fonction de l'équation (3.14) (Voir § 3.4.1.3). Egalement, les polynômes R et S sont définis en fonction de la référence et de la perturbation (Voir équation (3.62)). Pour faciliter l'utilisation du correcteur, T est égal à S. Or, les polynômes R et S sont similaires à ceux des équations (3.65) et (3.66). Le pôle multiple en BF est également le même (Voir équation (3.67)).

$$A_1R + B_1S = (z^2 + z \cdot r_0 + r_1) \cdot z \cdot (z - a) + B_1 \cdot (z^2 \cdot s_0 + z \cdot s_1 + s_2) = (z - P\hat{o}le)^4$$
(3.92)

En conséquence, la réponse fréquentielle du système est très similaire à celle déjà présentée : Elle est caractérisée par un fort pic à la fréquence souhaitée (Voir §A8.3). Le système est assez robuste face aux perturbations et face aux erreurs paramétriques. La Figure 3.65 l'illustre.



Figure 3.65 Réponse de la boucle de tension au point de raccordement, E, avec un RST face à un échelon de la perturbation, + 50 % P_{Nominale}

3.4.2.4 Conclusions

Comme dans la régulation en courant, les trois contrôles ici présentés sont bien adaptés aux besoins exigés. Le nombre d'opérations pour chaque correcteur est similaire à celui présenté dans le Tableau 3.4. Donc l'IG demeure toujours le plus simple. Cependant, sa réponse fréquentielle par rapport aux perturbations est ici plus problématique, car le système peut être connecté à des charges polluantes caractérisées par de nombreuses fréquences différentes de celle du fondamental. Par contre cet aspect n'est pas aussi problématique pour les autres contrôles, mais ils sont plus compliqués à implémenter. En outre, leur comportement face aux variations brusques de charge est moins performant et conduit à des dépassement plus importants. En définitive, un compromis en fonction des exigences simplicité / performances / robustesse sera nécessaire pour choisir le correcteur adéquat.

3.5 Résultats expérimentaux

3.5.1 Description du banc d'essais

Les correcteurs employés pour le contrôle de l'OT ont été testés expérimentalement avec un banc universel pour la distribution électrique présenté ci-dessous. Ce banc d'essais a permis de valider les contrôles théoriques relatifs à la source de courant ainsi que aux relatifs à la source de tension. Le banc d'essais a été conçu et construit pour diverses utilisations, ceci explique donc sa topologie explicitée dans l'annexe « Description du banc d'essais ».

Lors de nos essais, on n'a utilisé qu'un OT. En fonction des essais à réaliser, cet OT a été connecté à des charges passives ou au réseau électrique. Du côté continu, l'OT est connecté à une source de tension continue réglable.

La Figure 3.66 illustre la structure du banc d'essais. L'OT utilisé lors des essais est indiqué sur la figure. Le sens du flux d'énergie selon les essais est également précisé sur la figure.



Figure 3.66 Topologie de puissance complète du banc d'essais

Du fait des diverses utilisations possibles, les composants du banc d'essais ne sont pas exactement ceux employés lors des simulations précédentes lesquels correspondaient à ceux obtenus avec l'optimisation hybride. Le Tableau 3.5 présente les caractéristiques les plus importantes du banc. Une description plus détaillée du banc d'essais est présentée dans l'annexe qui y est consacré.



Figure 3.67 Banc d'essais

CHARGES	SOURCE DE TENSION	
Charge AC = résistive triphasée 4 kW _{MAX} Charge DC (Bus) = résistive	V_{Bus} maximale = 125 V I_{Charge} maximal = 10 A	
Onduleur de Tension	Controle	
$ \begin{array}{ll} L_{AC}=3 \text{ mH} & R_{AC}=0.02854 \ \Omega \\ C_{AC}=100 \ \mu\text{F} & F_{DC/AC}=10 \ \text{kHz} \\ P_{Max}=7.5 \ \text{kW} & I_{Max}=25 \ \text{A par phase} \\ V_{AC}=40 \ \text{V entre phase} \end{array} $	Fréquence d'échantillonnage = 10 kHz Capteur de courant : 5 A / 1 V Capteur de tension alternative : 25 V / 1 V Capteur de tension continue : 50 V / 1 V	

3.5.2 Régulation en courant, source de courant

Lors de ces essais, l'OT fournit son énergie à un réseau électrique. Pour pouvoir garantir un fonctionnement correct de l'OT (Voir Equations (2.17) et (A5.1)), on a dû descendre le niveau de tension du réseau à 40 V entre phases en utilisant un autotransformateur du fait que la tension de bus est limitée à 125 V par la source de tension continue réglable.

Le schéma équivalent des essais est celui illustré par la Figure 3.68.





Figure 3.68 Schéma de puissance lors des essais de régulation en courant avec consigne en puissance

Figure 3.69 Schéma de puissance lors des essais du contrôle de V_{BUS} avec l'OT

Cependant, dans les cas où l'OT asservit la tension du bus continu, on a remplacé cette source de tension par une résistance variable. Dans ce cas, l'OT fonctionne vraiment comme redresseur. Nonobstant, cela est représentatif de la réalité, car dans certains cas, l'OT doit absorber de l'énergie du réseau pour assurer une tension constante du bus.

Pour tester les correcteurs, on les a tous soumis aux mêmes essais. On a testé leurs performances et leur robustesse :

- Asservissement : Echelon de l'amplitude du courant, de 4 à 8 A_{Max}.
- **Régulation :** Echelon de 10 % de la tension de réseau.
- Erreurs paramétriques : ±50% de la valeur nominale.

Néanmoins, on ne présente que les essais les plus significatifs : ceux en asservissement. Notons que l'OT lors des essais n'est pas contrôlé en puissance mais en courant. C'est-à-dire que l'entrée représente l'amplitude du courant souhaité (Voir Figure 3.70).



Figure 3.70 Schéma de contrôle employé lors des essais

Pour faciliter la comparaison entre les résultats expérimentaux et ceux obtenus en simulation, on présente les résultats relatifs au modèle moyen, car cela permet d'avoir une courbe plus claire.

3.5.2.1 Correcteur PI dans des repères tournants, régulation en courant

Tout d'abord, lors des essais, on a noté que la tension de l'autotransformateur avait de nombreux harmoniques à basse fréquence. Ces harmoniques dus aux imperfections de l'autotransformateur engendraient d'importantes oscillations dans les repères tournants. En conséquence, on retrouvait certains de ces harmoniques dans le spectre des grandeurs régulées. Les figures suivantes le montrent.





Figure 3.74 Détail du spectre du courant, I_s

Notons que le spectre du courant présente aussi des harmoniques de découpage à haute fréquence.

Compte tenu de cela, on a intégré dans nos modèles ce réseau pollué. Les figures ci-dessous illustrent que les résultats obtenus en simulation et ceux obtenus lors des essais sont similaires. Les paramètres du régulateur PI sont une BP de 1000 rad/s et un amortissement de 0.9.

Ainsi, **ceci valide les modèles de simulation** tout en illustrant les bonnes performances du correcteur. En effet, le système atteint rapidement son régime permanent sans un transitoire brusque.

L'analyse spectrale du courant expérimental a un THD égal à 6.87, ce qui est plus élevé que la valeur idéale théorique. En tout cas, cette valeur correspond à peu prés à ce que on obtient en simulation, si l'on considère les imperfections de l'autotransformateur. De plus, il faut noter que dans ce cas le filtre de raccordement est une simple inductance. Ces essais ont permis également de constater l'influence de la MLI sur le spectre du courant, car le spectre présente des harmoniques à la fréquence de découpage comme prévue. Ainsi, cela valide l'analyse théorique présenté dans §2.2.3.



Figure 3.75 Réponse de l'axe d en asservissement : référence (bleu), simulation (rouge) et expérimental (noir)



Figure 3.76 Détail de l'axe d



référence (bleu), simulation (rouge) et expérimental (noir)



Figure 3.78 Détail de l'axe q

La Figure 3.79 et la Figure 3.80 illustrent les courants triphasés, elles confirment aussi les remarques faites précédemment sur les modèles et les performances.

Les essais en régulation ont donné aussi des résultats satisfaisants.



<u>Nota 1</u>: Les légères différences que le lecteur peut noter entre les résultats de simulations et ceux expérimentaux sont dues à la difficulté d'identifier l'instant précis de l'échelon.

<u>Nota 2 :</u> Le gain de la mesure de courant est égal à 1 V / 5 A.

3.5.2.2 Régulateur résonant, régulation en courant

Les résultats obtenus avec un régulateur résonant sont présentés par la Figure 3.81 et la Figure 3.82. Leur comparaison aux courbes obtenues en simulations valide l'analyse théorique. Il faut noter que tous ces résultats ont été réalisés avec α_{RR} égale à 4. Les différences avec les résultats sont dues aux harmoniques à basse fréquence produits par la tension délivrée par l'autotransformateur. L'augmentation de α_{RR} rend le système plus robuste par rapport aux harmoniques polluantes.



Figure 3.81 Réponse expérimentale du courant I_S avec un IG



Figure 3.82 Réponse en simulation du courant I_s avec un IG



Figure 3.83 Spectre du courant, Is

Figure 3.84 Détail du spectre

Ces résultats prouvent que la réponse du système est satisfaisante tant lors des transitoires que lors du régime permanent. D'ailleurs, ils montrent un comportement similaire à celui obtenu en simulation (Voir Figure 3.85).



Figure 3.85 Réponse avec un IG de I_{S1} : référence (rouge), simulation (bleu) et expérimental (noir)



Figure 3.86 Détail de la réponse

Comme dans les cas précédents, on retrouve dans le spectre du courant les harmoniques provoqués par la tension. Ainsi, le THD, égal à 4.42, s'avère supérieur à la valeur théorique idéale. Le comportement en régulation du correcteur est aussi correct.

3.5.2.3 Régulateur RST, régulation en courant

Le régulateur RST est similaire à celui présenté précédemment. La réponse du régulateur RST, illustrée par la Figure 3.87, est satisfaisante, car le système présente un rapide transitoire et son comportement au régime permanent est également correct. Comme dans les autres cas, les essais expérimentaux valident les résultats obtenus en simulation.



Figure 3.87 Réponse expérimentale du courant I_s avec un RST

Courant (A)



Figure 3.88 Réponse en simulation du courant I_S avec un RST



Figure 3.89 Spectre du courant Is



Les remarques sur l'analyse spectrale sont ici aussi valables. Le THD obtenu est égal à 5.26. La réponse du système en régulation est satisfaisante.







Figure 3.92 Détail de la réponse

3.5.2.4 Boucle de tension du bus continu, régulation en courant

Le régulateur PI a été calculé pour une BP égale à 100 rad/s et un amortissement unitaire. A la différence des correcteurs antérieurs, les essais pour tester le régulateur sont différents :

- Asservissement : Echelon de la tension du bus continu de 100 V à 125 V.
- **Régulation :** Echelon de charge de 46 Ω à 23 Ω .

La réponse en asservissement de ce régulateur est illustrée par la Figure 3.93. La réponse expérimentale est rapide et correspond à celle obtenue en simulation. Notons ici le léger dépassement de la référence et la variation initiale, dans le sens inverse, de la tension à cause du zéro instable en BF.

La réponse en régulation du système est présentée ci-dessous. La figure montre un comportement satisfaisant ainsi qu'une grande similitude entre les deux réponses.



Figure 3.93 Réponse de V_{BUS} en asservissement: référence (rouge), simulation (bleu) et expérimental (noir)

Figure 3.94 Détail de la réponse



Figure 3.95 Réponse de V_{BUS} en régulation : référence (rouge), simulation (bleu) et expérimental (noir)

3.5.3 Régulation en tension, source de tension

Lors de ces essais, le banc universel a été connecté comme l'illustre la Figure 3.96.



Figure 3.96 Schéma de puissance lors des essais de régulation en tension

Compte tenu du niveau de tension du bus continu, de l'inductance et de la puissance disponible, la tension maximale dans la charge a été fixée à 35 V_{Max} (Voir Equations (2.17) et A5.1). Bien que les correcteurs aient été testés en asservissement et en régulation, on ne présente que les résultats obtenus en régulation. Les conditions des essais sont :

- Asservissement : Echelon de l'amplitude de la tension, E, de 35 à 40 V_{Max} .
- **Régulation :** Echelon de 25 % de la charge.
- Erreurs paramétriques : \pm 50% de la valeur nominale.

3.5.3.1 Correcteur PI dans des repères tournants, régulation en tension

Les paramètres du PI sont similaires à ceux utilisés précédemment : BP et amortissement égales à 500 rad/s et 1 respectivement.

Les figures suivantes illustrent les résultats obtenus en simulation et expérimentalement. Ils valident les modèles de simulation et montrent un comportement satisfaisant.

Notons que les courbes expérimentales présentent de petites ondulations qui n'existent pas dans le modèle moyen. Les ondulations à haute fréquence sont provoquées par la MLI. Les ondulations basse fréquence de l'axe q peuvent être provoquées par la boucle de phase et par le couplage des axes. Dans tous les cas, le comportement est toujours similaire.





Figure 3.98 Détail de l'axe d



Figure 3.99 Réponse de l'axe q en régulation : référence (bleu), simulation (rouge) et expérimental (noir)

Figure 3.100 Détail de l'axe q

La comparaison entre les courants triphasés illustre bien la similitude entre expérience et simulation. L'analyse spectrale illustre une réponse ayant un THD correct égal à 5.5.



Figure 3.101 Réponse expérimentale des tensions E avec un PI en repère tournant



Figure 3.102 Réponse en simulation des tensions, E avec un PI en repère tournant



Figure 3.104 Détail du spectre de la tension E

Nota 1 : La gain de la mesure de tensions alternatives est égale à 1 V / 25 V.

<u>Nota 2 :</u> On rappelle que E correspond à la tension au point de raccordement.

3.5.3.2 Régulateur résonant, régulation en tension

L'IG expérimental est identique à celui présenté antérieurement. Son comportement tant en asservissement qu'en régulation a été correct lors des essais. Egalement, ces essais ont validé les modèles de simulation ; les résultats sont similaires.

Le spectre de la tension résultante est satisfaisant, c'est d'ailleurs le meilleur avec un THD égal à 3.9 (Voir Figure 3.107 et Figure 3.108).



Figure 3.107 Spectre de la tension E

Figure 3.108 Détail du spectre de la tension E

3.5.3.3 Régulateur RST, régulation en tension

Les résultats obtenus avec ce correcteur sont corrects, comme les figures Figure 3.109 et Figure 3.110 l'illustrent. Les réponses face à des variations de la perturbation et de la référence sont toujours satisfaisantes.

L'analyse spectrale de la tension a des caractéristiques similaires au cas précédents. Son THD est égal à 4.42.



Figure 3.109 Réponse expérimentale des tensions, E avec un RST



Figure 3.111 Spectre de la tension E



Figure 3.110 Réponse en simulation des tensions, E avec un RST



Figure 3.112 Détail du spectre de la tension E

3.5.4 Conclusions concernant les résultats expérimentaux

Tout d'abord, on doit signaler que ces résultats expérimentaux ont validé la théorie. Ainsi, et malgré les particularités rencontrées du banc d'essais, par exemple, tension de l'autotransformateur polluée, les résultats obtenus en simulation et dans la réalité sont similaires.

Egalement, ces résultats expérimentaux valident les différents réglages proposés pour le contrôle de l'OT tant en régulation en courant qu'en régulation en tension. Concernant la régulation en courant, on a constaté la sensibilité des correcteurs aux harmoniques. Cependant, les raisons sont diverses. Ainsi, le PI en repères tournants n'élimine pas les harmoniques, car sa boucle de phase, connue sous le nom de PLL Phase Lock Loop, se voit perturbée par ces harmoniques et donc les ordres de commande sont aussi affectés. Néanmoins, pour les autres correcteurs, le problème vient de leur capacité à éliminer des perturbations ayant une fréquence différente de celle de la référence. Ainsi, ils les atténuent, mais ne les éliminent pas. Dans tous les cas, ces correcteurs ont des paramètres à régler pour le mieux, ce qui les rend d'ailleurs très performants.

Concernant la régulation en tension, les trois régulateurs ont de bonnes performances très similaires : la tension ne se voit guère altérée par de brusques et importantes variations de la charge ni par des erreurs paramétriques. Concernant les spectres de tensions résultantes, nous notons de grandes similitudes entre les trois régulateurs. Cependant, l'IG fournit les meilleurs résultats, ceci illustre donc ses bonnes performances quand la perturbation n'a qu'une seule composante à la fréquence du fondamental.

3.6 Conclusions

Ce chapitre est consacré aux contrôles des différents convertisseurs composant la chaîne de puissance, hacheur et OT.

Premièrement, le chapitre a exposé le réglage théorique de chaque correcteur. Ces réglages établis en fonction des performances et des contraintes de stabilité, ont été validés par des résultats obtenus en simulation avec les modèles présentés dans le chapitre précédent. Ces résultats ont montré que dans la plupart des cas, les résultats sont similaires. Le choix du type de correcteur sera bien sûr le résultat d'un compromis entre performance, complexité et robustesse.

Le chapitre continue avec la présentation des résultats expérimentaux obtenus avec un banc universel d'essais pour la distribution électrique. Ils ont permis de valider les modèles utilisés ainsi que les réglages théoriques des correcteurs de l'OT.

En conclusion, ce chapitre a explicité le niveau de contrôle intermédiaire d'une IP en validant les correcteurs présentés avec des résultats obtenus en simulation et lors d'essais pratiques. Comme on l'a mentionné précédemment, ce niveau de contrôle est commandé et coordonné par le niveau supérieur de contrôle qui va faire l'objet du chapitre suivant.

<u>CHAPITRE 4</u> <u>Gestion d'energie d'un generateur a PAC</u>

Comme on l'a mentionné précédemment, la PAC est utilisée de plus en plus comme source d'énergie principale dans de nombreuses applications. Cependant, certaines contraintes technologiques limitent toujours son développement à grande échelle, même si le principal point faible demeure son coût économique élevé.

L'une de ces contraintes est la lenteur de la dynamique du générateur électrogène dont la PAC est le cœur. La PAC est incapable de satisfaire instantanément la demande en puissance de la charge. Ceci entraîne donc l'utilisation d'un ES et augmente d'autant le coût économique.

Pour pallier cette insuffisance, plusieurs options sont envisageables, citons par exemple l'optimisation de la topologie des cellules ou l'optimisation de la gestion d'énergie. Cette dernière peut consister en l'optimisation du débit du compresseur qui alimente en oxygène la PAC (compression de l'air ambiant), car il est le principal élément limitant la dynamique de la PAC.

En effet, dans des applications comme le transport ou le back up, le générateur à PAC n'utilise généralement pas de reformeur externe, puisque la quantité nécessaire d'hydrogène peut être facilement stockée. Par conséquent, ce n'est pas l'alimentation en hydrogène qui limite la dynamique du système, mais la fourniture en oxygène. Celle-ci se fait via un compresseur dont la constante de temps mécanique impose la dynamique de la PAC. En conséquence, on limite la variation du courant demandé à la PAC afin de ne pas l'endommager par manque d'oxygène.

Si l'on a recours à un ES, la taille de l'ES est alors fortement liée à la gestion optimale des flux d'énergie entre la PAC et l'ES. La maîtrise de ce flux optimal d'énergie constitue alors une autre solution. On se penchera également sur cette deuxième possibilité.

Dans la première partie de ce chapitre, on présente les différentes parties composant le contrôle du générateur et plus particulièrement celle correspondant au niveau supérieur ainsi que le dispositif de sécurité de la PAC.

Ensuite, on se focalisera sur le système de sécurité électrique de la PAC et plus particulièrement sur le contrôle du débit d'oxygène. Concernant cet aspect, on propose une méthode novatrice et originale pour contrôler le débit du compresseur en fonction du courant demandé. Ce contrôle, basé sur une simple modélisation du système, permet une amélioration significative des performances par rapport à la solution classique et par conséquent une réduction de la taille de l'ES, de son coût, de son volume et de son poids.

La deuxième partie concernera les stratégies de commande du générateur. On propose trois stratégies de commande réglées sans aucune connaissance a priori de l'application. Chacune d'entre elles repose sur un critère différent de fonctionnement. Elles présentent toutes un bon rapport complexité/performances et mettent en évidence leur importance pour le dimensionnement de l'ES.

Pour terminer, on présentera les résultats obtenus en simulation. Ces simulations, basées sur des applications réelles, ont permis de valider et comparer les stratégies de commande ainsi que l'architecture. L'analyse de ces stratégies de commande a été faite dans des conditions de fonctionnement les plus réalistes possibles.

4.1 Niveau supérieur de contrôle d'un générateur à PAC

Comme on l'a dit précédemment, le niveau supérieur de contrôle est appelé « Gestion d'énergie ». L'objectif principal de ce niveau est la gestion des énergies respectives de la PAC et de l'ES pour satisfaire les besoins de la charge du mieux et le plus sûrement possible. Son rôle est aussi de coordonner et de faire communiquer les hacheurs composant l'IP pour assurer un fonctionnement correct. Ce niveau peut se décomposer en deux parties principales :

- La stratégie de commande.
- Le système de sécurité.



Figure 4.1 Schéma du niveau de contrôle supérieur, appelé Gestion d'énergie

Ces deux parties seront donc l'objet d'analyse de ce chapitre.

Cependant, tout d'abord, on doit définir le domaine d'application du générateur à PAC à analyser et sa structure. En effet, la gestion d'énergie du générateur à PAC est fortement dépendante de sa structure, laquelle est imposée principalement par l'application choisie (Voir §1.3).

Compte tenu des analyses présentées antérieurement (Voir chapitre 1 et annexe 3), les applications choisies sont les mêmes. A partir de cela, on peut définir la structure du générateur à PAC. Les différentes parties formant cette structure sont décrites ci-dessous.

4.1.1 La PAC et ses auxiliaires

Le groupe électrogène est construit autour d'une PAC dont les caractéristiques sont similaires à celles de la PAC modélisée dans §1.4. On rappelle donc qu'il s'agit d'une PAC de type PEM de puissance maximale 120 kW. Elle est alimentée en hydrogène pur à partir de réservoirs sous-pression. Par contre, l'oxygène pris dans l'air est fourni par un compresseur.

La dynamique de la PAC est donc essentiellement **limitée par le compresseur**. Ainsi, une bonne gestion de l'énergie et de la puissance de la PAC passe nécessairement par un contrôle performant du compresseur. Le choix de ce dernier dépend de la puissance nette fournie par la PAC (Voir Figure 4.2).



Figure 4.2 PAC avec ses principaux auxiliaires

Pour l'analyse du niveau supérieur d'énergie, les modèles de simulation devront **inclure les auxiliaires du générateur** et être bien adaptés **pour de longues durées de simulation**. De ce fait, le modèle employé lors des simulations est celui dit de stationnaire incluant les principaux auxiliaires.

La Figure 4.3 illustre la consommation des auxiliaires en fonction du courant net de la PAC. Notons qu'il y a une partie de la consommation indépendante du courant correspondant principalement au système de refroidissement qui fonctionne toujours à sa puissance nominale. Tout cela a été modélisé comme une charge constante. La partie de la courbe de puissance dépendant du courant correspond à la consommation du compresseur. Il a été modélisé en tenant compte de sa structure et son contrôle.



Figure 4.3 Consommation des auxiliaires du générateur à PAC

4.1.2 Interface de puissance

L'IP employé est similaire à celui utilisée lors des simulations du chapitre 3 (Voir Figure 4.4), car c'est le plus courant pour des puissances de l'ordre de la centaine de kW.

4.1.3 Contrôle de l'interface de puissance

On a dû en premier lieu définir le schéma de contrôle de l'OT le mieux adapté aux applications sélectionnées. Compte tenu de l'ES, le contrôle de la tension du bus est toujours réalisé en utilisant le hacheur relatif à l'ES. Ainsi, l'OT dispose d'une tension de bus continu constante et peut satisfaire la demande de la charge, tandis que la PAC est contrôlée en courant en respectant ses limitations dynamiques.

On a dû choisir un correcteur pour le contrôle de chaque hacheur :

- Hacheur DC/DC élévateur de tension : Correcteur de type RST.
- Hacheur DC/DC réversible en courant : Correcteur de type P pour la boucle de courant et PI linéarisé pour la boucle de tension du bus.
- Onduleur de tension : Quand il fonctionne comme une source de courant, il reçoit la consigne en puissance et le courant est contrôlé par un correcteur de type IG. Quand il fonctionne comme une source de tension, les boucles de tension et de courant sont implémentées avec des correcteurs de type IG et P respectivement.

Le choix de ces correcteurs est basé sur ce que l'on a présenté au chapitre précédent. La Figure 4.4 illustre le schéma de contrôle employé avec la structure de l'IP.



Figure 4.4 Structure de puissance et contrôle de l'IP

4.1.4 Elément de stockage

On rappelle que le rôle de l'ES est de complémenter la puissance fournie par la PAC pour satisfaire les demandes de la charge. La PAC est une très bonne source d'énergie, mais sa réponse dynamique, comme source de puissance, est assez limitée. Or, la taille de l'ES dépend principalement de la charge, de la dynamique de la PAC et de la gestion d'énergie. Compte tenu de ces aspects, on a sélectionné dans un premier temps les technologies de stockage qui apparaissent comme les mieux adaptées à notre cas :

- La batterie au plomb : C'est une technologie utilisée depuis longtemps et elle est en théorie l'option la plus économique. Cependant, cette batterie n'est généralement pas une bonne source de puissance. De plus, sa durée de vie se voit très réduite si l'on ne respecte pas certaines contraintes de fonctionnement qui ne peuvent pas être toujours garanties dans nos cas.
- Les supercapacités : C'est une nouvelle technologie de plus en plus utilisée, mais qui reste toujours chère surtout pour des grandes puissances telles que celles qui nous intéressent. Pourtant, d'un point de vue technique, les supercapacités sont les mieux adaptées aux besoins : elles constituent de très bonnes sources de puissance et leur durée de vie ne se voit pas affectée par des décharges très importantes.

Le choix définitive entre ces deux technologies se devra faire suite à un compromis qui doit être complété par une analyse économique pour chaque application. Néanmoins, cette analyse ne faisant pas partie de nos objectifs, nous nous sommes restreints à l'évaluation des avantages et des inconvénients techniques de l'utilisation de ces deux technologies. Nous avons donc simulé et analysé les deux technologies pour chaque application. Les modèles de simulation employés sont décrits dans l'annexe 7.

4.2 Système de sécurité

Le but du système de sécurité est de **garantir que la PAC travaille toujours dans des conditions physiques de fonctionnement sûres quelle que soit la demande du client**. Pour cela, le système de sécurité peut limiter transitoirement le courant demandé à la PAC ou même arrêter le générateur.

Le système de sécurité doit donc tenir compte de l'état des grandeurs électriques ainsi que des grandeurs thermiques et chimiques de la PAC. Il pourra donc agir sur certaines d'entre elles comme par exemple le débit d'oxygène et d'hydrogène. Egalement, le système prendra en compte de nombreuses variables physiques relatives à l'IP : défaillance de l'onduleur ou du hacheur...

Dans notre cas, nous nous focaliserons sur le système de sécurité électrique concernant la PAC, car c'est ce qui est le plus intéressant. Les principales grandeurs à prendre en compte sont listées ci-dessous :

- **Température :** La PAC doit fonctionner dans une plage déterminée de température. Au régime nominal, sa température se trouve dans la plage désirée grâce au système de refroidissement. Cependant, le système peut travailler de façon transitoire en dessus de son point de fonctionnement nominal jusqu'à une valeur maximale.
- **Tension :** Si la tension de la PAC sort de la gamme de tension prévue, cela peut provoquer l'endommagement des cellules. De plus, l'EP est dimensionnée en fonction de la gamme de tension prévue.

• **Débit d'oxygène :** Cet aspect a déjà été présenté précédemment.

Dans des conditions normales de fonctionnement, le contrôle des deux premières variables (température et V_{PAC}) ne limite pas la puissance électrique disponible. En effet, la réponse dynamique du générateur ne se voit pas influencée par leur état sauf dans des cas très particuliers comme par exemple la défaillance de plusieurs cellules ou si l'on reste trop longtemps au-dessus de la puissance nominale.

Cependant, le taux d'oxygène reste la grandeur critique pour la réponse dynamique du système. Par conséquent, il sera donc l'élément déterminant dans le dimensionnement de l'ES. C'est pourquoi nos efforts ont essentiellement porté sur sa gestion et son contrôle.

Dans la plupart des cas, la limitation du débit d'oxygène consiste en une simple limitation de la dérivée du courant. La valeur de cette limitation est fonction de la constante de temps du compresseur. Evidemment, cette protection n'est pas optimale, car elle ne permet pas d'exploiter au mieux les performances du générateur. Cela entraîne donc un surdimensionnement de l'ES et un gaspillage des performances de la PAC. Pour améliorer cela, nous proposons ci-après un contrôle original du débit d'oxygène.

4.2.1.1 Méthode proposée pour le contrôle du débit du compresseur <u>Principe</u>

Le principe de notre méthode de contrôle et de sécurité du taux d'oxygène s'appuie sur la modélisation des phénomènes qui entrent en jeu dans la consommation et l'alimentation en oxygène (Voir Figure 4.5).



Figure 4.5 Schéma du contrôle du taux d'oxygène

Kp1 et Kp2 sont des paramètres de réglage du contrôle du taux d'oxygène proposé.

Le système reçoit comme information le courant de référence calculé par le niveau supérieur de contrôle ainsi que le courant réel dans la PAC au même instant. Avec ces variables, il calcule le courant de référence qui sera envoyé à la PAC. Ce courant peut être égal ou inférieur à l'intensité calculée par le niveau supérieur. En effet, si nécessaire, le système limite le courant calculé par le niveau supérieur en fonction de la dérivée maximale autorisée comme dans le système classique, toutefois, cette dernière pourra être plus importante. Ce courant dépend aussi d'un signal proportionnel au taux d'oxygène.

Si l'image du taux d'oxygène dans la PAC atteint un seuil qui représente le minimum d'oxygène nécessaire dans les cellules, le signal d'alarme se déclenche et le système s'arrête. En réalité, le contrôle empêche que ce seuil soit atteint en modifiant la référence du compresseur afin de limiter le courant dans le hacheur.

En conséquence, le système détermine également la référence du compresseur. Cette référence est calculée pour améliorer sa dynamique en fonction du maximum entre la demande instantanée et l'estimation de la demande (Voir Equation (4.1) et Figure 4.5).

$$I_{Comp_Est}(k) = I_{\text{Re}f_PAC}(k) + \left(I_{\text{Re}f_PAC}(k) - I_{\text{Re}f_PAC}(k-1)\right) = 2 \cdot I_{\text{Re}f_PAC}(k) - I_{\text{Re}f_PAC}(k-1)$$
(4.1)

A cette valeur, on additionne un terme dépendant du taux d'oxygène. Le rôle de ce terme sera expliqué ultérieurement.

Modélisation de la consommation d'oxygène

Précisons tout d'abord l'expression donnant le volume total d'oxygène consommé (V_{T_O2}) en fonction du courant demandé :

$$V_{T_{-}O_{2}} = \frac{N_{C} \cdot I_{PAC} \cdot V_{O_{2}}}{4 \cdot F}$$
(4.2)

Où : V₀₂ est le volume d'un mol d'oxygène dans les conditions physiques de fonctionnement.

L'expression de la variation du pourcentage d'oxygène ($X_{\%02}$) en sortie de PAC en fonction du temps comporte deux termes :

- Le premier représente le bilan entrée / sortie en pourcentage d'oxygène. On suppose que le taux d'oxygène dans l'air est de 21 %.
- Le deuxième correspond au pourcentage d'oxygène consommé en fonction du courant demandé.

Avec cela, on peut établir l'équation suivante qui décrit l'évolution de X_{%O2}.

$$\frac{dX_{\%O2}}{dt} = \frac{Q_{Air}}{Vol_{PAC}} \left(\frac{21}{100} - X_{\%O2}\right) - \frac{N_C \cdot I_{PAC}}{4 \cdot F \cdot V_{PAC}} V_{Air} \cdot (1 - X_{\%O2})$$
(4.3)

Avec :

 Q_{Air} Débit d'air fourni par le compresseur, m³/s.

Vol_{PAC} Volume des cellules, m³.

V_{Air} Volume d'une mole d'air dans les conditions de fonctionnement, l.

Au régime permanent, la valeur de Q_{Air} fournie par le compresseur est égale au produit du volume d'oxygène consommé par le facteur de stoechiométrie (S_{Stc}).

$$Q_{Air} = V_{T_{O_2}} \cdot S_{Stc} = \frac{N_C \cdot I_{PAC} \cdot V_{O2}}{4 \cdot F} \cdot S_{Stc}$$

$$(4.4)$$

Cependant, en régime transitoire, cette relation n'est plus valable. Ainsi, la Figure 4.6 illustre la variation de $X_{\text{%O2}}$ en fonction du temps suite à un échelon de courant en supposant que le débit d'air fourni à la PAC reste toujours constant (Voir Equation (4.3)).

En utilisant cette réponse, on peut donc modéliser l'évolution de $X_{\%O2}$ par une fonction de transfert d'ordre 1. Le gain de cette fonction, K_{C_PAC} , sera adapté pour être intégré dans le système de sécurité.

$$F_{Cellule_PAC}(s) = \frac{X_{\%O_2}}{\Delta I} = \frac{K_{C_PAC}}{s \cdot \varsigma_{Cel_PAC} + 1}$$
(4.5)

Où ζ_{Cel_PAC} est la constante de temps relative à la consommation d'oxygène.



Figure 4.6 Variation de $X_{\%02}$ face à un échelon de courant positif

Modélisation du compresseur

Le modèle du compresseur employé par le système de sécurité n'est pas exactement le même que celui employé dans la modélisation de la PAC. En effet, pour le système de sécurité, le compresseur avec sa commande est modélisé par une simple FT déterminée en fonction de sont temps de réponse.

Le débit d'air injecté par le compresseur à la PAC dépend de sa vitesse de rotation, comme l'équation (4.6) l'illustre.

$$Q_{Air} = V_{O_2\Omega} \cdot \delta_{Air} \cdot \Omega_C \cdot \eta_{Comp} \tag{4.6}$$

Avec :

 $V_{O2\Omega}$ Volume d'air compressé en m³ par radian

 δ_{AIR} Densité de l'air en kg/m³.

 Ω_C Vitesse de rotation du compresseur en rad/s.

 η_{Comp} Rendement volumique du compresseur en m³/kg.

La référence de vitesse du compresseur est définie en fonction du courant demandé à la PAC. Or, il faut modéliser l'évolution de la vitesse du compresseur en fonction du courant de la PAC pour ainsi connaître l'image de l'oxygène fourni à la PAC.

Dans certains cas, la réponse en vitesse du système présente un dépassement face à des variations brusques de la référence [FEBUSS]. Cela pourrait donc nous conduire à une modélisation basée sur une FT du deuxième ordre. Cependant, le paramètre déterminant pour le système de sécurité est le temps nécessaire pour atteindre le régime permanent. Donc nous modéliserons notre phénomène par un système du premier ordre avec un gain unitaire conservateur. Ceci nous permet de simplifier le modèle : une FT du premier ordre suffit.

$$F_{Comp}(s) = \frac{1}{s \cdot \varsigma_{Comp} + 1} \tag{4.7}$$

 $O\dot{u}$: ζ_{Comp} est la constante de temps de sécurité du compresseur et de sa commande.

<u>Réglage</u>

A la différence du système de sécurité classique qui n'a qu'un seul paramètre à régler (la limitation de la variation de courant), le système de sécurité proposé ici dispose de **trois** paramètres :

- La variation maximale du courant, Lim_Pente
- Kp₁
- Kp₂

Bien qu'il faille régler ces paramètres ensemble pour assurer un bon fonctionnement, leur rôle respectif est complètement différent. On présentera donc d'abord les critères déterminant de chacun pour ensuite analyser l'ensemble.

Dans un premier temps, **la pente maximale du courant** doit être fixée en fonction du temps de réponse du compresseur, car c'est l'élément le plus lent. Ainsi, on fixe la dérivée maximale possible (Lim_Pente) en fonction de l'équation (4.8). En sachant que ce contrôle sera implémenté avec un automate, la valeur du paramètre (Pente_{Aut}) à introduire dans l'automate peut s'écrire en fonction du cycle d'automate ($T_{Automate}$).

$$Lim_Pente = Pente_{Aut} \cdot T_{Automate} = \frac{I_{MAX_PAC}}{3 \cdot \varsigma_{Comp}}$$
(4.8)

 $O\dot{u}$: I_{MAX_PAC} est le courant maximal que la PAC peut fournir.

Le rôle de Kp₁ est de limiter le courant demandé à la PAC en fonction d'une image du taux d'oxygène, $X_{\%O2}$ (Voir Figure 4.5). Pour obtenir une réponse rapide du système, Kp₁ doit limiter le moins possible la référence envoyée à la PAC. On choisit a priori une valeur faible pour Kp₁. Cependant, Kp1 est le premier paramètre à intervenir face à une variation de $X_{\%O2}$, il faut donc une valeur élevée de Kp₁; il y a donc un compromis à faire. Pour éviter des instabilités lors de brusques diminutions du courant, la valeur de Kp1 doit respecter (4.9).

$$Kp1 < \frac{Pente_{Aut} \cdot T_{Automate}}{X_{\%O2_Lim}}$$
(4.9)

Où : X_{%O2_Lim} est la valeur maximale du taux d'oxygène en sortie.

Cette valeur pourra être atteinte en régime permanent sans endommager la PAC, car elle est inférieure à la limite maximale qui conduit à un arrêt immédiat du système.

La fonction de Kp₂ est d'augmenter la référence envoyée au compresseur, s'il y a un déficit d'oxygène dans la PAC (Voir Figure 4.5). Cela ne change pas le comportement au régime permanent du système, mais permet d'obtenir une augmentation plus rapide du débit d'oxygène fourni. Son influence sur le système se traduit par la FT reliant la consigne du compresseur et $X_{\%02}$, équation (4.10) obtenue a partir du schéma de puissance (Voir Figure 4.5).

$$FT_{BF_X}(s) = \frac{s \cdot \varsigma_{Comp}}{s^2 + \left(\frac{1}{\varsigma_{Comp}} + \frac{1}{\varsigma_{Cel_PAC}}\right) \cdot s + \left(\frac{Kp + 1}{\varsigma_{Comp} \cdot \varsigma_{Cel_PAC}}\right)} = \frac{s}{s^2 + 2 \cdot \varsigma \cdot \omega_n \cdot s + \omega_n^2}$$
(4.10)

$$\omega_n^2 = \frac{Kp2 + 1}{\varsigma_{Comp} \cdot \varsigma_{Cel_PAC}} \qquad \qquad \varsigma = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\varsigma_{Comp} \cdot \varsigma_{Cel_PAC}}{Kp2 + 1}} \cdot \left(\frac{1}{\varsigma_{Cel_PAC}} + \frac{1}{\varsigma_{Comp}}\right) \qquad (4.11)$$

Avec ces équations, on constate qu'une augmentation de Kp_2 accélère le système, ce qui par conséquent, évite une diminution dangereuse du taux d'oxygène. Cependant une valeur trop élevée de Kp_2 provoque des oscillations indésirables et réduit le pic initial de la référence envoyée au compresseur. La Figure 4.7 illustre ce point. En conséquence, Kp_2 sera aussi le résultat d'un compromis.


Figure 4.7 Influence de Kp2 sur la référence du compresseur face à un échelon unitaire de X_{%02}

Finalement, nous choisissons pour Kp_1 et Kp_2 des valeurs faibles pour garantir la stabilité de l'ensemble ES+PAC : elles sont bien adaptées aux applications pour lesquelles la demande de puissance oscille énormément et rapidement, car elles n'engendrent pas d'oscillations additionnelles (Voir Figure 4.7 et Equation (4.9)).

De plus, les valeurs retenues garantissent une marge de sécurité de 10 % par rapport au seuil d'alarme dans les conditions les plus défavorables.

<u>Résultats</u>

En tenant compte des critères exposés, les valeurs des paramètres du système choisies sont présentées dans le Tableau 4.1. Ces valeurs sont inspirées de [FEBUSS]. Dans ce même tableau, on présente les paramètres utilisés pour le réglage. Leurs valeurs ont été validées en simulation.

PARAMETRES DU SYSTEME					
$T_{Automate} = 80 \text{ ms}$		Seuil d'alarme	= 10		
$\zeta_{\text{Cel}_{PAC}} = 0.3 \text{ s} \qquad \qquad \zeta_{\text{Comp}} = 0.6 \text{ s}$					
PARAMETRES A REGLER					
Lim_Pente = 165 A/s	Kp1 = 2.2		Kp2 = 2		

Tableau 4.1 Paramètres assurant un taux d'oxygène correct ainsi que le contrôle du compresseur

Notons que la pente maximale finale est égale à celle définie par l'équation (4.8) : égale à la réponse maximale du compresseur. Cela est possible grâce à la prédiction de la référence et à l'action de Kp₂ qui augmente la référence du compresseur en fonction de X_{%O2}. On pourrait encore augmenter la dynamique mais cela impliquerait une perte de stabilité importante compte tenu de la valeur élevée de T_{Automate}.

Pour illustrer les performances du système, on présente quelques résultats obtenus en simulation (Voir Figure 4.8 et **Figure 4.9**). Ces résultats sont comparés à ceux obtenus avec un système classique de sécurité (limitation de la pente uniquement, fixée à la moitié : 82.5 A/s).

Il faut noter que la référence la plus problématique n'est pas un échelon mais une pente égale à la pente maximale du système, Lim_Pente.



Figure 4.8 Courants fournis par la PAC pour une référence en pente égale à Lim_Pente

Figure 4.9 Image du taux d'oxygène dans la PAC pour une référence en pente égale à Lim_Pente

Ces courbes montrent que le système proposé est beaucoup plus performant que celui dit classique : il est deux fois plus rapide. De plus, le niveau d'oxygène reste toujours dans le gabarit de sécurité, même avec une garde de sécurité de 10 %. Il est à noter que le contrôle classique déclencherait le signal d'alarme.

Conclusions

Le contrôle proposé permet de **mieux exploiter les performances dynamiques du compresseur.** Ceci autorise donc une valeur supérieure de limitation en pente à celle du système classique et par conséquent une réponse plus rapide du générateur. Les paramètres Kp_1 et Kp_2 dont les valeurs dépendent principalement des FT caractérisant le système et du temps du cycle d'automate, jouent un rôle essentiel pour fixer la dynamique maximale de la PAC : leurs valeurs résultent d'un compromis entre la stabilité, la rapidité et la sécurité du système.

On peut remarquer que la mise en œuvre de ce schéma n'exige pas un matériel spécifique, un simple automate suffit. La seule contrainte est la nécessité de connaître le système afin de déterminer les différentes FT évoquées. Néanmoins, cette modélisation n'exige pas une connaissance trop approfondie du système.

4.3 Stratégie de commande

La stratégie de commande génère la référence de la PAC qui sera envoyée au système de sécurité. Il réalise la répartition de l'énergie demandée entre la PAC et l'ES. Dans la plupart des cas, le contrôle utilise principalement deux données externes :

- La puissance demandée
- L'état de charge de l'ES

La conception de l'algorithme prend en compte de nombreux critères de fonctionnement dont les principaux sont listés :

• Le mode de fonctionnement de la PAC. La référence qui lui est fournie ne doit pas provoquer une perte de performances ou une détérioration de ses caractéristiques, comme par exemple la réduction de la durée de vie.

- Le dimensionnement de l'ES. La gestion d'énergie doit faire en sorte de diminuer les appels de puissance et d'énergie de l'ES pour ainsi réduire sa taille.
- Le mode de fonctionnement de l'ES. Certains critères concernant le mode de fonctionnement de l'ES doivent être pris en compte pour ne pas dégrader ses caractéristiques.
- La réduction de la consommation d'hydrogène. Le contrôle doit faire travailler la PAC dans la gamme de puissance où la consommation est optimale.
- Le rendement énergétique. Le système doit fonctionner dans la gamme des puissances où le rendement énergétique est maximal.
- L'utilisation pour diverses applications. Malgré les différences qu'il peut y avoir entre elles, la stratégie de gestion d'énergie doit pouvoir être valable et transposable pour une gamme d'applications la plus large possible : bus, tramway, back-up, génération d'énergie, charge isolée...

En définitive, les critères à retenir sont nombreux et parfois contradictoires. Par conséquent, **la stratégie de commande sera le résultat d'un compromis** qui dépend la plupart du temps de l'application choisie. Malgré tout, les critères les plus importants sont généralement :

- Le dimensionnement en puissance et en énergie de l'ES
- La consommation d'hydrogène
- Le rendement moyen du système

Nos travaux porteront sur ces trois aspects.

Actuellement, de nombreuses études ont déjà été menées dans le domaine des systèmes hybrides, plus particulièrement concernant les véhicules électriques : [Pag-99][And-01][Nap-01][Can-02] entre autres. Il existe donc une vaste gamme de stratégies de commande : réglage optimal des paramètres de contrôle pour une application particulière et connue, minimisation de la consommation sans aucune connaissance a priori, optimisation multi-objectifs...

Néanmoins, la plupart de ces stratégies sont développées et ajustées pour des applications très particulières et connues a priori. Or, elles ne sont pas bien adaptées aux problèmes spécifiques de la PAC. De plus, leurs résultats sont fortement dépendants de l'application choisie. Egalement, du fait de leur complexité mathématique, leur implémentation physique exige souvent un matériel spécifique.

En conséquence, nous présentons **trois stratégies de commande** qui ont un bon rapport performances/simplicité. Chacune d'elles se focalise sur un aspect en particulier parmi ceux mentionnés précédemment. Même si toutes sont facilement implémentables grâce à leur simplicité, leur nature et leur principe de fonctionnement sont très différents. Elles sont listées ci-dessous :

- **Optimisation de la consommation d'hydrogène** par une méthode déterministe sans aucune connaissance a priori de l'application.
- Stratégie basée sur la caractéristique Rendement/Courant d'une PAC.
- Stratégie utilisant des régulateurs classiques.

Notons que dans tous les cas, on a été obligé de modifier la stratégie de commande pour toujours assurer un état de charge de l'ES correct. En effet, les algorithmes n'optimisent qu'un aspect sans tenir compte de l'état de charge de l'ES. Il faut donc modifier la stratégie en réalisant un compromis. De ce fait, toutes les stratégies comprennent deux parties :

- Contrôle optimal.
- Contrôle de l'état de charge.

Les résultats obtenus en simulation avec ces trois stratégies sont présentés dans le point suivant. Ces simulations sont faites à partir d'applications réelles du domaine du transport ou du stationnaire.

4.3.1.1 Optimisation de la consommation

Cette stratégie est inspirée des précédents travaux effectués au LEG [Can-02] et aussi de [Pag-02]. Le but de ce contrôle est de **réduire au maximum la consommation d'hydrogène** du générateur (E_{H2} en gr/s) calculée avec l'équation (4.12). Son principe se base sur la répartition optimale de la puissance demandée entre la PAC et l'ES à chaque instant t, tout en sachant que le bilan énergétique de l'ES doit être nul.

$$E_{H2} = \frac{N_C \cdot I_{PAC} \cdot M_{H2}}{2 \cdot F} \tag{4.12}$$

Où : M_{H2} est la masse molaire du dihydrogène (2 g/mol)

Pour obtenir la consommation optimale globale ($E_{H2_Optimal}$), on optimise donc la consommation à chaque instant, car la demande en énergie n'est pas connue a priori. Ainsi, le problème d'optimisation s'écrit sous la forme (4.13).

$$E_{H2_Optimal} = Opt\{E_{H2_t0}, E_{H2_{t1}}, E_{H2_{t2}}...\} = Opt\{E_{H2_{t0}}\} + Opt\{E_{H2_{t1}}\} + Opt\{E_{H2_{t2}}\} + ...$$
(4.13)

Ce contrôle se base sur ces deux éléments :

- Une méthode d'optimisation déterministe : La consommation est optimisée par une méthode déterministe basée sur l'évolution du gradient de la consommation. Cette méthode a été implémentée sous Matlab avec la fonction FMINCON.
- La consommation équivalente : La consommation totale à l'instant t est donnée par la consommation instantanée de la PAC à laquelle on ajoute la consommation d'énergie que la PAC devra fournir pour compenser la différence entre la demande et la puissance de PAC qui a été fournie ou absorbée par l'ES [Can-02][Pag-02].

En intégrant cette dernière considération qui est la clé de l'optimisation, on peut écrire la consommation globale (E_{H2}_{Equi}) sous la forme (4.14). Notons que cette consommation peut conduire la PAC à fournir une puissance instantanée (P_{PAC}) plus élevée que celle demandée (P_{Dem}). En effet, ce contrôle fait travailler la PAC au point de fonctionnement où sa consommation est minimale.

$$Valo_{Pti} = E_{H2_Equi} = E_{H2}(P_{PAC}) + \frac{E_{H2}(P_{PAC_Moy}) \cdot (P_{Dem} - P_{PAC})}{\eta_{ES}} + \frac{P_{PAC_Moy}}{P_{PAC_Moy}}$$
(4.14)

Avec

Val_{Opti} Valeur à optimiser par la méthode déterministe.

 $E_{H2}(P_X)$ Consommation totale en hydrogène pour la puissance P_X en g/s.

 $\begin{array}{lll} P_{PAC_Moy} & Puissance à laquelle la PAC compense l'énergie fournie ou absorbée par l'ES en \\ & W. \end{array}$

 η_{ES} Rendement énergétique de l'ES.

Cependant, l'équation (4.14) telle qu'elle a été présentée, nous conduit toujours au même point de fonctionnement qui dépend de la puissance moyenne (P_{PAC_Moy}). Cela entraîne une mauvaise gestion de l'ES.

La Figure 4.10 l'illustre: l'optimum P_{PAC} ne varie pas même si la demande change. Cela est dû au fait que le temps pour recharger l'ES n'est pas limité, car il est inconnu. Pour résoudre ce problème, ce contrôle doit toujours tenir compte de l'état de charge de l'ES (Etat_{t=i}).



Figure 4.10 Consommation équivalente du générateur (P_{PAC_Moy} = 30 kW)

Compte tenu de cela, l'équation (4.14) devient :

$$Val_{Opti} = E_{H2_Equi} + k_e \cdot \frac{Etat_{t=i}}{Etat_{t=0}} \cdot \frac{(P_{Dem} - P_{PAC})}{P_{ES_Moy}}$$
(4.15)

 $O\dot{u}$: Etat_{t=0} est l'état de charge de l'ES au début et k_e est un paramètre de réglage de l'état de charge. P_{ES Moy} est la puissance moyenne que l'ES peut fournir.

Notons que l'état de charge est multiplié par la puissance à fournir par l'ES. Cela vient du fait que l'état de charge est une constante lors du procédé d'optimisation et elle ne se voit pas affectée par la valeur de P_{PAC} que la stratégie va déterminer. Néanmoins, en faisant ce produit (Voir Equation (4.15)), on a créé un terme dépendant de l'état de charge : il est positif si la puissance à délivrer par l'ES ne compense pas l'état de charge. Il devient négatif dans le cas contraire. Le « poids » de ce terme dans l'équation est défini par k_e qui a été choisi empiriquement.

Dans certaines méthodes, la « correction » de l'état de charge se fait une fois l'optimum déjà obtenu. Cependant, cela ne permet pas d'assurer que le point de fonctionnement est optimal. L'inclusion de ce terme lors du processus nous rapproche du point optimal global.



Figure 4.11 Schéma de la stratégie d'optimisation de la consommation

De plus, à la différence des travaux précédents, le terme de la puissance moyenne est calculé en fonction de l'évolution de la puissance demandée. Dans [Can-02], ce terme était défini et

fixé a priori, ce qui rendait le contrôle fortement dépendant de ce paramètre, calculé pour chaque application en particulier. Dans notre cas, la puissance moyenne est calculée à l'aide d'un filtre dont l'entrée est la demande instantanée (Voir Figure 4.11).

4.3.1.2 Stratégie basée sur la caractéristique Rendement/Courant

L'objectif de ce contrôle est de faire en sorte que le générateur à PAC **travaille au point de rendement maximal**. Pour cela, on se base sur l'évolution des dérivées du rendement et du courant de la PAC (Voir Figure 4.12). Cette optimisation du rendement constitue **une autre manière d'optimiser la consommation d'hydrogèn**e. Son avantage par rapport au cas précédent est sa simplicité ; il n'y a pas besoin d'implémenter un algorithme d'optimisation. Par contre, l'évaluation de l'hydrogène consommé n'est pas autant précise.

Cette stratégie avait été développée dans un premier temps pour des applications photovoltaïques en tant que contrôle extrémal du point de fonctionnement en se basant sur la relation puissance/courant [Val-01]. Cependant, ce contrôle a pu être facilement applicable à un générateur à PAC du fait de la similitude des deux relations.



Figure 4.12 Rendement de la PAC

 $O\dot{u}$: η_{PAC} est le rendement instantané de la PAC défini par l'équation (1.15).

Le mode de fonctionnement de cette stratégie repose sur un traitement combinatoire des signes des dérivées du rendement et du courant. Le Tableau 4.2 l'illustre. En fonction des variations du courant et du rendement, on augmente ou on diminue la référence du courant de la PAC dans une fourchette donnée de manière à demeurer sur l'extremum.



Figure 4.13 Stratégie de commande optimisant le rendement

Cette stratégie s'avère très robuste, de plus, elle ne fait pas appel à la modélisation des pertes, ni même à celle du générateur à PAC. Par contre, elle peut présenter quelques problèmes au niveau de la précision, si la courbe du rendement est très plate : on peut avoir des oscillations

indésirables, car la précision du contrôle dépend de la valeur de la fourchette ; plus la fourchette est petite, plus la précision augmente mais alors le système se voit très ralenti. Dans notre cas, le compromis retenu conduit à une fourchette de 3 A.

Pour s'assurer que l'ES ne se décharge pas, un terme dépendant de son état de charge a été ajouté à la référence envoyée à la PAC. Ce terme peut être non-linéaire (arrivé à un état déterminé, la référence est imposée) ou linéaire (proportionnelle à l'état de charge). Dans notre cas, on a choisi une variation proportionnelle, car c'est elle qui a donné les meilleurs résultats. Le réglage a été réalisé de manière empirique (Voir Figure 4.13).

4.3.1.3 Stratégie utilisant des régulateurs classiques

Dans le cadre de la thèse, une autre proposition de stratégie a été développée. Elle s'inspire des contrôles classiques, dits P et PI. Son but principal est de **réduire au minimum la taille de l'ES, en terme de puissance ainsi que d'énergie**. Pour cela, le contrôle se sert d'un signal proportionnel à l'état de charge de l'ES par rapport au point d'équilibre souhaité. Cela en effet revient à appliquer un régulateur proportionnel (Voir Figure 4.14). Pour améliorer la dynamique, la référence de la PAC dépend aussi de la puissance instantanée fournie par la batterie.



Figure 4.14 Stratégie de commande utilisant des régulateurs classiques

Les principaux atouts de ce contrôle sont leur simplicité et la taille réduite de l'ES ; il exploite la PAC au maximum de ses capacités comme source de puissance. En plus, il ne requiert pas de connaissance a priori du système physique, ce qui facilite énormément son utilisation et son utilisation pour d'autres applications.

Par contre, ce contrôle **oblige la PAC à suivre toutes les variations de la charge** de manière « instantanée ». Cela pourrait affecter la durée de vie de la PAC à cause des variations de la référence en permanence. Pour atténuer ce problème, on peut éventuellement envisager de filtrer la demande du client (Voir Figure 4.14). Cependant, ceci implique une augmentation des besoins pour l'ES, notamment au niveau énergétique.

Dans notre cas, on n'a pas employé de filtre et les paramètres pour assurer un état de charge correct de l'ES ont été calculés empiriquement.

4.4 Applications

Les divers objectifs de ces simulations sont les suivants :

- Illustrer le fonctionnement complet d'un générateur à PAC.
- Tester et valider les stratégies de commande proposées.

- Comparer les performances des stratégies de commande.
- Evaluer le niveau d'adaptation des contrôles aux diverses applications.
- Dimensionner l'ES.
- Comparer les différentes technologies existantes de l'ES pour un générateur à PAC.

Pour ces différentes analyses, on a choisi diverses applications. Elles ont été sélectionnées en fonction des analyses réalisées antérieurement (Voir §1.3). Elles sont rappelées ci-dessous :

- **Domaine transport :** Tramway et bus urbain.
- **Domaine stationnaire :** Source de secours d'un bâtiment.

Tous les modèles de ces charges sont basés sur des courbes réelles [FEBUSS]. Du fait des temps de calcul assez importants, on s'est intéressé uniquement à la période la plus critique pour chaque charge dont la durée a été fixée à 500 s.

Comme on l'a dit précédemment, le dimensionnement de l'ES dépend du type de commande. Cependant, pour tester la commande, on a besoin de connaître l'ES. Pour résoudre cela, on a dimensionné initialement l'ES utilisant un modèle simplifié du système. Cela a donné une première valeur pour l'ES qui a permis la simulation de modèles plus compliqués. Les premiers dimensionnements sont donnés ci-dessous.

Puissance	134 kW	- 114 kW
Energie	3000 kJ	- 1200 kJ

Tableau 4.3 Paramètres initiaux de l'ES

Afin de faciliter la compréhension des résultats, on présente pour chaque application les courbes obtenues avec une seule stratégie. Les résultats des autres stratégies pour la même application sont synthétisés dans un tableau. Notons que tous les résultats présentés ont été obtenus avec des supercapacités comme ES.

Les phases de démarrage et d'arrêt de la PAC ne font pas l'objet des nos simulations. On considère que les conditions physiques de la PAC au début des simulations sont à leurs valeurs nominales. On suppose également que la PAC n'est pas arrêtée, même si sa référence est égale à zéro. Cela est justifié, car dans la réalité, la PAC est rarement redémarrée ; elle est mise dans le mode dit stand-by. Par conséquent, on se focalise sur son fonctionnement en régime permanent.

Compte tenu qu'il s'agit de trois stratégies de contrôle réglées sans aucune connaissance à priori de l'application, il n'est pas garanti que l'état de charge de l'ES à la fin de la simulation soit le même que celui au début : le réglage n'est pas adapté à une demande en particulier. De plus, ces mêmes stratégies doivent être valables pour des applications très diverses. On a décidé de tester les contrôles de cette manière, car ces conditions de fonctionnement sont plus proches d'une situation réelle où l'on ne connaît pas la demande a priori, ni le temps de fonctionnement.

Pourtant, cette différence de **l'état final de l'ES** empêche la comparaison de la consommation d'hydrogène. Pour corriger cet aspect, on a calculé la quantité d'hydrogène et le temps dont le générateur aurait besoin pour corriger l'état final en fonctionnant à une puissance égale à 50 kW. On choisit cette valeur, parce que la puissance optimale de la PAC est supérieure à la puissance que l'ES employé peut absorber dans certaines applications. A 50 kW, la PAC absorbe 0.785 g/s.

4.4.1 Tramway

La structure du tramway simulée est celle illustrée par la figure 1.18. Dans ces simulations, on n'analyse la demande que d'un seul générateur à PAC (Voir Tableau 4.4), car il peut exister plusieurs générateurs embarqués dans le tramway en fonction de sa taille. On considère que la répartition de la charge est équilibrée [FEBUSS]. Notons le taux d'hybridation élevé du générateur (Pic de puissance maximale / Puissance moyenne) dû à l'énorme quantité d'énergie à récupérer lors des freinages.

Puissance moyenne	70 kW
Pic de puissance maximale	200 kW
Pic de récupération	115 kW

Tableau 4.4 Principaux paramètres de l'application tramway

Montrons tout d'abord l'importance de la correction de l'état de charge avec les figures suivantes. Pour cela, on a choisi la stratégie optimisant la consommation d'hydrogène. On a simulé une partie du parcours du tramway avec et sans correction de l'état de charge.



Figure 4.15 Comparaison des résultats des stratégies avec et sans correction de l'état de charge

On note que l'ES fournit ou absorbe, selon le cas, toutes les brusques variations de charge que la PAC ne peut assurer ; ceci se produisant dans tous les cas. Néanmoins, le système tenant compte de l'état de charge présente plus de sensibilité face aux variations de la charge, car cela implique des modifications de l'état de charge de l'ES.

L'état final de l'ES ainsi que sa taille sont donc influencés par la stratégie choisie. Les figures et le Tableau 4.5 le montrent. Notons que dans les deux cas, l'état final de l'ES est loin de l'équilibre. Cela est dû en grande partie au fait que la demande est maximum lors de l'arrêt de la simulation. Malgré tout, le système tenant compte de l'état de charge est le mieux adapté.





Figure 4.16 Sollicitation des supercapacités sans tenir compte de l'état de charge

Figure 4.17 Sollicitation des supercapacités en tenant compte de l'état de charge

	H ₂ consommé	Puissance ES	Energie ES	Etat final
Sans correction de l'état de charge	190 gr	+140 kW -160 kW	3492 kJ -240 kJ	3088 kJ
Avec correction de l'état de charge	242 gr	+119 kW -118 kW	1833 kJ -650 kJ	1412 kJ

 Tableau 4.5 Comparaison des résultats des simulation avec et sans correction de l'état de charge

Ces résultats montrent donc que la correction de l'état de charge modifie notablement les résultats et le comportement du générateur. En fonction du poids octroyé à l'état de charge dans la stratégie de commande, le critère de la stratégie est plus ou moins optimisé. Dans nos simulations, on a essayé de trouver un compromis entre ces deux aspects.

Les résultats sont présentés dans le Tableau 4.6. Ils montrent comment chaque contrôle assure les meilleures performances suivant le critère souhaité. Par contre, cette performance se « paye » par une dégradation des performances relatives aux autres critères. Cela peut conduire d'ailleurs à un état de décharge de l'ES.

Stratégie de	Evaluation	H_2	Etat final	ES	
contrôle	η*	consommé	Etat IIIai	Energie	Puissance
Optimisation de la consommation	1.277	558.9 gr (558.6 gr)	-21 kJ (-0.32 gr, -0.42 s)	2091 kJ -2141 kJ	189 kW -200 kW
Rendement	1.371	590 gr (582.1 gr)	-500 kJ (-7.85 gr, -10 s)	2573 kJ -2125 kJ	165 kW -200 kW
Régulateurs classiques	1.169	638.7 gr (638.8 gr)	3 kJ (0.047gr, 0.06 s)	1643 kJ -383 kW	114 kW -195 kW

Tableau 4.6 Résultats de l'application tramway

* Le rendement est défini par rapport à l'énergie produite par la PAC en kJ en fonction de l'équation (4.16). La valeur de ce paramètre ne peut être utilisée que comme une valeur relative par rapport aux autres valeurs obtenues avec les autres stratégies de commande.

$$\frac{\langle \eta_{PAC} \rangle}{W_{PAC}} = \frac{K \cdot \int_0^t \eta_{PAC}(t) \cdot dt}{T_{Sim} \cdot W_{PAC}}$$
(4.16)

Où T_{Sim} est le temps de simulation, 500 s, et K est une constante arbitraire égale à 5 10^5 . Le but de paramètre d'obtenir des valeurs autour de l'unité pour nos cas.

Les résultats obtenus avec la stratégie d'optimisation de la consommation d'hydrogène sont illustrés par les figures suivantes. On constate que la consommation de la PAC oscille bien autour de son point de consommation minimale selon l'état de l'ES. Elle n'essaie donc jamais de suivre la demande instantanément. De ce fait, la taille de l'ES est très importante, mais par contre, la consommation est optimisée.



Figure 4.18 Sollicitation des supercapacités avec « optimisation de la consommation » (Tramway)





4.4.2 Bus urbain

Pour cette application, la structure est celle présentée sur la figure 1.19. Dans ce cas, la charge est moins importante que celle du tramway. Grâce à cela, dans la réalité, on n'utilise qu'un seul générateur. Les caractéristiques de la demande du bus urbain à simuler sont listées cidessous.

Puissance moyenne	59 kW
Pic de puissance maximale	169 kW
Pic de récupération	60 kW

Tableau 4.7 Principaux paramètres de l'application bus urbain

Stratégie de	Evaluation	H_2	Etat final	ES	
contrôle	η	consommé	consommé		Puissance
Optimisation de la consommation	1.518	496.6 gr (537.3 gr)	2598 kJ (40.7 gr, 51.9 s)	3384 kJ -269 kJ	126 kW -144 kW
Rendement	1.521	517.6 gr (536.6 gr)	1230 kJ (19.3gr, 24.6 s)	2125 kJ -1824 kJ	135 kW -153 kW
Régulateurs classiques	1.383	556.5 gr (603.7 gr)	3010 kJ (47.2 gr, 60.2 s)	3300 kJ -134 kJ	76 kW -110 kW

Le Tableau 4.8 donne les résultats obtenus pour cette application.

Tableau 4.8 Résultats de l'application bus urbain

On observe d'abord une similitude avec le cas du tramway : chaque stratégie optimise un aspect au détriment des autres. Les stratégies focalisées sur la consommation présentent une valeur très similaire une fois que la correction de l'état de charge est prise en compte.

Cependant, on note ici que l'état final de l'ES pour toutes les stratégies est presque à sa limite. Cela est dû au fait que la période de plus forte demande se situe lors des derniers instants (Voir Figure 4.21). On constate que les contrôles fonctionnant autour d'une valeur moyenne (optimisation de la consommation et rendement) sont plus robustes face aux arrêts brusques du générateur après une forte demande de la charge.

Les figures suivantes illustrent les résultats de la stratégie focalisée sur le rendement.



Figure 4.20 Sollicitation des supercapacités avec la stratégie « rendement » (Bus urbain)

Comme pour la stratégie d'optimisation de la consommation, la PAC fonctionne toujours autour d'un point donné, dans ce cas, le point de rendement maximal. Elle va osciller autour de ce point en fonction de l'état de l'ES, lequel absorbe toutes les variations de la charge.



Figure 4.21 Simulation avec la stratégie « rendement » pour l'application bus urbain

4.4.3 Bâtiment

L'alimentation d'un bâtiment de bureaux est l'application stationnaire simulée dont la structure est présentée par la figure 1.23. Cette application présente une grande différence par rapport aux précédentes : il n'existe pas de périodes de récupération d'énergie. Le tableau suivant précise les paramètres de la charge.

Puissance moyenne	36 kW
Pic de puissance maximale	94 kW
Pic de récupération	0 kW

Tableau 4.9 Principaux paramètres de l'application bâtiment

Les résultats obtenus en simulation sont donnés dans le Tableau 4.10. Notons que dans ce cas, la stratégie « rendement » s'avère être la moins performante, même en ce qui concerne le rendement lui-même. Cela est dû au compromis entre la précision et la rapidité du contrôle fait lors de son réglage. En effet, lors des applications précédentes, cet aspect était « optimisé », car les périodes de récupération d'énergie de la charge compensaient la lente dynamique du contrôle. Cependant, maintenant, il n'y a que la PAC pour « remplir » l'ES et donc le contrôle est beaucoup moins performant.

La stratégie utilisant des régulateurs classiques est dans ce cas la plus performante et la mieux adaptée. Cependant, il faut noter qu'après avoir tenu compte de l'état de charge sur l'hydrogène consommé, la stratégie basée sur l'optimisation de la consommation s'avère un peu plus performante en ce qui concerne la consommation.

Stratégie de	Evaluation	H_2	Etat final	ES	
contrôle	η	consommé	consommé Etat final		Puissance
Optimisation de la consommation	2.253	291.7 gr (290 gr)	-50 kJ (-0.78 gr, -1 s)	0 kJ -184 kJ	55 kW -55 kW
Rendement	2.171	300.8 gr (295.4 gr)	-347 kJ (-5.4 gr, -6.9s)	232 kJ -413 kJ	54 kW -32 kW
Régulateurs classiques	2.263	290.5 gr (290.5 gr)	9 J (0 gr, 0s)	8 kJ -769 J	11 kW -14 kW

 Tableau 4.10 Résultats de l'application bâtiment

Les résultats des simulations avec la stratégie utilisant des régulateurs classiques sont donnés par les Figure 4.22 et Figure 4.23. Notons qu à la différence des autres contrôles, la PAC essaie de suivre la demande puisqu'elle est utilisée à ses limites comme source de puissance. En conséquence, le rôle de l'ES est uniquement de fournir la différence entre les deux, car il n'y a plus besoin de stocker d'énergie lors de freinages, ni de séparer les deux dynamiques.



Figure 4.22 Sollicitation des supercapacités pour la stratégie « régulateur classique » (bâtiment)



Figure 4.23 Simulation avec la stratégie « régulateur classique » pour l'application bâtiment

4.5 Conclusions

Ce chapitre consacré au niveau supérieur de contrôle a permis d'illustrer le fonctionnement de l'ensemble d'un générateur à PAC pour diverses applications. En utilisant le générateur dont les structures et les régulateurs ont été présentés précédemment, on a constaté le rôle fondamental de ce niveau de contrôle. En effet, son influence sur la dynamique de la PAC ou sur la consommation du générateur (aspects critiques pour le développement des PAC) est cruciale.

Pour l'analyse et l'optimisation de ces aspects, on a considéré deux parties dans la gestion de l'énergie.

La première concerne le système de sécurité de la PAC et plus particulièrement la protection concernant le débit d'oxygène, aspect limitant de la réponse dynamique de la PAC. Afin d'améliorer la réponse dynamique, on a eu recours à un ES et à un contrôle original du débit du compresseur. Les résultats obtenus en simulation après une modélisation simple des divers constituants, montrent une amélioration considérable des performances de la PAC par rapport au schéma classique sans aucun risque d'endommagement. Grâce à cette configuration, la taille de l'ES nécessaire peut être notablement réduite et donc son coût économique également. De plus, on peut utiliser des technologies telles celles des supercapacités ou des volants d'inertie, car les contraintes sont diminuées.

La deuxième partie concerne la stratégie de commande. On a développé 3 stratégies différentes dont le fonctionnement n'a besoin d'aucune connaissance de l'application. Certaines sont inspirées de travaux existants, d'autres ont été réalisées dans le cadre de cette thèse. Même si ces trois stratégies ont des critères d'optimisation différents, toutes présentent un bon rapport simplicité / performance et une adaptabilité intéressante.

Pour tester et comparer ces stratégies, des simulations ont été mises en oeuvre pour diverses applications réelles issues du projet européen FEBUSS. A la différence des travaux existants, l'obtention d'un même état initial et final pour l'ES n'a pas été une priorité, car dans la réalité, le système peut s'arrêter à n'importe quel instant. Néanmoins, on a tenu compte de ce paramètre pour l'évaluation de l'hydrogène consommé.

Les résultats ont montré que si une stratégie est particulièrement bien adaptée à une application, il n'en reste pas moins qu'un compromis relatif aux différents critères de fonctionnement est toujours nécessaire. Ainsi, la stratégie basée sur des régulateurs classiques permet une grande réduction de la taille de l'ES par rapport aux autres. Cela est possible en dépit de la consommation d'hydrogène qui est plus élevée et du fonctionnement de la PAC au voisinage de sa limite dynamique en puissance. Par contre, en utilisant les autres stratégies, on n'aura pas les mêmes caractéristiques. En effet, pour optimiser un critère de fonctionnement, il faut « découpler » la dynamique de la PAC de celle de la charge, ce qui conduit à un ES plus important en terme d'énergie.

Concernant les technologies de stockage, on constate que les supercapacités sont mieux adaptées que les batteries au plomb, puisqu'elles peuvent supporter un grand nombre de cycles et ce sont de très bonnes sources de puissance. Cependant, si la stratégie de commande choisie nécessite le stockage d'une grande quantité d'énergie, les batteries répondront mieux aux besoins. Cela peut être le cas, si la PAC n'a pas à « suivre » la charge instantanément ou si l'énergie à récupérer lors des freinages est très importante. Cela illustre donc l'importance de la stratégie de commande sur cet aspect.

CONCLUSIONS GENERALES

Cette thèse s'inscrit dans la continuité des travaux menés au Laboratoire d'Electrotechnique de Grenoble, lesquels travaux ont pour objet la modélisation électrique, l'interfaçage et le contrôle commande des PAC. Les domaines applicatifs sont le transport et le stationnaire. Par ailleurs, la thèse s'est effectuée en partie dans la cadre du projet européen FEBUSS, dont les partenaires principaux sont AXANE, Schneider Electric et ALSTOM.

Le but recherché a été de faire dialoguer au mieux la PAC avec l'application choisie, ce qui englobe à la fois les interfaces de puissance, l'optimisation des architectures physiques et algorithmiques, l'intégration des contraintes et des limites structurelles de chaque brique composant le système générateur. Les contrôles des différents niveaux ont été également visités.

Nos investigations ont aussi montré que bien que l'IP ne soit pas un verrou technique au générateur à PAC, il n'en demeure pas moins qu'il constitue une brique stratégique. Ainsi, son dimensionnement optimal assure des points de rendements, chose non négligeable quand on a conscience du coût du kW installé. De plus, l'IP permet de maîtriser au mieux les courants et tensions de sortie des stacks pour une exploitation optimale de la PAC et enfin de gérer le stockage éventuel et la charge.

Cependant, si les algorithmes de commande liés à l'IP ont été vérifiés expérimentalement, l'ensemble des travaux menés se doivent d'êtres corroborés sur une PAC à grandeur réelle.

Dans un premier temps, nous avons établi le contexte d'application de l'étude, en commençant par une description sommaire des PAC et plus particulièrement des PAC de type PEM. Cette description qui a aussi englobé les auxiliaires du générateur PAC, a permis de mettre en avant ses performances, lesquelles font de la PAC un générateur électrique qui peut être prometteur pour l'avenir. Si actuellement les PAC PEM ne sont pas sujettes à une demande d'importance, il y a tout de même des niches potentielles qui présentent des potentialités, notamment là où les batteries d'accumulateurs sont présentes ou là où l'on veut s'affranchir du réseau : Véhicule électrique, tramway, effacement de pics de charge, soutien de poste, alimentations de secours...

Le choix de ces applications retenues a été le résultat de diverses analyses techniques et technico-économiques. En conséquence, ces applications sont celles sur lesquelles les travaux de cette thèse se sont focalisés. Nous avons également analysé la modélisation de la PAC, sur la base des recherches actuelles pour disposer de modèles bien adaptés à nos besoins d'électrotechnicien : réglages des correcteurs, dimensionnement de l'ES.

Nous avons ensuite étudié les fonctionnalités à remplir par l'IP. Après une prospective sur les architectures existantes, nous avons sélectionné puis modélisé l'IP dont la structure semble être le plus grand dénominateur commun pour les PAC de la puissance retenue. Cette IP a été optimisée compte tenu des particularités des PAC et des applications envisagées. Cette optimisation est focalisée principalement sur le rendement énergétique de l'IP. Ceci nous a également permis de développer un outil d'optimisation hybride bien adapté aux besoins des électrotechniciens. Cette méthode combinant des AG avec une méthode d'optimisation déterministe, réunit les avantages des deux approches ; la robustesse des AG et la précision des méthodes déterministes tout en réduisant le temps de calcul des AG ; de plus, la méthode n'exige pas une modélisation spécifique, car les mêmes modèles employés pour le réglage des correcteurs sont aussi utilisés pour les algorithmes d'optimisation. Les résultats ont illustré l'amélioration d'un tel dimensionnement par rapport à celui issu de la méthode classique dite analytique, bien que celle-ci ne soit pas considérable.

Concernant le niveau de contrôle intermédiaire de l'IP, nous avons réglé et analysé les correcteurs les mieux adaptés et les plus représentatifs. Les réglages théoriques ont été validés en simulation sur le système complet incluant le stockage. Le choix des correcteurs est conditionné par un compromis entre la complexité, leurs performances et leur robustesse. Les résultats expérimentaux, réalisés avec un banc universel d'essais pour la distribution électrique, ont validé à la fois les modèles et les correcteurs qui en sont issus.

Enfin, nous avons consacré une partie du travail au contrôle de niveau supérieur qui :

- Assure des conditions sures de fonctionnement pour la PAC.
- Génère le flux optimal de puissance entre la PAC et l'ES en fonction des contraintes structurelles tout en respectant la demande de la charge.

Concernant le système de sécurité, nous nous sommes focalisés sur le contrôle du débit d'oxygène fourni par le compresseur, facteur limitant et qui, mal géré peut conduire à la détérioration de la PAC. Nous proposons donc un nouveau contrôle qui a montré en simulation une nette amélioration de la réponse dynamique par rapport aux systèmes classiques. Grâce à cela, la capacité de l'ES se voit réduite, ce qui laisse envisager l'utilisation de nouvelles technologies de stockage de meilleure dynamique, mais de plus faible capacité telles les supercapacités.

En ce qui concerne la gestion des flux énergétiques, trois stratégies de commande ont été proposées, elles ont été simulées, testées et comparées sur les trois applications retenues.

La simulation globale a validé ces stratégies ainsi que le système de sécurité. Egalement, elles ont bien illustré l'importance de ce niveau de contrôle, car le mode de fonctionnement de la PAC peut changer complètement. Les résultats ont aussi montré que pour optimiser le fonctionnement de la PAC et répondre parfaitement à la demande de charge, il faut « découpler » la dynamique de la PAC de celle de la charge, ce qui conduit à un ES plus important en termes de capacité ; en ce sens, ce que nous avons proposé nous semble un bon compromis.

Il nous paraît évident que les travaux menés durant cette thèse ne sont qu'une modeste brique en regard de tous les problèmes ouverts que présente le générateur à base de PAC. Parmi les points qui nous semblent connexes à notre démarche, nous pouvons citer :

- La validation expérimentale des modèles des PAC pour une PEM de 100 kW qui est un point crucial. Ces travaux pourraient permettre de mettre en évidence de possibles problématiques qui n'apparaissent pas pour les PAC de petite puissance : problèmes de calage, dispersion et dérive des paramètres, domaines de validité...
- La réalisation d'un générateur complet PAC + IP + ES, d'une puissance égale à 100 kW serait une base stratégique pour de futures recherches, pour la validation des contrôles commandes des différents niveaux, et enfin pour analyser les probables interactions entre les convertisseurs, le réseau perturbé, les stacks et les filtres.
- La cogénération, bien que la température de la PEM soit relativement basse et qu'elle n'ait pas fait partie des objectifs de cette thèse, mérite aussi une analyse en détail, puisqu'elle peut supposer des modifications du contrôle supérieur.
- A tout cela, nous pouvons ajouter aussi l'emploi de l'outil d'optimisation mis au point pour des cas plus complexes (plus de contraintes et de critères). Cependant, ceci exige des information additionnelles pour intégrer de nouveaux critères et contraintes.

En définitive, la plupart des recherches passent par une analyse expérimentale du générateur dans son environnement. Néanmoins, il va sans dire que le développement de nouveaux algorithmes de contrôle ainsi que l'analyse de nouvelles structures de puissance constituent des voies de recherche riches en possibilités d'innovation.

BIBLIOGRAPHIE

- [ADEME] Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie http://www.ademe.fr
- [All 02] T. Alleau, "*L'hydrogène, vecteur d'énergie du futur*" 5^{ème} Colloque C-VELEC '02, Club véhicule électrique de l'ENSIEG, Grenoble, 2002.
- [All] T. Alleau, *'Enjeux technico-économiques de l'hydrogène comme vecteur énergétique''* Association Française de l'Hydrogéne. http://www.industrie.gouv.fr/energie/prospect/pdf/h2-alleau.pdf
- [Ame 01] A. G. Amendola, M. C. Rocha, "Fuel cell plant A proposed analysis for economical feasibility of implantation" IEE 16th CIRED, Amsterdam, 2001.
- [And 01] C. Andersson, M. Alaküla, *'Different charging strategy hybrid Electric busses'* EVS 18th Electric Vehicle Symposium, Berlin, 2001.
- [Ate 02] M. Aten, "*HVDC control systems*" Thèse doctorale d'University of Manchester Institute of Science and Technology dans MCEE, Manchester, 2002.
- [Awa 01] A. Walter, *"Modélisation et la commande des systèmes à Pile à combustible"* DEA de Génie Electrique, INPG, Grenoble, 2001.
- [Bac] S. Bacha, *'La modélisation des convertisseurs de l'électronique de puissance''*, Polycopie, Cours ENSIEG 3^{eme} et DEA GE, INPG, Grenoble.
- [Bae 00] F. Baentsch *'Liberalisation Challenges and opportunities for fuel cells''* Journal of power sources, 86, pp 84-89, 2000.
- [Bak-02] A. G. Bakirtzis, P. N. Biskas, C. E. Zoumas, V. Petridis, "Optimal power flow by enhanced genetic algorithm", IEEE Transactions on power systems, vol. 17, no. 2, May 2002, pp. 229-36.
- [Bar 97] P. Barthomomeus, P. Lemoigne, '*A 3kW unit-power-factor multilevel rectifier based on a double-boost converter*'', EPE' 97, Trondheim, Vol. 4, 1997.
- [Bar 02] I. Bar-On, R. Kirchain, R. Roth, *'Technical cost analysis for PEM fuel cells''*, Journal of power sources, 109, 2002.
- [Bas 01] P. Bastiani, *'Stratégies de commande minimisant les pertes d'un ensemble convertisseur machine alternative : Application à la traction électrique'',* Thèse de l'Institut National des sciences appliquées de Lyon, 2001.
- [Bez 98] J. J. Bezian, *'Systèmes de piles a combustible pour la cogénération, état de l'art'*, Rapport réalisé pour le compte de l'ADEME, Centre d'Energétique de l'Ecole des Mines de Paris, France, 1998.
- [Bia 01] T. Bialasiewicz, E. Muljadi, R. Nix, S. Drouilhet, *'Renewable Energy Power System, Modular Simulator RPM-SIM''*, Rapport pour National Renewable

Energy Laboratory Golden, Colorado, 2001.

- [Bra 99] N Brandon, D. Hart, "An Introduction to Fuel Cell Technology and Economics", Centre for Energy Policy and Technology (ICCEPT), Imperial College of Science, Technology and Medicine, London, 1999.
- [**Bul 97**] Y. Bultel, "Modélisation des couches actives d'électrodes volumiques des *PEM*", Thèse de l'INPG réalisée au LEPMI, Grenoble, 1997.
- [Cai 04] R. Caire, *'Gestion de la Production Décentralisée dans les Réseaux de Distribution''*, Thèse de l'INPG réalisée au LEG, Grenoble, 2004.
- **[Can 02]** D. Candusso *"Hybridation du groupe électrogène à pile à combustible pour l'alimentation d'un véhicule électrique"*, Thèse de l'INPG, Grenoble, 2002.
- [Con 01] M. Conte, A. Iacobazzi, M. Ronchetti, R. Vellone, *'Hydrogen economy for a sustainable development: state-of-the-art and technological perspectives''*, Journal of Power Sources, 100, 2001.
- [Cru 01] P. Cruchon, *'Conditions techniques pour le raccordement des producteurs aux réseaux publics d'électricité en France Les prescriptions administratives''* IEE 16th CIRED, Amsterdam, 2001.
- [Cul 94] J. C. Culioli, *'Introduction à l'optimisation''*, Ellipses, Editions Marketing 1994, ISBN 2-7298-9428-4.
- [Des 04] B. Destraz, P. Barrade, A. Rufer, *'Supercapacitive Energy Storage for Diesel Electric Locomotives''*, SPEEDAM 2004, Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation & Motion, Capri, Italy, 2004.
- [Eic 98] P.H. Eichenberger, "*The 2 MW Santa Clara project*", Journal Power sources, 1998.
- [EPCOS] EPCOS www.epcos.com
- [Ert 02] H. Ertl, J. W. Kolar, F. C. Zach, "A Novel Multi-Cell DC-AC Converter for Applications in Renewable Energy Systems", IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol 49, 2002.
- [Etx 03] I. Etxeberria *'Sur les systèmes de l'électronique de puissance dedies à la distribution électrique Application à la qualité de l'énergie"*, Thèse de l'INPG réalisée au LEG, Grenoble, 2003.
- [Eva 03] *'Evaluation de la profondeur de décharge d'une batterie par spectroscopie d'impédance'* Rapport d'INRETS avec le concours de l'ADEME, LTE 0337 01 66 088, France, 2003.
- [Fch 00] "Fuel Cell Handbook, 5th edition", EG&G Services Parsons, Inc. Science Applications International Corporation pour U.S. Department of Energy -Office of Fossil Energy -National Energy Technology Laboratory, USA, 2000

- [FCT] Fuel Cell Today : www.fuelcelltoday.org
- [Flu 01] J. Fluchere, *'Prospective énergétique française à 2020, évolution de la production consommation française d'électrcité à 2010 et 2020',*' délégation régionale d'EDF Rhone Alpes, France, 2001.
- [Foc 98] H. Foch, F. Forest, T. Meynard, *"Onduleurs de tension",* techniques de l'ingénieur, traité génie électrique, France, 2000.
- **[Gal 01]** R. Galley, C. Gatignol, *'Rapport sur les perspectives offertes par la technologie de la pile à combustible''*, enregistré à la Présidence de l'Assemblée nationale, France, 2001.
- [Ger 96] L. Gerbaux, *'Modélisation d'une pile à combustible de type hydrogène air et validation expérimentale"*, Thèse de l'INPG réalisé au CEA, Grenoble, 1996.
- [Gld 01] V. Galdi, L. Ippolito, A. Piccolo, A. Vaccaro, "Multiobjective optimization for fuel economy and emissions of hev using the goal-attainment method", EVS 18th Electric Vehicle Symposium Berlin, Oct. 2001
- [Gou 99] M. Gourdault-Montagne, *'Les piles à combustibles au Japon''*, Ambassade de France au Japon, Japon, 1999.
- [Guf 00] S. Guffon, *'Modélisation et commandes à structures variables de filtres actifs de puissance''*, thèse de l'INPG réalisée au LEG, Grenoble, 2000.
- [Hau 99] J. P. Hautier, X. Guillaud, F. Vandecasteele, M. Wulveryck, 'Contrôle de grandeurs alternatives par correcteurs résonnant', Revue Internationale de Génie Electrique, Vol 2 pages 163-183, 1999.
- [Hol 75] J. Holland, "Adaptation in natural and artificial systems", The university of Michigan Press, Ann Arbor, USA, 1975.
- [Hou] C. Houck, J. Joines, M. Kay, "A genetic algorithm for function optimisation: A *Matlab implementation*", North Carolina State University.
- [IEA] Agence internationale de l'énergie www.iea.org
- [III 02] M. S. Illindala, G. Venkataramanan, "Battery energy storage for stand-alone micro-source distributed generation systems", 6th IASTED Intl. Conf. On Power and Energy systems, Marina Del Rey, 2002.
- [Joi 94] J. Joines, C. Houck, "On the use of non-stationary penalty functions to solve constrained optimisation problems with genetic algorithms", IEEE international symposium evolutionary computation, Orlando USA, 1994.
- [Kar 02] P. Karlsson, "DC distributed power systems analysis design and control for a renewable energy system" Thèse de Lund University, 2002.
- [Kaz 01] S. A. Kazarlis, S. E. Papadakis, J. B. Theocharis, V. Petredis, "Microgenetic algorithms as generalized hill-climbing operators for GA optimization", IEEE

transactions on evolutionary computation vol. 5, no. 3, pp. 204-17, June, 2001.

- [Koh 01] B. Kohlstruck, "Applications with proton exchange membrane fuel cells for a deregulated market place", IEE 16th CIRED, Amsterdam, 2001.
- [Lar 00] J. Larminie, A. Dicks, *'Fuel Cell Systems Explained''*, John Wiley & Sons, Ltd réimprimé en novembre 2000.
- [Las 01] J. C. Lassègues, '*Supercondensateurs*'', Techniques de l'ingénieur, traité génie électrique, France, 2000.
- [Lav 04] N. Laverdure, ''*Réalisation expérimentale d'un banc d'essais dédié à la génération éolienne''*, Rapport interne du LEG, 2004.
- [Lea 02] E. M. Leal, J. S. Silveira, *'Study of fuel cell co-generation systems applied to a diary industry''*, Journal of power sources 106, 2002.
- [Lin 98] M. Lindgren, "Modeling and control of voltage source converters connected to the grid", Thèse de Chalmers University of Technology, Suède, 1998.
- [Liu 95] C. Liu, T. Nergaard, L. Leslie, J. Ferrel, X. Huang, T. Shearer, J. Reich, J. Lai, J. Bates, "Power balance control and voltage condictioning for fuel cell converter with multipli-sources" IEEE Stockholm Power Tech Conference, Stockholm, Suede, 1995.
- [Lok 03] A. Lokurlu, T. Grube, B. Hohlein, D. Stolten *'Fuel cells for mobile and stationary applications—cost analysis for combined heat and power stations on the basis of fuel cells ''*, International Journal of Hydrogen Energy, 2003.
- [Luo 99] S. Luo, Z. Ye, R. Li, F. C. Lee, "A classification and evaluation of paralleling methods for power supply modules" Proc. 30th Annu. IEEE Power Electron. Spec. Conf., 1999.
- [Mac 00] M. Machmoum, N. Bruyant, "DSP based control of shunt active power filters for global or selective harmonics compensation". Harmonics and Quality of Power, 2000. Proceedings. Ninth International Conference on, Oct. 2000, Pages: 661-666 vol.2.
- [Mac-00a] M. Machmoum, N. Bruyant, "Control methods for three-phase active power filters under non-ideal mains voltages", Power System Technology, 2000. Proceedings. PowerCon 2000. International Conference on, Dec. 2000 Pages: 1613 - 1618 vol.3.
- [Mar 01] S. Martino *'Réseau de distribution commun au GIE IDEA''*, Rapport du GIE entre le LEG Schenider Electric et EDF, Grenoble, 2001.
- [Maxwell] Maxwell Technologies www.maxwell.com
- [Mcl-03] D. R. McIlveen-Wrighta, J. T. McMullana, D. J. Guiney, "Wood-fired fuel cells in selected buildings", Journal of Power Sources, 2003.
- [Men-01] B. L. Meng, H. Gualous, D. Bouquain, A. Djerdir, A. Berthon, J. M.

Kauffaman, *'Thermal modeling and behavior of ultracapacitors for electric vehicle applications'*, EPE '01, Graz, Autriche, 2001

- [Mes 97] P. Mestre, '*Etude et simulation d'un véhicule électrique à moteur synchrone monosource ou équipé de supercondensateurs*'', Thèse de l'INPT, Toulouse, 1997.
- [Mic 01] "Positioning the state of Michigan as a leading candidate for fuel cell and alternative powertrain manufacturing", Michigan economic development corporation, Michigan automotive partnership, USA, 2001.
- [Min 00] ''Projet de décret, Relatif aux conditions techniques de raccordement aux réseaux publics de distribution des installations de production d'énergie électrique'', Ministère de l'économie, des finances et de l'industrie, 2000.
- [Mol 99] *"Molten carbonate fuel cell development and demonstration"*, California energy commission state energy commission, USA, 1999.
- [Mon 03] T. Montanié, *'Electric energy storage evaluation for urban rail vehicles''*, EPE '03, Toulouse, 2003.
- [Mul 02] B. Multon, 'L'énergie électrique : Analyse des ressources et de la production, place des sources renouvelables'', Ed. Novelect Ecrin, 2002.
- [Mus 98] M Muslei, G Notton, A Louche, "Design of hybrid-photovoltaic power generator, sith optimization of energy management", Pergamon, Solar energy Vol. 65, 1999.
- [Mye 02] D. B. Myers, G. D. Ariff, B. D. James, J. S. Lettow, C.E. Thomas, R. C. Kuhn, *'Cost and Performance Comparison Of Stationary Hydrogen Fueling Appliances''*, Rapport de U.S. DOE Hydrogen Program, USA, 2002.
- [Nap 01] A. Di Napoli, F. Crescimbini L Solero G. Pede G. Lo Bianco M. Pasquali "Ultracapacitor and battery storage system supporting fuel cell powered vehicles", EVS 18th Electric Vehicle Symposium Berlin, Oct. 2001.
- [Nat 02] *'National hydrogen energy roadmap''*, United States Department of Energy Washington, DC, 2002.
- [Neo 04] Site Web sur les algorithmes d'optimisation. ww-fp.mcs.anl.gov/otc/Guide/OptWeb/
- [Ner 01] T. Nergaard, C. Liu, L. Leslie, J. Ferrell, X. Huang, T. Shearer, J. Reichl, J. Lai, J. Bates, *"Ripple Reduction for High Power Fuel Cell Converter Applications"*, CPES Seminar, Blacksburg USA, 2001.
- [Nug 96] S. Nugues, "Mesure de l'état de charge d'une batterie par coulométrie corrigée par impédancemétrie", Thèse de l'INPG réalisée au LEG, Grenoble, 1996.
- [Nuv] Nuvera Fuel Cells : <u>www.nuvera.com</u>
- **[Opt-02]** *"Optimization toolbox for use. User's guide, 2nd Version", The Math Works,*

USA, 2002.

- [Oga 87] K. Ogata, "Modern Control Engineering systems", 4th Edition", London, Prentice Hall, 1999
- **[Osu 00]** G. O'Sullivan, *'Fuel cell inverters for utility applications''*, IEEE 31st Annual PESC Conference Proceedings, Piscataway, vol.3, USA, 2000, p.1191-4.
- **[P 1547]** IEEE P1547/D07 Draft Standard for Interconnecting Distributed Resources with Electric Power Systems, IEEE, SCC21 comité pour le raccordement aux réseau U.S.A.
- [Pag 99] G. Paganelli, "Conception et commande d'une chaîne de traction pour véhicule hybride parallèle thermique et électrique", Thèse de l'Université de Valenciennes et du Haut-Cambresis, 1999.
- [Pag 02] G. Paganelli, P. Rodatz, A Sciarretta, L. Guzella, "Optimisation énergétique du véhicule à pile à combustible de l'ETH/PSI", 5^{ème} Colloque C-VELEC '02, Club véhicule électrique de l'ENSIEG, Grenoble, 2002
- [PC 25] ''Climate Change Fuel Cell Program 200 kW PC25C Fuel Cell Power Plant'', www.doe.gov
- [Pet 98] V. Petridis, S. Kazarlis, A. Bakirtzis, "Varying fitness functions in genetic algorithm constrained optimisation: the cutting stock and unit commitment problems", IEEE transactions on systems, man and cybernetics, vol. 28, no. 5, pp. 629-39, 1998.
- [Poi 00] J. P. Poirot Crouvezier, "Modélisation de la réponse énergétique d'une pile à combustible et du groupe électrogène associé" Thèse de l'INPG réalisée au CEA pour PSA Peugeot Citroën, Grenoble, 2000.
- [Que 01] *"Quel futur pour l'énergie en Rhône-Alpes ?"* Edité par Groupe ENERGIE de MEDEF Rhône-Alpes, Lyon 2001.
- [Raj 00] K. Rajashekara, *'Propulsion system strategies for fuel cell vehicles''*, Society of automotive engineers, 2000.
- [Riv-00] C. Rivas, A. Rufer, "Comparaison des pertes des convertisseurs pour systèmes de production d'énergie à partir d'une pile à combustible", EPF '00 : 8^{ème} Colloque Electronique de Puissance du Futur, Lille, 2000.
- [Rog] J. P. Rognon, *'Asservissement de courant des machines à courant continue. Commande numérique''*, Polycopie Cours de l'ENSIEG et DEA, INPG, Grenoble.
- [Roy 98] D. Roye, *'Boucles de commande''*, Cours de Formation continue du LEG, Grenoble, 1998.
- [Ruh 00] R. C. Ruhl, *'Fuel Cell and Reversible Fuel Cell Modules for Grid-Independent Electric Power systems''*, Final report for DOE Cooperative Agreement, 2000.

- [SAFTA] Battery Technical Manual, www.saftbatteries.com
- [Sai-04a] R. Saisset, "Contribution à l'étude systématique de dispositifs énergétiques à composants électrochimiques. Formalisme Bond Graph appliqué aux piles à combustible, accumulateurs Lithium-Ion, véhicule solaire", Thèse de l'INPT, Toulouse, 2004.
- [Sai 04] R. Saisset, G. Fontes, Ch. Turpin, S. Aastier, "Bond Graph Model of a PEM Fuel Cell", 2nd France – Deutschland Fuel Cell Conference, Belfort, France, 2004.
- [Sal 97] L. Saludjian, *'Optimisations en électrotechnique par algorithmes génétiques''*, Thèse de l'INPG réalisée au LEG, Grenoble, 1997.
- [Sam 00] N. M. Sammes, R. Boersma, *'Small-scale fuel cells for residential applications''*, Journal of power sources, 86 pp 98-110, 2000.
- [Smi 00] W. Smith, *'The role of fuel cells in energy storage''*, Journal of power sources, 86, pp74-83, 2000.
- [Ste 00] P. Stevens, F. Novel-Cattin, A. Hammou, C. Lamy, M. Cassir, *'Piles à combustible''*, Techniques de l'ingénieur traité génie électrique, France, 2000.
- [**Tou 04**] Colloque organisé par le réseau français PACO Piles à Combustible et leur Gestion à Toulouse, Janvier, 2004.
- [**Tur 03**] C. Turpin, R. Saïsset, D. Flumian, S. Astier, *'Design and simulation of a fuel cell hybrid electricity generating unit'*, International Conference on Clean, Efficient and Safe Urban Transport, CSMITA'03, Gdansk, Pologne, 2003.
- [Val 01] I. Valero, *'Systèmes de couplage au réseau pour la production décentralisée''*, DEA de Génie Electrique réalisé au LEG, INPG, Grenoble, 2001.
- [Wal 01] S. Walkiewicz, *'Etude par spectroscopie d'impédance électrochimique de piles à combustible à membrane échangeuse de protons''*, DEA d'électrochimie réalisé au LEPMI, INPG, Grenoble, 2001.
- [Wol 99] R. H. Wolk, "Fuel cells for homes and hospitals", IEEE-Spectrum. vol. 36, no.5, p.45-52, May 1999.
- [YUSA] YUSA, www.yuasa.fr
- [Zha 02] J. Zhang, "*Research on using genetic algorithms to design and optimize power electronic*", Thèse de City University Of Hong Kong, Hong Kong, 2002.
- [Zha 03] C.-J. Zhan, X.G. Wu, S. Kromlidis, V. K. Ramachandaramurthy, M. Barnes, N. Jenkins, A. J. Ruddell, *'Two electrical models of the lead-acid battery used in a dynamic voltage restorer''*, IEE Proceedings Generation Trans. Distrib., vol. 150, No. 2, March 2003.

<u>ANNEXE I</u> Les ressources energetioues actuelles et l'hydrogene

Cette annexe présente d'abord d'une manière générale l'utilisation actuelle des ressources énergétiques. Ensuite, il s'en suit par une description de l'état actuel de la filière hydrogène. Néanmoins, l'étude se focalise sur les aspects vitaux pour l'utilisation de l'hydrogène comme vecteur d'énergie dans l'avenir, surtout comme vecteur complémentaire à l'énergie électrique.

A1.1 Ressources énergétiques actuelles

Dans la société actuelle, l'énergie est devenue un élément fondamental et vital pour le développement, indissociable de notre évolution ; l'« homme technologique » consomme cent fois plus d'énergie que l'« homme primitif » et 10 fois plus que l'« homme évolué » [Mul-02]. A l'époque actuelle, on constate en effet que toute croissance du PIB implique une croissance de la consommation totale d'énergie primaire. En France, une hausse de 1 % du PIB conduit à une augmentation de 0.7 % l'énergie consommée [Flu-01].

Cependant, la consommation de l'énergie n'est pas équilibrée au niveau mondial ; la valeur moyenne est autour de 2 TEP /an/habitant. Mais, tandis qu'un habitant aux Etats Unis consomme 7.9 TEP/an, un indien ne consomme que 0.5 TEP/an [Flu-01][IEA]. En effet à l'ère de l'énergie, un tiers de la population mondiale ne dispose que de la biomasse. Le Tableau A1.1 illustre ces différences.

	Etats Unis	France	Chine	Monde
% de la consommation mondiale	24	2.8	9	100
kWh par habitant par jour	253	120	21	72
kW électriques par hab. par jour	28	20	2,1	2,3

Tableau A1.1 Comparaison des consommations énergétiques [Mul-02]

Actuellement, les principales sources d'énergie primaire sont de caractère fossile ; le pétrole, le gaz et le charbon. Ces énergies qui se trouvent essentiellement dans les pays en voie de développement, représentent plus de 80 % de la consommation totale (Voir Tableau A1.2).

Pétrole	Charbon	Gaz naturel	Nucléaire	Renouvelables
40 %	24 % %	22 %	6.5 %	7.5 %

 Tableau A1.2 Sources d'énergie [Mul-02][Gal-01]

Ces sources d'énergie sont employées principalement dans quatre grands secteurs (Voir Tableau A1.3). Parmi eux, il faut mettre en avant la production électrique qui est actuellement le principal vecteur d'énergie et qui semble être irremplaçable. Egalement, l'importance du pétrole pour le transport est aussi à remarquer : car c'est la principale source d'énergie (Voir Tableau A1.4).

Production électrique	29 %	Industrie	25 %
Résidence et bureaux	26 %	Transport	16 %

Tableau A1.3 Consommation de l'énergie primaire par secteur [Mul-02]

	Pétrole	Charbon	Gaz naturel	Electricité	Autre
Transport	96 %	4 %			
Industrie	17 %	31 %	18 %	17 %	17 %
Résidentes et bureaux	19 %	14 %	19 %	14 %	34 %

Touts ces aspects font donc que certains pays développés, surtout européens, présentent une dépendance énergétique très importante et croissante. Cette dépendance est provoquée en grande partie par le pétrole. Le Tableau A1.5 illustre le cas de 3 pays européens.

	France		Allemagne		Italie	
	Production	Conso.	Production	Conso.	Production	Conso.
Charbon	4.2	13.5	65	80	0.1	11
Pétrole	2.5	93	3	144	0.9	89
Gaz naturel	1.1	34.4	15	69	16	60
Nucléaire	102	97.1	44	44	0	2.6
Renouvelables et autres	16	16	8	8	9.4	9.4
Total	126	254	135	345	26.4	172
Dépendance des importations	≈ 51	%	≈ 61	%	≈ 85	%

Tableau A1.5 Dépendance énergétique en 2000 en M. TEP [Que-01]

Notre développement, focalisé sur la combustion des énergies fossiles, a conduit à des émissions massives de gaz à effet de serre (principalement CO_2 et méthane). Au début de la révolution industrielle, la concentration de CO_2 était environ de 280 ppm. Aujourd'hui, cette valeur a dépassé 370 ppm, ce qui a provoqué une augmentation de la température globale de la planète de 0.5 à 1 °C et de nombreuses perturbations climatiques (modifications de courants marins, fonte des glaciers...) [Con-01].

En conséquence, de nombreuses initiatives internationales, comme celle de Kyoto, ont comme objectif la réduction des émissions actuelles. Or ces accords concernent principalement les émissions des pays développés, car ils concentrent plus du 50 % des émissions de CO₂. Par secteur, ces mesures affectent principalement le transport, car il constitue la principale source des émissions à cause de sa dépendance par rapport au pétrole. En France, le transport contribue 26 % aux émissions polluantes totales [Flu-01].

A1.2 Tendances futures

Malgré les possibles implications gouvernementales pour réduire la consommation des énergies fossiles [Flu-01][IEA], celles-ci continueront à être la principale source d'énergie

dans l'avenir. En effet, pour l'année 2050 il est estimé qu'entre 60 et 70 % de l'énergie sera produite par la combustion carbonée dont la principale source est le pétrole [Flu-01][All-02].

Cela aura des conséquences très importantes. D'un côté, la dépendance énergétique des régions développées se verra accentuée, car leurs resserves fossiles seront épuisées. De l'autre côté, les émissions polluantes pourront atteindre des valeurs très dangereuses. Les scientifiques estiment que la valeur maximum admissible de CO_2 , 550 ppm, pourrait être atteinte avant 2080, si la tendance actuelle se confirme [Con-01].

En fait, du fait de l'augmentation de la population mondiale, la quantité totale consommée des énergies fossiles augmentera énormément (entre 60 et 100%), même si son pourcentage diminuait. Un autre facteur crucial relatif à cette hausse est la croissance de la consommation énergétique moyenne. Pour l'année 2040, la consommation moyenne augmenterait de 33% par rapport à celle de 1999 soit, 2 MTEP/an/habitant et la population mondiale atteindra les 9 milliards de personnes.

	Consommation mondiale en milliards de GJ					
	2000	2050, dynamique actuelle 2050, dynamique possib				
Fossiles	344, 84.7 %	540, 63.3 %	701, 62.5 %			
Total	407	852	1121			

Tableau A1.6 Scénarii possibles [All-02]

Toutes ces circonstances font que les réserves des énergies fossiles seront épuisées dans un avenir relativement proche, parce qu'elles ne seront plus exploitables à des coûts économiques acceptables. Cela est encore plus dramatique pour le pétrole qui est la source prépondérante pour le transport.

	Durée des réserves
Pétrole	≈ 30 ans
Gaz naturel	≈ 70 ans
Charbon	≈ 300 ans

Tableau A1.7 Durées de réserves énergétiques, 2000 [Flu-01]



Figure A1.1 Demande d'énergie électrique [Mul-02]

L'électricité continuera à jouer un rôle vital, plus important encore, dans la civilisation de l'avenir. Elle sera le vecteur d'énergie principal, même si sa production future est problématique compte tenu de la disponibilité des énergies fossiles : le coût du combustible représente une grande partie du coût total, de 60 à 70 % pour le gaz. Cela obligera à une utilisation plus efficace. Actuellement, par exemple, une partie importante de l'électricité est destinée au chauffage (en France 17 %), tandis que la combustion d'un combustible présente de meilleures performances pour cela. En outre, l'électricité devra faire face à certains problèmes pour améliorer son utilisation, comme par exemple le stockage.

A1.3 Ressources énergétiques renouvelables

Malgré l'actuelle dépendance des énergies fossiles, les sources énergétiques renouvelables de la planète sont très diverses et abondantes, dans certains cas inépuisables à l'échelle humaine.

De ce fait, elles apparaissent comme la clé pour un développement durable et écologique futur. Les principales énergies renouvelables sont :

L'énergie solaire.	Les cycles hydrauliques.	L'énergie hydraulique.
L'énergie éolienne.	La houle.	La biomasse.
La géothermie.	Le couple terre – lune.	Le soleil.

Malheureusement, leur exploitation actuelle est très problématique, car l'état technologique présent ne permet pas une exploitation viable économiquement. L'énergie hydraulique représente l'exception de cette situation. Cependant, les perspectives futures de développement au long terme sont immenses. Ces sources pourraient solutionner les problèmes concernant les émissions polluantes et la dépendance économique. En outre, elles ouvriraient la porte au développement d'un nouveau secteur industriel. En conséquence, elles sont l'objet de nombreux projets de recherche et développement.

Néanmoins, les énergies renouvelables présentent dans la plupart des cas un grave handicap : elles sont intermittentes. Cela freine énormément leur utilisation surtout pour devenir une source d'énergie principale. Pour résoudre cela, un nouveau vecteur d'énergie permettant un stockage efficace est nécessaire. Ce vecteur permettrait ainsi de disposer d'une production électrique stable utilisant les énergies renouvelables.



Figure A1.2 Estimation des émissions de CO₂

Figure A1.3 Nature des sources d'énergie primaire

A1.4 L'hydrogène, possible vecteur d'énergie

Un vecteur d'énergie bien adapté aux problèmes ici présentés (complément de l'électricité, intermittence des énergies renouvelables et dépendance du pétrole) est l'hydrogène, la plus abondante matière dans la nature. Ce gaz qui ne se trouve pas au stade pur, doit être produit à partir d'une source d'énergie primaire. L'hydrogène offre de grandes perspectives :

- **Transport :** Il pourrait constituer le combustible substitutif du pétrole. Le véhicule électrique utilisant une PAC est proche de sa commercialisation. De cette manière, la dépendance économique ainsi que les émissions polluantes se verraient fortement réduites.
- **Production électrique :** Il s'avère un efficace complément de l'électricité, car il permettrait de résoudre les problèmes de stockage. En plus, la production d'électricité utilisant une PAC permettrait de générer de la chaleur et d'améliorer les rendements énergétiques globaux.

• **Energies renouvelables :** Elles verraient solutionné leur problème d'intermittence, car l'énergie pourrait être stockée sous forme d'hydrogène. Cela permettrait l'utilisation des énergies renouvelables comme source d'énergie principale.

L'hydrogène transformé en électricité avec une PAC représente donc un grand espoir pour les enjeux énergétiques futurs.

A1.5 L'hydrogène

L'hydrogène en tant que substance pure fut découvert par le chimiste et physicien anglais Henry Cavendish en 1766, même s'il doit son nom au français Antoine Lavoisier. L'hydrogène à l'état pur se compose de deux atomes dont la masse atomique est 1.0079 g par atome. Dans des conditions ambiantes normales, c'est un gaz incolore et inodore.

Densité liquide à (20.3 K)	70.79 kg/m ³	Température de solidification	14 K
Densité gazeuse à (273 K)	0.08988 kg/Nm ³	Température d'ébullition	20.3 K

Tableau A1.8 Propriétés de l'hydrogène

L'hydrogène a un haut pouvoir calorifique (Voir Tableau A1.8). C'est le gaz le plus léger (2.016 g/mol), et donc sa densité volumique, est très faible 10.8 MJ/m³ (contre 16 MJ/m³ pour le méthanol et 39.77 MJ/m³ pour le gaz naturel). C'est son principal handicap, de plus, le stockage ainsi que la manipulation sont plus compliqués.

Hydrogène	120 MJ/kg	Gaz naturel	20 MJ/kg
Pétrole	45 MJ/kg	Méthanol	50 MJ/kg

Tableau A1.9 Pouvoirs calorifiques

La combustion de l'hydrogène se produit habituellement par réaction avec l'oxygène, le comburant, en générant de l'eau et de la chaleur (290 kJ/mol H₂) mais sans aucun polluant. Sa combustion avec l'air ne produit que de faibles quantités de NO_X, pas de dérivés carbonés ni soufrés. Par contre, sa flamme presque invisible à 2300 °C dans l'air et à 2700 °C avec l'oxygène, constitue un risque. D'autres inconvénients sont listés ci-dessous.

Faible énergie d'ignition	0.2 mJ	10 fois moins que celle des hydrocarbures classiques
Risque d'inflammabilité	4 – 75 % volume dans l'air	5 fois plus grande que pour le gaz naturel,
Risque d'explosivité	13 – 65 % volume dans l'air	importante que celle du gaz naturel

Tableau A1.10 Risques de l'hydrogène

L'hydrogène n'est donc pas plus dangereux que les autres combustibles mais il exige une manipulation distincte. De nombreuses expériences en témoignent : auparavant le gaz de ville était composé à 60 % de H₂, actuellement la ville de Kiev est alimentée en H₂ pur et il existe des pipelines de quelques centaines de kilomètres transportant du H₂ en Belgique et aux Etats Unis.

En général, l'hydrogène est employé pour la production d'ammoniaque (près de 50 %), de méthanol (8 %) et pour d'autres procédés chimiques. Il ne représente qu'1.5 % de la

production mondiale d'énergie primaire [All-02]. On ne peut donc pas parler de l'hydrogène comme d'un vecteur d'énergie à l'état actuel.

A1.6 Production de l'hydrogène

La production de l'hydrogène est certainement l'élément le plus décisif pour qu'il devienne un vecteur d'énergie; Le mode de production détermine principalement le coût de l'hydrogène ainsi que les émissions polluantes. Ces aspects diffèrent suivant la méthode et l'énergie primaire employées. La quantité d'énergie nécessaire à sa production varie également en fonction de la méthode (3.3 kWh d'énergie hydraulique sont nécessaires pour produire 1 kWh d'hydrogène contre 8.8 kWh via le nucléaire ou 20 kWh via le solaire).

	Gaz naturel	Naphta	Hydrocarbures lourdes, CH _{1.4}	Charbon	LPG CH _{2.6}	Eau
Energie théorique consommée (kJ/kmole H ₂)	41280	38350	59300	57150	37500	242000

 Tableau A1.11 Energie théorique consommée pour la production d'hydrogène

Les principales méthodes de production sont décrites ci-dessous. Les deux premières, connues depuis longtemps, sont les seules à être largement utilisées mais d'une manière très centralisée, avec des installations de grande taille. Pour le reste, mis à part l'électrolyse classique, elles sont encore au stade de la recherche et ne constituent que des espoirs pour une future production plus décentralisée.

A1.6.1 Production par vaporeformage

Ce procédé est appliqué pour des alcools (éthanol, méthanol...) ou hydrocarbures légers : le gaz naturel, le gazole, l'essence, le naphta.

Le vaporeformage mélange le carburant et l'eau sous forme gazeuse, donc il faut préchauffer les réactifs. L'hydrogène et des oxydes de carbone sont formés sous forme gazeuse également. Ce procédé comporte plusieurs phases. Dans le cas, du gaz naturel, il peut être résumé par les équations suivantes qui se déroulent en deux temps :

$$CH_4 + 2H_20 \leftrightarrow CO + H_2 \qquad CH_4 + H_2O \leftrightarrow CO + 3 H_2$$
 (A1.1)

$$CO + H_2O \leftrightarrow CO_2 + H_2$$
 (A1.2)

Ces réactions, qui sont globalement endothermiques (sauf pour le naphta) ont besoin d'un catalyseur à base de nickel (pour le gaz naturel par exemple) ou d'oxyde de cuivre. A cause de l'empoisonnement de ces catalyseurs par le H_2S , un procédé de désulfuration du combustible est nécessaire pour obtenir un combustible avec moins de 0.1 ppm en composés soufrés. Il y a donc une première étape d'hydrogénation et une deuxième de désulfuration à l'aide de Zinc.

La réaction de vaporeformage a lieu dans un réacteur qui peut comporter un brûleur pour préchauffer les réactifs. Pour les PAC sensibles aux polluants comme le CO, l'hydrogène doit encore être filtré après le vaporeformage. Ce procédé consiste en une oxydation catalytique sélective.

Le vaporeformage, procédé le plus utilisé, est parfaitement maîtrisé sur le plan technique et permet d'obtenir les concentrations les plus élevées en hydrogène pour un coût d'environ 0.6 ϵ /kg. Sa limitation principale est son temps de réponse important surtout lors du démarrage.

A1.6.2 Production par oxydation partielle

Cette méthode est appliquée pour des hydrocarbures lourds, combustibles liquides, comme l'essence ou le naphta. Ce procédé exothermique se base sur l'oxydation partielle du combustible à des températures et pressions élevées : 1.300 à 1.500 °C et 20 à 40 atm respectivement. L'équation suivante illustre la réaction totale d'oxydation du pentane.

$$C_5H_{12} + 5/2 O_2 \rightarrow 5 CO + 6 H_2$$
 (A1.3)

Les concentrations obtenues d'hydrogène sont moindres que dans le cas précédent, cependant le temps de réponse est largement inférieur.



Figure A1.4 Méthodes de production d'hydrogène

A1.6.3 Production par électrolyse

L'électrolyse consiste en la séparation de l'eau en oxygène et hydrogène par un courant électrique. C'est en fait le procédé inverse de la PAC. Ce courant rompt la cohésion chimique de la molécule en créant des ions indépendants. La tension minimale nécessaire est de 1.24 V à 25 °C et on obtient 1.03 kg/cm². L'énergie minimale nécessaire est de 65.3 Wh à 25 °C par mol.



Figure A1.5 Principe de l'électrolysés

Actuellement, de nombreuses alternatives sont analysées pour améliorer le rendement (normalement 70-85 % mais il serait possible d'atteindre jusqu'à 90 %) et les coûts (≈ 4-8
c€/kWh soit presque 2 ou 3 fois celui avec le vaporeformage) [FCT] ; ces techniques se nomment: plasmolyse, magnétolyse. Parmi elles, la plus prometteuse est la thermalélectrolyse qui apporte une partie de l'énergie électrique sous forme de chaleur. Dans cette technique, les nouveaux réacteurs nucléaires à hautes températures sont appelés à jouer un rôle vital.

Le coût élevé fait que son utilisation est toujours minoritaire, moins de 5%. De plus, il est fortement dépendant du coût de l'électricité. Cependant, cette méthode apparaît comme le meilleur moyen futur pour stocker de l'énergie électrique produite par des énergies renouvelables. Ainsi, on pourrait obtenir un cycle énergétique avec presque zéro émissions.

A1.6.4 Production par la biomasse

Cette technique naissante ne provoque pas d'émissions polluantes globales. Elle produit l'hydrogène par divers procédés de biochimie : fermentation (algues ou bactéries) ou procédé thermique (gazéification ou pyrolyses de déchets solides)

Certaines algues et bactéries produisent de l'hydrogène dans certaines circonstances. Un tel procédé fermentatif absorbe généralement de l'énergie solaire. Actuellement, celui-ci est mal identifié quant à l'optimisation des conditions de production à un coût raisonnable.

La gazéification de déchets (composés du bois principalement) ou de charbon réalise une oxydation partielle en deux phases de la matière en gaz et ce à très haute température-, plus de 1000 °C.

Toutes ces méthodes très prometteuses restent au stade de la recherche et sont loin d'être des moyens de production compétitifs économiquement. D'autres méthodes pourraient également êtres citées, telles la photo-électrolyse qui produit de l'hydrogène via une réaction chimique sur un semi-conducteur en contact avec de l'eau. Cependant, elles en sont toutes au stade de la recherche.

A1.7 Transport et distribution de l'hydrogène

Pour que l'hydrogène devienne un vecteur d'énergie, ce secteur devrait se développer fortement, car le caractère centralisé de la consommation actuelle n'a pas permis son développement.

A1.7.1 Pipelines

La distribution par pipelines sous pression date de plus de 70 ans [All-02]. Elle peut se faire via le réseau de gaz naturel sans beaucoup de modifications. Néanmoins, cette distribution qui se réalise à des pressions autour de 20 bars, exige toujours un filtrage final (membranes) pour séparer les gaz. Dans le cas d'un réseau spécifique à hydrogène, les pressions augmenteraient jusqu'à des valeurs de 100 bar.

Des expériences à grande échelle existent déjà comme par exemple le réseau d'alimentation de Kiev ou en Belgique-Nord de la France en Europe et de Beynes aux Etats-Unis.

A1.7.2 Transport routier ou ferroviaire

Le transport d'hydrogène comprimé ou cryogénique, est réalisé tant par voie routière que ferroviaire sans qu'on ait constaté d'incidents. Dans le cas de longues distances (plus de 1.000

km), l'hydrogène est transporté sous forme liquide; sous forme d'hydrocarbures ou d'ammoniac.

Malheureusement, le rendement du transport est médiocre, environ 80 %, pour diverses raisons : une partie non-négligeable de l'hydrogène reste dans le réservoir. [Nat-02], la connectique et l'interface avec les utilisateurs jouent également un rôle non négligeable.

Moyen	Avantages	Inconvénients	
Pipeline	Utilisation du réseau de gaz naturel Expériences à grande échelle	Réseau spécifique peu développé	
Routier ou ferroviaire	Bien connu Comprimé ou cryogénique Hydrocarbures	Rendement Connectique Quantité limitée	

A1.8 Stockage de l'hydrogène

Le stockage est, peut-être, l'aspect le plus problématique de l'hydrogène si on veut qu'il devienne un bon vecteur d'énergie. La méthode de stockage implique un important compromis entre la quantité stockée, le volume et la masse du réservoir et l'énergie consommée pour le stocker. La sécurité joue aussi un rôle capital.

Les méthodes ici listées constituent à l'état actuel les principaux modes de stockage au niveau industriel (les deux premières) et au niveau expérimental.

A1.8.1 Stockage sous forme gazeuse

L'hydrogène gazeux est stocké sous pression dans des réservoirs spécifiques. Le processus de compression qui ne dépend pas de la pureté de l'hydrogène, exige plusieurs étages pour refroidir le gaz lors du procédé, car une compression isotherme n'est pas réalisable. Ce procédé de compression consomme de 10 à 15 % de l'énergie du combustible et le remplissage n'est faisable qu'en milieu industriel.

Les pressions de compression peuvent varier entre 200 et 350 bar pour l'hydrogène commercialisé. La taille des réservoirs varie entre 10 l et 15.000 Nm³ sous diverses formes : cylindriques ou sphériques. La densité volumique reste très faible : 1 à 3 % du volume.

En conséquence, d'autres méthodes avec des pressions plus élevées (700 bar) ont été développées en utilisant un réservoir elliptique. Ces réservoirs réalisés en alliage d'aluminium renforcé par des fibres de carbone pour réduire le poids permettent d'arriver à des densités d'environ 13 % du volume soit 4 kWh/kg, 0.7 kWh/l, ce qui correspond à 16 kg/kg_{H2} et 36 l/kg_{H2} [Nat-02][Ste-00].

Le stockage gazeux peut aussi se faire sous terre, quand les quantités sont importantes, dans des aquifères ou des cavernes salées (cf. le stockage pour la ville de Kiel en Allemagne et le stockage de Gaz De France) [Con-01].

A1.8.2 Stockage sous forme liquide

L'hydrogène, sous forme liquide, présente une valeur de densité volumique correcte (22 MJ/kg avec réservoir) Cette méthode de stockage est bien connue car elle est employée dans le transport routier depuis des décennies sans problèmes majeurs de sécurité. Le réservoir généralement elliptique nécessite peu de place (37 l/kg_{H2}) Cependant, la liquéfaction de l'hydrogène, composée de phases successives de compression, refroidissement et décompression (cycle Joule-Thompson le plus simple), a lieu à – 253 °C.

Même si la liquéfaction est bien maîtrisée, elle consomme plus de 30 % de l'énergie du combustible, soit plus de 10 kWh/kg de H₂. En plus, cette température très basse oblige à un isolement thermique très onéreux du réservoir (double paroi avec vide entre les deux, avec air liquide ou super-isolants) fait en acier généralement. Malgré cela, les pertes thermiques sont inévitables ainsi que l'évaporation d'une partie de l'hydrogène (boil off). Cela conduit donc à des pertes allant jusqu'à 3 % par jour et à la nécessité d'un brûleur catalytique pour purger l'hydrogène évaporé.

Une autre méthode consiste en la transformation de l'hydrogène en un élément hydrogéné comme l'alcool ou le méthanol. La transformation inverse se fait à travers un reformeur, précédemment présenté. L'ammoniac est employée, car il est facilement transformé par un craquage catalytique à 600°C [Ste-00].



Figure A1.6 Masse et volumes selon les méthodes de stockage

Tableau A1.13 Etat de développement des modes de stockage *Borhydrure de sodium et hydrures métalliques

A1.8.3 Stockage sous forme solide

Hydrures métalliques

Certains métaux comme le magnésium, le palladium ou des alliages stockent des atomes d'hydrogène au milieu de leurs atomes par le biais de liaisons chimiques. Ce procédé réversible peut avoir lieu à différentes températures (pour certains hydrures ce sera 300 °C et pour d'autres de 0 à 100 °C) et pressions. L'hydrogène est libéré lors de l'augmentation de la température (300 – 350 °C).

Cette méthode pour laquelle il n'y a pas de pertes de stockage, conduit à une densité volumique plus élevée que lorsque l'hydrogène est liquéfié et elle est en outre très sure. Cependant, les densités énergétiques obtenues sont encore faibles, entre 2 et 7 %, les

réservoirs sont lourds et le remplissage lent. Pour conclure, on remarquera que la fabrication des hydrures revient cher et que l'hydrogène à stocker doit être très pur.

Structures charbonnées : charbon actif, nanofibres et nanotubes

Le stockage de l'hydrogène se réalise par adsorption soit dans le charbon (charbon actif) soit dans la surface d'un solide par les forces de Van der Waals (nanofibres et nanotubes). Malgré les premiers résultats prometteurs de ces techniques, il semble que celles-ci ne soient pas mises en avant. Les densités annoncées autour de 13 %, sont en réalité plutôt autour de 5 à 10 % (nanofibres). Pour le charbon, des valeurs acceptables de densité massique (8 %) ont été obtenues dans des conditions extrêmes (-186 °C et 60 bars).

Borhydrure de sodium

Ce nouveau concept développé par la compagnie Millenium Cell, se base sur la réaction du borhydrure de sodium et de l'eau pour donner de l'hydrogène en mettant la solution en contact avec un catalyseur, généralement du cobalt ou du ruthénium. Cette solution, non toxique ni polluante, peut être stockée dans des réservoirs classiques dans des conditions normales. Néanmoins, des problèmes techniques (émissions spontanées d'hydrogène) ainsi que le coût du catalyseur constituent un handicap.

A1.9 Transformation de l'hydrogène

A1.9.1 Par combustion

C'est le procédé le mieux maîtrisé qui conduit à des valeurs de densité volumique très élevées, tout en limitant les émissions polluantes. Cependant, son coût rend l'utilisation de cette technique très limitée (fusées spatiales par exemple). En effet, la différence de performances obtenues par rapport aux moteurs thermiques « classiques » ne justifie pas la différence de coût [Nat-02].

A1.9.2 Par une pile à combustible

La PAC a déjà été l'objet d'analyse dans le chapitre 1. Donc, le lecteur peut s'y référer pour plus d'information. Soulignons cependant que c'est le développement de la PAC qui permettra à l'hydrogène de devenir un vecteur d'énergie dans l'avenir.

A1.10 Emissions polluantes et cout

Deux aspects concernant l'utilisation de l'hydrogène méritent une attention spéciale : les émissions polluantes globales et le coût économique de production. Ces deux aspects sont en effet, cruciaux pour le développement de l'hydrogène.

A1.10.1 Emissions polluantes

L'évaluation des émissions polluantes implique une analyse de tout le cycle d'exploitation : énergie primaire, mode de production, transport et transformation. Cette étude se concentre sur l'usage de l'hydrogène utilisant une PAC.

Il faut indiquer que certaines filières de l'hydrogène présentent des émissions globales potentiellement nulles : électrolyse à base d'énergies renouvelables, production avec la biomasse ou des algues.

En fonction du mode de production et du stockage, les émissions varient comme l'indiquent le Tableau A1.14 et le Tableau A1.15.

	Emissions de CO ₂	Emissions de NO ₂	Emissions de HC	Emissions de CO	Emissions de SO ₂
Hydrogène issu du gaz naturel	99	0.04	0.11	0.02	0.03
Hydrogène issu du pétrole	140	0,17	0,21	0,03	0.18
Hydrogène issu du charbon	209	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
Hydrogène issu de l'électrolyse*	42	0.10	0.02	0.0085	0.16

Tableau A1.14 Emissions de polluants issus des filières hydrogène comprimé «du puits au réservoir» en g/MJ [Gal-01]

0	-	1			
	Emissions de CO ₂	Emissions de NO ₂	Emissions de HC	Emissions de CO	Emissions de SO ₂
Hydrogène issu du gaz naturel	158	0.10	0.166	0.037	0.09
Hydrogène issu du naphta	232	0.29	0.335	0.050	0.31
Hydrogène issu du charbon	343	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
Hydrogène issu de l'électrolyse	66	0.164	0.027	0.020	0.246

* Il s'agit là d'une émission moyenne conséquente à la production de l'électricité.

Tableau A1.15 Emissions de polluants issus des filières hydrogène liquéfié «du puits au réservoir»en g/MJ [Gal-01]

Ces valeurs contrastent fortement avec celles des émissions de CO_2 des secteurs énergétiques classiques. Le Tableau A1.16 précise ces valeurs. A l'heure actuelle, l'utilisation de l'hydrogène permet une réduction des émissions de CO_2 la plupart du temps. Seule l'énergie nucléaire demeure moins polluante en terme de CO_2 .

Energie nucléaire	1.2 g	Pétrole	230 g
Gaz	124 g	Charbon	266 g

Tableau A1.16 Emissions de CO₂ pour produire1 MJ en fonction de l'énergie primaire

Concernant les applications stationnaires avec utilisation d'un reformeur, les émissions sont également réduites. Les résultats des certaines expériences réelles illustrent notre propos [Fch-00][PC-25][Koh-01].

	Emissions CO	Emissions NO _X	Emissions HC
Limite des normes allemandes	650	500	150
Cogénération classique (<1MW)	250	250	70
Cogénération avec une PEM	10	10 - 20	3

Tableau A1.17	Comparaison	des émissions	[Koh-01]
---------------	-------------	---------------	----------

Dans le transport, les études montrent des résultats très divers concernant la réduction des émissions du fait de la diversité des choix. Dans tous les cas, on constate une réduction essentiellement du fait du rendement global élevé de la PAC. Une voiture utilisant une PAC peut arriver à des rendements supérieurs à 30 %, tandis que les voitures classiques ont un rendement autour de 15 % [Fch-00]. Le Tableau A1.18 illustre ces deux aspects [All-02].

Type d'émission	Moteur à combustion interne	Véhicule à PAC	
NO _x	10-200 ppm	Moins de 1 ppm	
СО	200- 5.000 ppm	Moins de 1 ppm	
Des autres hydrocarbonés	100 – 600 ppm	15 ppm	

Fableau A1.18	Comparaison	des	émissions	polluantes	[Mic-01]
	r			P	[]

Tout cela montre que l'hydrogène combiné avec une PAC est un carburant très favorable à l'amélioration des conditions environnementales.

A1.10.2 Coût économique

Le coût du kWh dépend de nombreux facteurs : coût de l'énergie primaire, méthode de production, transport, stockage, taille, etc. En conséquence, ces aspects limitent l'exploitation des données présentées, car chaque application exige une étude particulière. Le Tableau A1.19 donne un ordre de grandeur des coûts de production de l'hydrogène [All].

		€ / kg	c€ / kWh
Production (avec gaz naturel)	Gaz sous pression (gros) Gaz sous pression (détail) Gaz liquéfié (détail) Electrolyse*	0.83 3.78 9.2 1.32 - 2.64	2.5 11.3 27.3 4 - 8
Stockage	Comprimé surface	0.7	2.1
	Liquéfié	1.3	3.9
	Souterrain	1-3.9	3 - 11.7
Transport	Pipeline gazeux	0.45 - 1.3	1.35 - 3.9
	Liquéfié	2.0 - 2.3	6.0 - 6.9

Tableau A1.19 Coût économique de l'hydrogène

* Pour l'électrolyse, l'électricité est d'origine hydraulique hors pics de consommation

Malgré la diversité des valeurs, on constate qu'actuellement le prix du kWh d'hydrogène est plus cher que le prix du kWh fourni à partir de la source d'énergie primaire (Voir Tableau A1.20). L'hydrogène est donc encore un vecteur d'énergie cher, même si la différence dans certains cas n'est pas considérable. Par conséquent, son utilisation en masse exige une amélioration tant de son mode de production que de sa transformation.

	c€ / kWh
Essence (0,23 €/litre)	1.6
Gaz naturel (8 c€/Nm ³)	1.1
Electricité	4 - 12

Tableau A1.20 Coûts du kWh à partir des sour	rces d'énergie classiques
--	---------------------------

En conclusion, cette étude sommaire a permis de constater une grande dépendance des énergies fossiles dont les réserves seront épuisées dans un avenir relativement proche. En outre, la combustion massive de ces énergies fossiles a conduit à une augmentation inquiétante des gaz à effet serre qui ont déjà eu des conséquences environnementales graves.

Malgré l'exploitation croissante des énergies renouvelables, la dépendance des énergies fossiles va se maintenir dans l'avenir surtout du fait de la consommation du pétrole pour le transport. Pourtant, dans ce contexte énergétique, l'élément fondamental sera toujours l'électricité. En effet, l'électricité est un vecteur d'énergie irremplaçable, même s'elle présente certaines limitations.

Grâce à des caractéristiques complémentaires de celles de l'électricité, l'hydrogène peut devenir un futur vecteur d'énergie. Pour cela, ses filières doivent encore se développer, car l'état de l'art ci-dessus a montré qu'elles ne sont pas technologiquement mures, notamment concernant le stockage.

Enfin, il est sûr que l'utilisation de l'hydrogène passe nécessairement par le développement des PAC, mises en avant par des caractéristiques favorables (haut rendement, large gamme de puissance, peu polluante, etc.). En effet, seule la transformation de l'hydrogène utilisant une PAC lui permettra de jouer le rôle d'un vecteur d'énergie fiable, propre et performante dans l'avenir.

<u>ANNEXE II</u> Les differents types de piles a combustible

Les cinq différents types de PAC sont présentés ci-dessous. Cette description concerne aussi bien le mode de fonctionnement que l'état de développement actuel.

A2.1 Piles a combustible à membrane polymère échangeuse de proton

Actuellement, la PEM appelée aussi SPFC (Solid Polymer Fuel Cell, c'est-à-dire pile à polymère solide) présente un état de développement avancé tel que c'est sur elle portent majoritairement la plupart des efforts de recherche et développement. En outre, de substantielles améliorations futures sont encore envisageables.

Caractéristiques générales

La température de fonctionnement d'une PEM se situe entre 60 et 100 °C (valeur optimale autour de 80 °C) pour des pressions allant de 1 à 4 atmosphères. La température est limitée par l'électrolyte, car il ne peut pas assurer une conductivité convenable des protons à partir de 100 °C du fait de son inaptitude à retenir l'eau. L'électrolyte est constitué d'un polymère solide, une membrane, habituellement de type Nafion, permettant l'échange de protons. Un point critique de la membrane est sa teneur en eau, ce qui oblige à un contrôle soigneux pour favoriser le transport des ions.

A cause de sa basse température de fonctionnement, la PEM a besoin de catalyseurs en métal précieux, en l'occurrence le platine. Grâce aux récents progrès, la quantité nécessaire de platine a considérablement diminué, se situant autour de 0.25 g/kW.

La présence de catalyseurs rend la PAC très sensible aux impuretés du carburant. Or, la présence de CO doit être limitée, entre 20 et 100 ppm. Ceci oblige donc à alimenter la PAC en hydrogène pur, directement ou par reformage externe. Par contre, le CO_2 ne pollue pas la pile et le combustible peut donc être l'air ambiant.

Le rendement électrique peut atteindre 40 %. La cogénération est rendue très difficile par la basse température. Il existe néanmoins quelques unités fonctionnant en cogénération, ce qui montre la viabilité de la PEM dans bien des cas.

La densité de courant dans une celle de PAC varie entre 600 et 750 mA/cm² pour des tensions maximales autour de 700 mV. La densité de puissance peut osciller entre 420 et 500 mW/cm².

Etat de développement

La gamme d'applications et de puissance possibles est très vaste. Elle peut varier de quelques watts pour des micro-PAC à plusieurs centaines de kilowatts pour des applications stationnaires en cogénération.

A l'heure actuelle, les principaux points forts des PEM sont les suivants :

- La rapidité au démarrage à température ambiante, (elle peut déjà fournir 50 % de sa puissance nominale) et sa densité énergétique élevée (elle peut atteindre 1 kW/l sans auxiliaires) font d'elle une PAC mieux adaptée aux applications de type transport que les autres catégories de piles.
- Sa production industrielle moins coûteuse et moins problématique que pour les autres types de PAC.

De plus, elle n'a pas encore atteint sa maturité technologique, ce qui permet d'être optimiste quant à d'éventuelles améliorations en terme de performances et de coût.

Parmi les constructeurs de PEM, le plus important est sans doute Ballard Power Systems (Canada). Cette compagnie offre la plus large gamme de puissance ; elle a acquis une grande connaissance et une expérience solide tant dans le domaine du transport que du stationnaire. Ceci a été favorisé par les nombreux projets de collaboration tels le projet NECAR avec Daimler Benz ou la collaboration avec Alstom pour la réalisation d'unités de cogénération de 250 kW environ.

On peut aussi citer d'autres compagnies comme Nuvera en Italie ou Siemens qui travaille à partir de brevets de General Electric pour des applications militaires et H Power (Etats Unis) qui fabrique des « micropiles ». En France, Axane filiale d'Air Liquide est la plus importante compagnie travaillant au développement de PAC avec des prototypes allant de 200 W à quelques dizaines de kilowatts. Signalons également les travaux du CEA qui dispose d'une filiale industrielle visant elle aussi à la commercialisation de PEM dans le futur.

Le principal problème pour la phase de commercialisation est évidemment le coût économique mais il ne faut pas négliger certains aspects techniques à améliorer.

A2.2 Pile a combustible à acide phosphorique

Les PAFC sont à un stade de commercialisation bien plus avancé que toutes les autres piles ; Actuellement, quelques dizaines de MW sont déjà installés.

Caractéristiques générales

La température de fonctionnement se situe entre 180 °C et 220 °C pour des pressions allant jusqu'à 6 atmosphères. La corrosion du carbone et du catalyseur ainsi que l'évaporation de l'électrolyte limitent les températures.

L'électrolyte est un acide phosphorique, H_3PO_4 à 100%, qui est stable, bon conducteur ionique à haute température et capable de solubiliser l'oxygène. Cet acide est contenu dans une matrice de carbure de silicone.

A cause de la relative basse température de fonctionnement, on utilise dans les électrodes en carbone poreux un catalyseur : le platine à hauteur de 0.8 g/kWnet. Ceci rend par conséquent la PAFC sensible à l'empoisonnement de l'anode par le CO (maximum; 1 % de CO en volume) et par l'hydrogène sulfuré, H_2S . Le combustible, généralement du gaz naturel ou du méthanol, doit être reformé préalablement.

Le rendement électrique des PAFC est presque toujours constant, de l'ordre de 36 % à 40 %. Le rendement thermique dépend énormément de la température de sortie. Pour une PAFC, la quantité de chaleur libérée permet de l'utiliser en cogénération.

Actuellement, la tension de sortie des PAFC peut varier entre 600 et 800 mV pour des densités de courant de 100 à 400 mA/cm². La densité de puissance oscille entre 80 et 240 mW/cm².

Grâce au retour d'expériences, on peut affirmer qu'une PAFC a un taux de disponibilité moyen de 95% et qu'elle est capable de fonctionner pendant plus de 40.000 h.

Etat de développement

Durant la dernière décade, cette PAC a donné lieu au plus grand nombre d'études. Le grand projet du gouvernement américain PC-25 s'est focalisé sur les PAFC. De ce fait, son état de développement actuel est très avancé. En outre, elle est déjà dans la phase de commercialisation : la firme O.N.S.I. filiale de UTC Fuel Cells, (ancien International Fuel Cell) et de Toshiba commercialise une unité de 200 kW électriques et 200 kW thermiques.

Cependant l'intérêt pour les PAFC a notablement diminué ces dernières années. Ainsi, des entreprises comme UTC Fuel Cells ou Tokyo Electric Power Company (après plus de vingt ans de recherche sur les PAFC) ont annoncé l'arrêt de leurs projets de recherche pour se recentrer dorénavant sur les autres types de PAC. Les raisons qui expliquent cela sont diverses.

- Le coût reste toujours élevé pour des densités de puissance faibles.
- Cette technologie présente déjà quelques limites techniques qui réduisent considérablement l'espoir de réduire le coût et d'augmenter la durée de vie.

Le dernier handicap concerne la solidification de l'électrolyte vers 42 °C avec augmentation de volume. Il faut donc toujours maintenir la PAC à une température supérieure à 45 °C pour éviter l'endommagement des électrodes, même à l'arrêt.



Figure A2.1 Installation réelle d'une PAFC -projet PC-25

A2.3 Pile a combustible alcaline

Les AFC ont été les premières à être utilisées. Les missions spatiales, GEMINI et APOLLO des années 60 disposaient déjà d'une AFC. Actuellement, elles continuent à être utilisées comme source d'énergie pour des satellites.

Caractéristiques

L'AFC travaille à basse température entre 60 °C et 80 °C à pression atmosphérique. Cependant, cette température peut arriver jusqu'à 230 °C, si la pression est élevée. L'AFC nécessite l'utilisation de métaux précieux à la cathode, tandis qu'à l'anode, le nickel est suffisant. Ceci conduit à une puissance spécifique moindre que celle des PEM.

L'électrolyte utilisé est un liquide constitué d'une solution d'hydroxyde de potassium, KOH, dont la concentration peut varier en fonction de la température. Cet électrolyte est très sensible au CO et CO₂, ce qui impose l'utilisation d'oxygène et hydrogène très purs. Cela conjugué avec sa relativement faible puissance spécifique fait que l'intérêt porte aux AFC a diminué dans les dernières années.

La tension de sortie peut varier entre 600 et 800 mV avec une densité de courant de 100 à 400 mA/cm² fournissant une puissance de 80 à 240 mW/cm². Les rendements théoriques, avec l'hydrogène comme carburant, sont un peu inférieurs à 60 %.

Etat de développement

Les AFC sont utilisées presque exclusivement pour des applications spatiales et militaires. Cette limitation est due principalement aux problèmes de la carbonatation de l'électrolyte, même si quelques avancées technologiques ont eu lieu. Egalement, sa sensibilité au CO₂ limite toujours son utilisation à des applications très exigeantes.

La compagnie ZeTek Power Corporation (Royaume Uni) qui a repris les activités d'Elenco (Belgique) fournit actuellement une PAC très innovatrice éliminant le CO_2 de manière originale. Plusieurs prototypes ont été déjà réalisés ; véhicule électrique, PAC embarquée dans un bateau... Parallèlement, Westhinghouse avec ASTRIS (Canada) essaie aussi de développer un stack commercial de petite puissance.

A2.4 Pile a combustible à méthanol direct

Le principe de fonctionnement des DMFC est très similaire à celui des PEM.

Caractéristiques

Ce type de PAC fonctionne à basse température, de 60 °C jusqu'à 100 °C en fonction de la pression. L'électrolyte utilisé est généralement un acide fort pour rejeter le gaz carbonique produit par la réaction. Actuellement, le rôle de cet électrolyte solide est joué par une membrane échangeuse de protons. C'est pourquoi les DMFC sont parfois considérées comme un type particulier de PEM. Leur particularité est de pouvoir être alimentées directement en méthanol sans besoin d'un reformeur externe. En fait, l'anode est capable de consommer le méthanol par oxydation, sans transformation en hydrogène.

Cependant cela conduit à des valeurs de densité de puissances faibles, car la réactivité du méthanol est plus faible que celle d'hydrogène. De plus, elles nécessitent une grande quantité de platine comme catalyseur ; environ 2 mg/cm².

Ce type de PAC permet d'obtenir des densités maximales de puissance de 200 mW/cm² avec des densités de courants de 100 à 200 mA/cm² et des tensions se situant entre 500 et 600 mV.

Etat de développement

Même si ses performances sont plus faibles que celles obtenues pour une PEM, la DMFC semble un type de pile très prometteur. C'est dans ce sens que sont menées diverses actions :

- Des recherches pour réduire la quantité de platine grâce aux travaux réalisés par Johnson Matthey.
- L'utilisation accrue des DMFC pour des applications transport du fait du type de carburant utilisé. Sous certains aspects, le méthanol présente de meilleures caractéristiques que l'hydrogène lorsqu'on l'utilise à grande échelle.
- La mise en commun des recherches sur les DMFC et les PEM.

Néanmoins, certains problèmes techniques doivent encore être résolus :

- La grande solubilité du méthanol dans les électrolytes provoque une perte de combustible d'environ 10 % du fait de son passage non-désiré à la cathode. Ceci fait chuter le rendement.
- La formation de sous produits d'oxydation comme le CO, exige des catalyseurs additionnels pour oxyder le CO en CO₂.
- La séparation du CO₂ et du méthanol résiduel en sortie de pile.

Parmi les principaux producteurs, il faut citer Jet Propulsion Laboratory (Etats Unis), et Siemens. Il faut aussi remarquer la quantité de brevets propriétés de Ballard, même si ce dernier est avant tout un producteur de PEM.

A2.5 Pile a combustible à oxyde solide

Les SOFC travaillent à la température la plus élevée. Elles sont parmi les plus prometteuses.

Caractéristiques générales

Les SOFC fonctionnent avec une température entre 650 °C et 1.000 °C. Cette température élevée est nécessaire pour permettre à l'électrolyte (céramiques à base de d'oxydes, généralement des zircones stabilisés) de posséder une conductivité protonique suffisante. L'anode se compose principalement de nickel qui est suffisamment stable en milieu réducteur. Le fer est aussi employé. A la cathode, les manganites de lanthane apparaissent comme les mieux adaptés.

La SOFC n'a pas besoin de catalyseur précieux comme le platine du fait de sa haute température de fonctionnement. Ainsi, des catalyseurs à base de nickel et d'oxydes suffisent.

La configuration entièrement solide permet plusieurs structures. Les plus importantes sont listées ci-dessous :

- **Tubulaire.** Il s'agit d'un empilement de tubes en zircone stabilisé au calcium se connectant en batterie. Ils sont fermés à l'une de leurs extrémités. Ces tubes sont recouverts de plusieurs couches successives qui constituent les parties de la PAC. Dans cette technologie, la circulation s'établit de l'intérieur du tube où circule l'air vers la périphérie, le carburant, hydrogène ou méthane, étant à l'extérieur. Cette technologie est la plus ancienne et aussi la plus développée.
- **Planaire.** Elle consiste en un sandwich de plaques céramiques reliées par l'interconnecteur séparant le combustible du comburant. Cette configuration peut être aussi subdivisée en deux autres parties en fonction de la circulation du carburant et du combustible : « cross flow » et « counter flow ».

Certains auteurs mentionnent aussi une troisième topologie « monolithique » mais cette dernière n'en est qu'au stade expérimental [Ste-00].

Les rendements énergétiques envisageables sont très hauts. Le rendement électrique peut aller jusqu'à 55%, ce qui peut être encore amélioré par un fonctionnement en cogénération ou par un cycle combiné.

Un avantage majeur des SOFC est sa grande densité de puissance : $260 \text{ à } 335 \text{ mW/cm}^2$. La tension maximale varie entre 650 et 840 mV et la densité de courant entre 200 et 400 mA/cm².



Figure A2.2 Comparaison des rendements d'une SOFC (avec et sans cycle combiné) avec une micro turbine

Etat de développement

Bien qu'actuellement les SOFC ne soient pas aussi performantes que les PEM, elles représentent une technologie très prometteuse pour le long terne, surtout pour des applications stationnaires. En effet, elles commencent à susciter de nombreuses études grâce à leurs bonnes performances. Néanmoins, leur coût demeure plus important. C'est la conséquence de leurs caractéristiques : meilleure potentialité pour le rendement électrique, densité de puissance, le coût unitaire et plus grande diversité de combustibles.

Les prototypes construits jusqu'à présent varient d'une puissance de quelques kilowatts à plusieurs centaines de kilowatts. Toutefois, certains projets envisagent son utilisation pour des valeurs extrêmes : quelques mégawatts ou quelques centaines de watts.

Le fonctionnement à haute température des SOFC présente des avantages indéniables présentés précédemment. Mais il est à signaler que ceci peut aussi créer des contraintes.

Citons par exemple le coût élevé des interconnecteurs, la nécessité de tenue chimique et mécanique des matériaux utilisés à la température de fonctionnement et également la limitation de la durée de vie. C'est pourquoi les recherches actuelles essaient de faire descendre cette valeur de température. Dans ce sens, la voie la plus étudiée consiste à doper l'électrolyte par adjonction d'oxydes de terres rares, puisque cela permet d'accroître la conductivité protonique à une température plus basse. Les SOFC sont moins sensibles aux problèmes de corrosion du fait que dans ce type de PAC tout est à l'état solide. Ceci facilite également la gestion de l'électrolyte.

Une autre préoccupation des fabricants est la réduction des chutes ohmiques ioniques, principalement à la cathode. Cela permettrait d'améliorer énormément les performances.

Parmi les principaux producteurs, citons Siemens depuis qu'il s'est rallié à Westinghouse (Etats Unis), principal acteur dans cette technologie. D'autres compagnies présentées dans le domaine sont par exemple, Allied Signal, Ceramatec aux Etats Unis, Sulzer en Europe et CFCL en Australie. En France, Gaz de France est le chef de file pour développer cette technologie.

A2.6 Pile a combustible à carbonate fondu

Les MCFC font partie aussi des PAC à haute température. Néanmoins, leur technologie n'est pas aussi avancée que celle des SOFC.

<u>Caractéristiques</u>

La température de fonctionnement d'une MCFC oscille entre 600 °C et 700 °C pour des pressions entre 1 et 6 atmosphères. L'électrolyte utilisé est un mélange de carbonates de lithium et de potassium qui a un point de fusion relativement bas autour de 488 °C. Ces carbonates fondus sont insérés dans une matrice poreuse inerte à base d'alumine. Les électrodes sont de type poreux à gaz en alliage nickel-chrome ou nickel-lithium.

Grâce à leur haute température de fonctionnement, les MCFC présentent plusieurs aspects intéressants comme par exemple: un rendement théorique élevé, la possibilité de cogénération ou de cycles combinés, la possibilité de reformage interne sur l'anode...

Cette PAC peut travailler sans catalyseur noble, il suffit de composés à base de nickel. Elle est insensible aux polluants, elle peut même consommer du CO. Tout cela ouvre la porte à des carburants comme par exemple le méthane, l'hydrogène ou le gaz naturel.

La tension de sortie peut varier entre 750 et 900 mV avec une densité de courant de 100 à 200 mA/cm². La puissance oscille entre 900 et 150 mW/cm². Les rendements sont très élevés, ils peuvent atteindre 85 %, si la PAC travaille en cogénération.

Etat de développement

Malgré leurs bonnes caractéristiques, actuellement, les MCFC présentent de nombreux problèmes techniques qui empêchent leur développement et qui subsistent, bien que de nombreuses études aient été engagées dans les dernières années pour les surmonter.

Le problème le plus important est la corrosion de l'oxyde de la cathode à cause du milieu très corrosif et de la température de fonctionnement. En plus, la corrosion provoque une détérioration accélérée des plaques d'interconnexion. Ces deux aspects, conjugués avec la perte d'électrolyte par évaporation ou par les différentes réactions de corrosion, limitent énormément la durée de vie. Un autre aspect négatif est sa sensibilité électrique aux variations de la température de fonctionnement : une variation de 40 °C provoque une chute de tension de 15 %.

Un dernier handicap est le nombre important d'auxiliaires. Ils sont nécessaires non seulement pour le fonctionnement en régime permanent mais aussi pour le démarrage de la PAC, phase critique pour les MCFC. Par conséquent, cela augmente considérablement le coût d'investissement.

Des nombreux prototypes ont été construits pour des puissances variant entre quelques dizaines de kilowatts et plusieurs mégawats. Bien que ce soit au Japon qu'aient eu lieu les des efforts les plus importants pour développer ce type de PAC (Hitachi, Mitsubishi...), l'unité la plus importante mise au point l'a été à Santa Clara (Etats-Unis), elle a travaillé en cogénération et développé une puissance électrique de 2 MW.

En Europe, plusieurs unités ont été construites avec des puissances beaucoup plus faibles (autour de 280 kW) par plusieurs compagnies : Ansaldo (Italie), Brandstofel Nederland (Pays Bas) et MTU (Allemagne).

<u>ANNEXE III</u> <u>Etude technico-economique d'une application</u> <u>Stationnaire</u>

Le but de cette étude est de définir le secteur actuel du marché le mieux adapté pour une PAC dans la perspective d'une future commercialisation. On considèrera donc la viabilité économique ainsi que les difficultés techniques à dépasser.

L'étude concerne essentiellement les PEM et les SOFC. Néanmoins, on pourra avoir recours à des données relatives à d'autres types de piles vu le peu d'information dont on dispose en raison de l'immaturité technologique et de la confidentialité de beaucoup d'études.

Ce travail s'intéresse principalement à des applications stationnaires de 50 à 200 kW dans le contexte de la production décentralisée.

Diverses raisons nous ont conduits à ce choix.

- Le rapprochement possible avec le domaine du transport.
- La taille du marché envisageable.
- La faisabilité d'une PAC d'une telle puissance.
- La disponibilité d'information via le projet européen FEBUSS.

Dans ce contexte, les principales sources d'énergie susceptibles de rivaliser avec la PAC sont:

- Le diesel.
- Les microturbines.
- Les turbines à gaz.

Dans cette étude, on ne tiendra pas compte des éventuelles réductions du coût suite à une augmentation de la production [Fch-00]. Cet aspect reste très difficile à évaluer, même si une « économie de production » apparaît comme la meilleure option pour le développement initial de la PAC.

L'étude présente d'abord les différents critères (économiques ou techniques) à considérer en vue d'un développement commercial de la pile après avoir décrit la méthode économique retenue pour évaluer le coût d'un générateur à PAC.

A3.1 Critères technico-economiques

A3.1.1 Coût d'un générateur à PAC

Actuellement, il n'existe pas d'approche universelle pour analyser la viabilité d'une application utilisant une PAC [Mye-02]. L'optique varie en fonction de l'application. Ainsi, dans certains cas, on s'intéresse surtout au prix du kWh produit- c'est le cas pour des installations fonctionnant en cogénération ou pendant un grand nombre d'heures [Fch-00][Lea-02][Mic-01][Ame-01][Lok-03].

Par contre, dans d'autres cas, la viabilité est déterminée par une comparaison du coût total de l'installation par rapport aux sources concurrentes, car la quantité d'énergie à produire n'est pas considérable. Ce sera par exemple le cas de systèmes travaillant comme sources de secours.

Notre étude sera basée sur la première approche, car elle est la plus couramment utilisée [Mye-02][Mcl-03].

L'équation pour déterminer le coût du kWh produit peut être représentée de plusieurs manières en fonction de l'information disponible (coût total ou coût par kW de l'installation) et des critères à évaluer (heures de fonctionnement, coût de carburant...). Les deux relations les plus courantes sont les équations (A3.1) et (A3.2).

$$C_E = \frac{K_{Am} \cdot C_T}{Energie_{PAC}} + \frac{K_F \cdot (C_C - C_{chaleur})}{\eta} + \frac{C_{M\&F}}{Energie_{PAC}}$$
(A3.1)

$$C_E = \frac{K_{Am} \cdot C_T}{H} + \frac{K_F \cdot (C_C - C_{chaleur})}{\eta} + \frac{C_{M\&F}}{H}$$
(A3.2)

Avec :

C _E	Coût du kWh produit, €/kWh.	C _C	Coût du combustible, c€/kWh.
CT	Coût d'investissement total, c€.	$C_{M\&F}$	Maintenance et coût divers totaux, c€.
η	Rendement global du système.	Н	Heures de fonctionnement, en miles.

K_{Am} Facteur d'amortissement et d'intérêt pour la période analysée.

- K_F Facteur représentant l'inflation du combustible.
- C'_T Coût d'investissement par kWh, c€/kWh.

C'_{M&F} Coût de maintenance et coût divers par kWh, c€/kWh.

Le premier terme de l'équation représente l'influence du coût d'investissement. Le suivant concerne le coût du combustible (coût de production) en tenant compte de la possibilité d'exploiter la chaleur. La dernière partie correspond au coût de maintenance et aux coûts divers. On pourrait aussi faire apparaître les points positifs tels la réduction des émissions polluantes. Cependant, cela reste très difficile à évaluer fortement dépendant de chaque cas.

En se basant sur certaines applications réelles [FEBUSS][Mye-02][Mcl-03], une analyse de l'influence de la durée de fonctionnement, du prix du combustible et du coût d'investissement a été faite. Les Figure A3.1 et illustrent les résultats obtenus avec les paramètres suivants :

η =	0.35	$K_{Am} =$	0.125
	2.5 c€/kWh	$C_{chaleur} =$	0 c€/kWh



Les valeurs obtenues sont similaires à celles présentées dans la littérature [Lok-03][Mye-02][Fch-00].

On constate que le coût d'investissement pourrait être atténué si le système avait une durée de vie allongée et si le prix du combustible restait toujours bas. Cependant, cela exigerait des durées de fonctionnement de l'ordre de 8.000 h/an, ce qui ne peut actuellement être assuré par une PAC. De plus, le système se montre très sensible à une modification même mineure du coût du combustible.

Les coûts obtenus sont notablement supérieurs à ceux des générateurs classiques de grande puissance (énergie nucléaire : $1.8 - 3 \text{ c} \in /kWh$, cycle combiné : $2.48 - 3 \text{ c} \in /kWh$) ou ceux d'une production décentralisée (éolien 5 - $8.5 \text{ c} \in /kWh$). De ce fait, on peut exclure l'utilisation d'une PAC pour produire uniquement de l'énergie électrique. L'exploitation de la chaleur ou une réduction substantielle des coûts serait nécessaire pour rendre viable cette utilisation.

A3.1.2 Coût d'Investissement

Le coût d'investissement est évidemment le facteur le plus déterminant pour connaître la viabilité économique. Actuellement, ce coût est très élevé et par conséquent les efforts visent sa diminution. Le coût d'un cœur de PEM est aux environs de 1000 €/kW et pour une SOFC, c'est encore plus élevé [Fch-00][FEBUSS][FCT].

Le coût du kW installé est très variable suivant les générateurs. Il peut atteindre 10.000 €/kWh [Lok-03]. Cependant, il faut souligner sa constante décroissance : les coûts se sont vus divisés par dix durant cette dernière décade suite à l'intérêt porté à ces sources [Fch-00].

Les éléments qui entraînent un coût élevé de la PEM sont :

- La plaque bipolaire faite avec du graphite doté de caractéristiques bien précises.
- La membrane, généralement en *Nafion* fourni par la compagnie Dupont, (300-400€/m²).
- Les électrodes à cause du platine.

Ces constituants représentent plus de 80 % du coût total de la PAC ; il faut donc viser à faire baisser le prix de ces trois éléments [Gal-01]. Dans ce sens, la diminution de la quantité de platine représente un espoir ; on en utilise en effet 20 fois moins qu'auparavant [Lar-00][Ste-00][Bar-02].

Les auxiliaires influencent considérablement le coût d'investissement, car ils représentent plus d'un tiers du coût total : principalement du fait du reformeur et de l'IP. Il est à noter que les auxiliaires sont rarement optimisés pour les PAC et on peut donc raisonnablement envisager une réduction de leur coût dans l'avenir [Gal-01].

Les actions gouvernementales ont également été décisives pour inciter le développement par une « économie de production ». Le gouvernement américain a été jusqu'à subventionner des projets à hauteur de plus de 1.000 €/kW avec pour objectif de stimuler la production de PAC en masse, de faire descendre les prix et d'élargir le marché [Gal-01]. Les producteurs prévoient un développement des PAC par une « économie de production » plutôt que par une « économie d'adaptation à l'application » [Fch-00].

	Moyen terme	Long terme
PEM	<1000 €/kW	< 500 €/kW
SOFC (exploitation de la chaleur)		< 800 –1000 €/kW

Tableau A3.1 Objectifs des coûts économiques [Fch-00][Lok-03]

Pour les principaux générateurs concurrents de la PAC les prix sont indiqués ci-dessous.

Source d'énergie	Prix
Diesel	≈ 300 et 500 € / /kW
Microturbine	≈ 1.000 – 600 € / /kW
Turbine de gaz	$pprox 600 - 400 \notin / kW$

Tableau A3.2 Coûts d'investissement des moyens de production [Bus-01][Mus-98]

Dans certaines applications stationnaires (ASI et cogénération résidentielle), les PAC doivent être comparées à des batteries et des chaudières. Leurs coûts sont précisés ci-dessous :

- Prix d'une **chaudière** pour un appartement moyen français : 700 3.000 € [Tou-04].
- Prix d'une **batterie** entre 150 et 600 €/kWh selon le type.

En définitive, le coût d'investissement constitue un handicap majeur pour le développement du marché des PAC. Pour que celle-ci devienne compétitive dans le contexte de la production décentralisée, le prix – avec tous les auxiliaires inclus - devrait être un peu inférieur à 1.000 €/kW.

A3.1.3 Coût du carburant

Après le coût d'investissement, celui de l'hydrogène conditionne notablement le coût du kWh produit par la PAC et donc la rentabilisation de l'investissement.

Le prix du kWh d'hydrogène peut varier énormément : entre 2.5 et plus de 30 c \in /kWh en fonction de la source d'énergie primaire [All]. Comme il a déjà été indiqué, le gaz naturel transformé par un reformeur (externe ou interne) est devenu le carburant le plus utilisé pour la production d'hydrogène des PAC lors d'un fonctionnement continu (Voir Annexe 1).

L'influence du carburant sur la viabilité économique se traduit de deux manières :

• par son coût, directement (Voir Figure A3.1).

• par une réduction du rendement dans le cas où un reformeur est utilisé.

A3.1.4 Coût du comburant

Dans la plupart des applications, le comburant est l'oxygène pris dans l'air ambiant et donc gratuit. L'autre moyen pour approvisionner en oxygène est le stockage à très haute pression, mais celui-ci reste toujours très marginal [Fch-00][Tou-04].

Pour des applications stationnaires de plus de 10 kW, un compresseur est employé pour comprimer l'air ambiant et ainsi augmenter les performances physiques de la pile. Le coût du comburant peut donc être assimilé à celui de l'énergie demandée par le compresseur (réduction du rendement). Cette énergie, habituellement prise directement en sortie de pile, peut représenter jusqu'à 15 % de la puissance au régime nominal [Lar-00].

Le dimensionnement du compresseur n'est pas évident, car il implique un compromis entre plusieurs facteurs : la durée de vie, les performances, la consommation d'énergie... [Lar-00] La Figure A3.3 et la Figure A3.4 illustrent son importante influence sur les aspects énergétiques.



Figure A3.3 Influence du compresseur [Bez-98][Lar-00]

La présence du compresseur modifie le point de fonctionnement optimal ce qui altère notablement le rendement global, et évidemment, augmente le coût d'investissement.

Notons enfin qu'à cause de la pollution de l'air ambiant, l'air doit être filtré dans tous les cas, ce qui renchérit le système.

A3.1.5 Coûts divers

D'autres coûts, moins cruciaux que ceux déjà présentés, conditionnent également la viabilité économique de l'installation. Il s'agit principalement du coût de maintenance et du coût de d'installation. Actuellement, ces coûts sont difficilement évaluables du fait du manque de maturité de cette technologie et de la diversité des applications.

Le coût de maintenance dépend énormément du type d'installation, de la manière dont on génère le combustible, du nombre d'heures de fonctionnement, des auxiliaires employés et de la nature de l'ES (batteries, supercapacités...). Ce coût peut être estimé à environ 2.5 c€/kWh pour des systèmes en cogénération [Lok-03] et 0.05 c€/kWh pour des systèmes en back-up [Ruh-00]. Pour le futur, on peut espérer, une réduction d'environ 40 % [Lok-03].

Pour ce qui est des sources d'énergie concurrentes, ce coût est généralement favorable à la PAC. Par exemple, le coût d'un générateur diesel est autour de 0.35 c€/kWh en back-up [Ruh-00].

Egalement, le **coût d'installation** dépend énormément de l'application. Ainsi, dans certains cas, la PAC peut être facilement intégrée dans l'installation déjà existante comme par exemple les ASI ou des systèmes de Back-up. Le coût de l'interfaçage de puissance peut être « atténué » et donc le surcoût en utilisant une PAC est moindre. Dans d'autres cas au contraire, on ne peut rien conserver de l'installation existante.

Mis à part le cas du générateur diesel, le coût d'installation n'est pas un facteur militant en faveur de la PAC.

Le tableau ci-dessous résume ce qui vient d'être présente et précise les perspectives à venir.

Coût	Etat actuel	Objectif	Remarques
Coût d'investissement	SOFC : très variable mais toujours >1500 €/kW PEM ≈ 1000 €/kW (sans auxiliaires)	SOFC 800 –1000 €/kW PEM > 500 €/kW	Principale limitation Réduction en optimisant les auxiliaires
Coût du carburant	Hydrogène 1.3 - 30 c€/kWh	Optimisation du reformeur	Très important Pour l'avenir, utilisation d'un reformeur
Coût du comburant	Air, habituellement comprimé	Optimisation du compresseur	Il permettra l'amélioration du rendement
Coût de maintenance	0.05 – 2.5 c€/kWh	Réduction d'au moins 40 % De 2.5 à 0.5 c€/kWh	Aspect favorable
Coût d'installation	Dépendant de l'application		Aspect favorable

Tableau A3.3 Synthèse des coûts



Figure A3.4 Comparaison des rendements théoriques (Température ambiante = 25 C°) [Bra-99]

A3.1.6 Rendement

Le coût du kWh produit varie en fonction du rendement moyen du système. Ce paramètre est l'un de ceux qui milite en faveur de la PAC, car il n'est pas limité par le cycle de Carnot

comme c'est le cas pour les micro turbines, les générateurs diesel et les autres moteurs à combustion (Voir Figure A3.4). En fait, bien que le rendement soit dépendant de plusieurs paramètres (taille du générateur, auxiliaires employés...), il est toujours favorable à la PAC.

En définitive le rendement moyen électrique réel pour une PAC se situe entre 35 % et 55 % et il est supérieur à ceux des sources concurrentes.



Figure A3.5 Performances comparées en fonction de la taille

Cependant, dans la plupart des cas, les rendements donnés pour les PAC ne concernent que la partie électrique sans tenir compte des auxiliaires qui altèrent le rendement.

De récentes études et expériences ont fourni des valeurs plus proches de celles que l'on obtiendra avec des systèmes produits en masse [Tou-04][Lok-03]. On se situera entre 24 % (pour une SOFC d'une dizaine de kilowatts avec reformeur exploitant la chaleur produite) et 35 % [Tou-04][Mic-01].

A3.1.7 Cogénération et cycle combiné

Comme on l'a déjà dit, le fonctionnement en cogénération ou cycle combiné permet d'augmenter le rendement de la PAC jusqu'à des valeurs entre 60 et 75 %.

La possibilité de cogénération pour une PEM est assez limitée à cause de la basse température de fonctionnement ; on dispose d'une eau à moins de 90 °C. Néanmoins, il existe déjà des systèmes expérimentaux comme celui fournissant 250 kW électrique et 237 kW thermique mis au point par Ballard et Bewag à Berlin avec une eau sortant à 85 °C [Koh-01].

Par contre, l'utilisation d'une SOFC implique nécessairement l'exploitation de la chaleur produite. Principalement, parce que son coût élevé d'investissement oblige à rentabiliser au maximum ses caractéristiques. D'autre part, les très hautes températures de fonctionnement, supérieures à 600 °C, facilitent son exploitation. Le cycle combiné avec une SOFC reste toujours limité aux applications de fortes puissances sans espoir de commercialisation à moyen terme.

A3.1.8 Durée de vie et dégradation

La durée de vie de l'installation est un aspect fondamental, puisqu'il entre en ligne de compte de manière décisive dans l'amortissement du fait du fort coût d'investissement initial [Fch-00][Lea-02].

La valeur souhaitable dépend énormément du type d'application. Pour des applications stationnaires, l'objectif de durée de vie doit être au moins de 40.000 heures : 5 ans en régime continu ou 10 ans en régime hivernal.

Malgré son importance, ce paramètre n'est pas très bien connu actuellement du fait du faible retour d'expérience. Cependant, certains projets récents permettent de donner quelques informations. Parmi eux, il faut indiquer PC 25 – C déjà présenté [Bra-99].

- Il existe deux systèmes qui ont réussi à fonctionner durant plus de 40.000 h, l'un se trouve aux Etats Unis et l'autre au Japon. Quatorze autres ont dépassé les 35.000 h.
- La plus longue période sans arrêt enregistrée est de 9.500 h. (plus d'un an). Ce record a été enregistré par la compagnie Tokyo Gaz dans une unité basée à Tokyo pour l'alimentation d'un bâtiment de bureaux. Ce système a été arrêté par obligation de maintenance imposée par les normes.

Ces données correspondent aux PAFC de 250 kW. Concernant les PAC de très grande puissance, l'expérience d'une MCFC de 2 MW (16 modules· 125 kW) sise à Santa Clara (Californie, Etats Unis) est la plus importante [Eic-98]. Cette PAC a fonctionné à puissance nominale pendant 550 heures mais certaines modifications ont dû être faites à cause de problèmes électriques. Une fois ces problèmes résolus, la production électrique a recommencé mais cette fois en mode dégradé à 1 MW. Les problèmes perdurant, elle a été finalement arrêtée après 3.400 heures totales de fonctionnement.

Par ailleurs, il faut aussi mentionner **la dégradation** observée dans le cœur des PAC (pertes en tension). Celle-ci dépend en grande partie de la façon d'alimenter la PAC ; on peut relever les chiffres suivants concernant la chute de performance d'une cellule de type PEM :

- 4mV/1000 h. en cas d'alimentation en hydrogène pur [Gou-99].
- 40mV/1000 h. si l'alimentation en hydrogène est polluée par du dioxyde de carbone à 100 ppm [Gou-99].

Néanmoins, cela est très particulier aux PEM, car leur tension ne varie guère durant leur vie, mais elle s'écroule brutalement en fin de vie, ce qui empêche entre autres de prévoir ou d'estimer cette dernière. Les SOFC, par contre, voient leur tension se dégrader continûment [Tou-04].

La durée de vie est également fortement influencée par la quantité et le mode d'arrêt du système [Tou-04]. Ceci est valable pour tous les types de PAC, même si ceci est encore plus flagrant pour des PAC à haute température [Tou-04].

En conséquence, une application qui exige de nombreux arrêts et démarrages de la PAC, devrait être écartée comme application possible pour l'instant.

Donnons à titre de comparaison, la durée de vie moyenne des sources d'énergie concurrentes de la PAC :

12.000 heures pour un **moteur diesel** 30.000 heures pour une **microturbine**

Ces durées de vie peuvent varier en fonction de la puissance du système et d'autres facteurs tels la maintenance et l'environnement ; il ne s'agit que d'ordres de grandeur.

A3.1.9 Fiabilité

La fiabilité est un paramètre critique pour l'utilisation d'une PAC dans de nombreuses applications (ASI, source de secours). Malheureusement, cette donnée n'est généralement pas publiée par les constructeurs de PAC, ce qui rend difficile la réalisation d'une étude comparative. De plus, le manque de retour d'expérience limite l'extrapolation des données d'une application à une autre.

Source d'énergie	MTF(%)	FPA	Application
Turbine à gaz 50 kW	2.88	7	Plan de fiabilité pour des systèmes de GED en fonction des données réelles
Diesel	5	9.22	Systèmes isolés de faible puissance connectés à une source d'énergie renouvelable
PAC 1 kW (PEM)	0.0001	?	energypartners.org
PAC 250 kW (PA)	5	?	[Bra-99]

Le Tableau A3.4 montre les valeurs de fiabilité pour une PAC et pour les sources d'énergie concurrentes : turbine à gaz et groupe diesel.

Tableau A3.4 Fiabilité des moyens de production

Il faut noter que le chiffre de MTF de 0.0001% fourni par « energypatner.org » ne saurait être significatif car la durée de service de la PAC n'est pas fournie. En revanche, les chiffres extraits de [Bra-99] sont plus fiables en ce sens où la durée de fonctionnement est échelonnée sur plusieurs années. Par ailleurs, il s'agit des moyennes relevées sur plusieurs parcs et avec plusieurs types d'alimentation (hydrogène, méthane, butane, propane...) [Bra-99].

On constate ainsi que la disponibilité d'une PAC est parfaitement comparable à celle d'autres sources d'énergie concurrentes et ce, malgré sa jeunesse.

A3.1.10 D'autres criteres

Dynamique electrique dela charge

Comme on l'a déjà dit, la PAC doit être complémentée par une source auxiliaire d'énergie qui doit fournir l'écart entre la dynamique de la charge et celle fournie par la PAC. Cela constitue donc un surcoût économique additionnel (investissement et maintenance).

Pour atténuer son influence, l'application sélectionnée ne doit pas présenter des variations brusques et continues de puissance électrique. Egalement, une charge demandant une puissance constante facilite énormément le dimensionnement de la PAC et le choix du point de fonctionnement pour tous les auxiliaires.

<u>Gel de l'eau</u>

Le gel de l'eau au-dessous de 0 °C dans la membrane constitue un écueil pour le développement et la production en masse des PEM. En effet, dans certains cas, la membrane a été rendue inutilisable à cause du gel de l'eau produite lors du transport du générateur.

A l'heure actuelle, aucune solution très fiable n'a été trouvée [Tou-04][Gal-01].

Densité d'energie

Dans certaines applications, généralement les applications de type transport, le volume et le poids constituent des contraintes critiques. L'emplacement du générateur dans des applications stationnaires peut aussi être une contrainte. Dans tous ces cas, la PAC peut être une réponse favorable par rapport aux systèmes classiques de stockage, même si celle-ci dépend notablement des auxiliaires et du type de PAC. La Figure A3.6 illustre notre propos [Fch-00].



Figure A3.6 Densité de puissance et d'énergie

Emissions polluantes

Concernant les émissions (CO_2 , NO_2 , HC, CO, SO_2) sur place, la PAC est bien meilleure que les moyens de production classiques. Cependant, la production de l'hydrogène génère des émissions qui dépendent énormément du combustible primaire employé. Sur cet aspect, on trouvera plus d'information dans §A1.5.

<u>Bruit</u>

Pour un générateur destiné au marché résidentiel, c'est un aspect important qui conditionne considérablement l'installation et le lieu d'installation. L'origine des perturbations sonores se trouve dans les auxiliaires employés, principalement le compresseur, car la PAC elle-même ne génère aucun bruit. On peut toutefois affirmer que la PAC conduit à une réduction ostensible de la pollution sonore [Ruh-00][Eic-98].

A3.1.11 Synergies avec les applications transport

A l'état actuel, dans le domaine des transports, un générateur à PAC n'est pas compétitif économiquement en comparaison des moteurs thermiques [Tou-04][Mic-01].

- Un moteur à essence coûte 30 €/kW.
- Un moteur diesel coûte 50 €/kW.

De plus, ces moteurs sont plus performances et présentent encore des possibilités d'amélioration. Le type de combustible qu'ils utilisent ainsi que le réseau de distribution de ce dernier sont encore des points forts.

Mais du fait de la situation climatique de la planète, les normes de l'Union Européenne ainsi que celles de certains états des Etats Unis vont imposer des limitations strictes concernant les émissions polluantes des véhicules à moyen terme. Ceci oblige les constructeurs automobiles à s'intéresser aux technologies propres comme la PAC.

Pour le développement commercial initial des PAC, le bus urbain apparaît comme le secteur le mieux adapté grâce à ses caractéristiques : flotte de véhicules faciles à entretenir et cahier des charges bien connu. En outre, ce secteur est le plus susceptible de profiter d'aides publiques, élément très favorable pour une phase commerciale initiale.

Pour ces applications, les PAC les mieux adaptées sont les PEM d'une puissance supérieure à 100 kW.





Figure A3.7 Quantité de bus produits, cumulative



A3.2 Sélection d'une application

Rappelons tout d'abord la corrélation importante qui existe entre les domaines du transport et de la distribution avec des objectifs communs : amélioration technologique, réduction des coûts et le rôle primordial que la PEM jouera dans le développement de cette technologie pour la fourniture d'énergie des futurs véhicules électriques.

On a vu précédemment que l'utilisation d'une PAC pour la **production électrique raccordée au réseau était encore trop coûteuse :** le coût du kWh produit est trop élevé en soi et ne permet pas de gommer le coût d'investissement. De plus, la PAC reste fortement conditionnée par le prix du combustible, probablement du gaz naturel avec reformeur interne ou externe.

Pour palier cela, il faudrait arriver à des durées de vie plus longues : 10 ou 15 ans [Ame-01]. A l'état actuel, les PAC ne peuvent assurer de telles durées.

L'avantage de ce type d'application est le retour d'expérience technique dont on dispose grâce à un important nombre d'heures de fonctionnement [PC-25].

Dans ce secteur du marché, l'utilisation de la PAC est très liée à l'exploitation de la chaleur générée, en cogénération ou non [Lea-02][Eic-98]. Or, la SOFC est la principale candidate à moyen terme, bien qu'actuellement, la cogénération avec une SOFC reste encore trop chère, 5 à 7 fois plus chère qu'une bonne chaudière [Tou-04]. L'utilisation des cycles combinés reste encore très loin d'être envisageable pour des applications commerciales.

C'est pour les **charges isolées** que la PAC semble la mieux adaptée, car le prix du kWh pourrait concurrencer celui obtenu avec les sources traditionnelles (autour de 500 \in /kW à moyen terme) [Mcl-03]. De plus, des aspects positifs de la PAC comme le peu de bruit ou d'émissions polluantes seraient valorisés dans ce type d'applications. L'exploitation de la chaleur faciliterait également la viabilité économique [Lea-02].

Cependant, du fait de certaines contraintes techniques telles le nombre de démarrages et d'arrêts, on n'envisage d'utiliser la PAC pour les charges isolées qu'à court / moyen terme. Notons aussi que le réseau de gaz naturel n'est pas toujours disponible là où on le souhaiterait ce qui obligerait à un stockage et à l'utilisation d'un reformeur.

La SOFC apparaît comme la plus prometteuse à moyen terme, cependant, à court terme, la PEM est quand même la mieux adaptée du fait de son prix moins élevé et de la possibilité qu'elle offre de démarrages et arrêts rapides.

Pour le cas des **sources de secours**, le coût du combustible ne pose pas autant de problèmes. En effet, le système ne doit fonctionner que lors des défaillances de la source principale, généralement le réseau électrique. Ainsi, l'énergie nécessaire n'est pas trop importante et elle peut être stockée sous forme d'hydrogène pur. Cela permet de réduire les coûts en éliminant le reformeur. Par contre, le rendement n'est pas un facteur déterminant dans ce type d'application puisque le fonctionnement n'a lieu que pendant des périodes courtes, ce qui ne valorise pas vraiment la PAC.

Pour ce type d'applications, le générateur à PAC fournit des réponses rapides grâce à son alimentation en hydrogène pur. Cela peut se traduire par une réduction de l'ES, donc une diminution non négligeable du coût économique, d'autant plus que la charge ne présente pas de brusques variations de puissance et que le rapport entre la puissance maximale et la puissance nominale est proche de 1. Par contre, on a peu de retour d'expérience dans ce domaine. La PEM est la PAC la mieux adaptée pour ce type d'applications.

En conclusion, l'application optimale qu'on pourrait envisager à **court terme** présenterait les caractéristiques suivantes :

• Source de secours alimentée par une PEM.

Pour du moyen terme, l'installation la plus prometteuse pourrait être :

• Une SOFC générant continûment de l'électricité et de la chaleur et qui utiliserait comme combustible du gaz naturel avec un reformeur interne.

Application	Type de PAC le plus probable	Phase de commercialisation	Avantages	Inconvénients
Raccordement au réseau	SOFC	Long terme	Chaleur Rendement Emissions CO ₂	Nécessité d'exploiter la chaleur Durée de vie
Charge isolée	Principalement SOFC	Moyen terme	Performances Chaleur Rendement	Fiabilité Démarrage/arrêt Gel de l'eau
Source de secours	PEM	Court terme	Coût Installation Performances	Fiabilité Combustible

Le Tableau A3.5 récapitule les principales caractéristiques de chaque application.

 Tableau A3.5 Etat de développement des applications stationnaires

Cycle combiné et cogénération	Pas de possibilité	+	La cogénération est possible	ŧ	Seule la cogénération est envisageable et dans des conditions très limitées pour une PEMFC	+
Emissions polluants	Elevés	+	Elevés	+	Elevées dans le procédé de production de l'hydrogène	+
Coût du combustible	0.028 <i>E</i> /kWh énergétique	+	0.022 €/kWh énergétique	‡	Dans le cas où on utilise un compresseur il peut consommer jusqu'à 15% de la P _{sortie} sinon il n'y a pas de coût	+++
Coût du carburant	ł	+++	ł	+++	Le coût de production de 1'H₂ peut varier énormément entre 2.3 et 27.5 c€\ kWh	+
Rendement	25 %	+	30 %	‡	35-55 % sans prndre en compte les auxiliaires	+++
Coût d'investissement	300 €\ kWh	+++++++++++++++++++++++++++++++++++++++	1000-600 €\ kWh	‡	≈1500 €\kWh PEM	+
Fiabilité	5 % de MTF	‡	2.88 % de MTF	+ + +	5 % de MTF	‡
Durée de vie	12.000 en régime normal	+	30.000 heures en régime normal	‡	Possibilité d'arriver à 40.000 heures en régime normal	+++++++++++++++++++++++++++++++++++++++
Source d'énergie	Moteur	Diesel	Microturbine Pile à combustible		Pile à combustible	

A3.3 Tableau de synthèse

- 201 -

<u>ANNEXE IV</u> <u>Algorithmes genetiques</u>

Depuis leur première utilisation par J.H. Holland, les AG ont beaucoup évolué et de nombreuses modifications à leur mode de fonctionnement existent actuellement. Cependant, leur principe de fonctionnement se base toujours sur les mêmes éléments, lesquels sont ici présentés.

Codage de paramètres, création de la population, opérateurs de sélection, de croisement et de mutation, FO et critères de convergence.

Cela est complémenté par une illustration graphique du mode de fonctionnement des AG. Pour l'optimisation de l'IP, **on a utilisée les AG classiques**.

A4.1 Opérateurs des AG

Représentation des variables

Chaque individu (chromosome) représente **une solution possible. L'individu** est caractérisé donc par l'ensemble des valeurs des éléments à déterminer par le procédés d'optimisation.

n : variables Individu $X = \{X_1, X_2, X_3... X_N\}$

Les AG transforment d'abord l'espace de recherche. Ainsi, l'information (allèle) concernant chaque individu est codée : généralement sous forme binaire. Cette représentation peut se faire également par virgule flottante ou par des tableaux indexés par des pointeurs entiers.

Le type de représentation est choisi en fonction des caractéristiques des paramètres de chaque cas (phénotype). L'importance du codage sélectionné (génotype) est cruciale.

Population

La population, formée par des individus, représente le **groupe de solutions potentielles** avec lesquelles les AG explorent l'espace de recherche. Dans la population, ces individus sont classifiés en fonction de leur performance.

La taille de la population, déterminée empiriquement, dépend de l'application. Elle ne doit pas être trop grande, car cela permettrait aux pires solutions de continuer et donc de ralentir les procédés. Par contre, elle ne doit pas être trop petite non plus, car le risque de convergence vers un optimum local augmente. Généralement, une population entre 20 et 100 constitue un bon compromis [Zha-02].

Sélection des individus

La sélection des individus pour former les générations futures est un point critique des AG. Par ailleurs, cet aspect illustre clairement le principe darwinien des AG. Le choix entre les méthodes et leurs paramètres se fait empiriquement :

• La roue biaisée, le tournoi stochastique, l'élitisme, la classification géométrique [Hou].

Le but de ces méthodes est de faire perdurer les individus les mieux adaptés. Pour cela, on assigne généralement une probabilité proportionnelle, Pr, à chaque individu en fonction de ses performances évaluées avec la FO. Avec cela, on calcule la probabilité cumulative de la population. Ensuite, un procédé aléatoire tenant compte de toutes ces valeurs sélectionne certains individus pour créer la nouvelle génération.

Les individus les mieux « adaptés » auront plus de probabilités d'être sélectionnés. Un individu peut être sélectionné plusieurs fois. Les méthodes se différencient selon la manière de calculer la probabilité et de sélectionner les individus en fonction de leur probabilité. On présente ici les principales méthodes.

La première méthode développée et toujours utilisée, est la sélection par la roue biaisée développée par Holland [Hol-75]. Cette méthode divise une « roulette » en régions proportionnelles à la probabilité de chaque chromosome. Le chromosome est sélectionné, si le curseur de la « roulette » pointe sa région. La Figure A4.1 l'illustre.



Figure A4.1 Roulette biaisée

Une autre méthode importante, utilisée dans notre cas, est la **classification géométrique**, **normalized geometric ranking en anglais** [Joi-94][Hou]. Cette méthode classifie les individus selon leur habilité. En fonction de leur position, une probabilité est assignée à chaque individu. L'équation (A4.1) illustre la manière de calculer la probabilité d'un chromosome.

$$P_{ri} = q' \cdot (1-q)^{r-1} \tag{A4.1}$$

$$q' = \frac{q}{1 - (1 - q)^{Gen}}$$
 (A4.2)

Avec

Pr_i Probabilité de sélection de l'individu i.

R Classification de l'individu où 1 est le meilleur.

q Probabilité de sélection du meilleur individu.

Gen Taille de la population.

Des modifications et des combinaisons des principales méthodes existent aussi. En voici quelques-unes [Zha-02][Bak-02].

- La sélection des meilleurs individus sans aucun procédés probabiliste. Ainsi, la continuité du code du meilleur est toujours garantie.
- La classification non-linéaire. Cette méthode, basée sur une représentation nonlinéaire des individus en fonction de leurs performances, permet d'accentuer leurs différences quand les AG sont proches de l'optimum.
- L'adaptation des opérateurs de probabilité. La valeur de la probabilité de sélection est modifiée dynamiquement pour maintenir une diversité correcte.
- Lors du procédé de sélection, les meilleurs chromosomes sont modifiés aléatoirement. La modification est acceptée, si elle implique une amélioration. Cela est employé pour éviter d'être bloqués sur des optimaux locaux.

Le **but** des ces modifications est principalement de :

- Augmenter la faible vitesse de convergence des AG quand la population est très homogène.
- Garantir une bonne précision (valeur finale très proche de l'optimum réel).

Création de nouveaux individus

A partir des individus sélectionnés, d'autres nouveaux sont générés. La création de la nouvelle génération se base principalement sur deux méthodes.

Le croisement

Le croisement combine l'information de deux individus pour en créer deux nouveaux. La Figure A4.2 y illustre cela graphiquement. La manière de les combiner peut varier selon le nombre de points de combinaison (unique ou multiple) et leur place (aléatoire, fixe ou multiple).



Figure A4.2 Exemple de croisement multiple

Cette technique s'avère très utile pour découvrir au début du procédé de nouveaux espaces de recherche. La fréquence du croisement est contrôlée par sa probabilité dont la valeur, déterminée empiriquement, dépend de chaque cas et de la taille de la population. Une valeur trop élevée peut réduire la vitesse de convergence, tandis qu'une valeur trop basse peut conduire à un optimal local par une convergence prématurée.

La mutation

La mutation altère aléatoirement l'information d'un individu pour en générer un autre. Comme le croisement, la mutation peut se faire de diverses manières en fonction du nombre de points de combinaison (unique ou multiple) et de leur place (aléatoire, fixe ou multiple).



Figure A4.3 Exemple de mutation multiple

La probabilité de mutation reste habituellement faible, car une valeur élevée suppose instabilité (grande diversité) et rend la recherche aveugle. Néanmoins, la mutation est nécessaire pour trouver de nouveaux espaces non représentés par la population initiale. En outre, elle empêche de rester bloqué sur un optimum local.

Habituellement, la mutation joue un rôle moins important que le croisement, car ce dernier est plus utile pour une recherche rapide. Ainsi, pour un cas binaire, le croisement a une probabilité qui se situe entre 60 et 90 % (100 % implique que tous les individus sont croisés). Cependant, la mutation a une probabilité de 0.5 à 1 % [Ate-02]. En fait, pour certains experts [Hou][Zha-02], le croisement représente la différence fondamentale des AG avec d'autres méthodes d'optimisation. Pour une représentation non binaire, les probabilités se déterminent à l'aide de vecteurs.

En pratique, il faut trouver un équilibre entre ces deux méthodes. Cela se traduit aussi par un équilibre entre l'exploration de l'espace de recherche et l'exploration des meilleurs individus.

Actuellement, il existe des variations de ces deux méthodes [Ate-02][Bak-02][Pet-98][Zha-02], la plupart d'entre elles se base sur une probabilité variable de méthodes lors du procédés.

Fonction objectif

Parmi les mécanismes des AG, un élément capital et critique est la FO, car elle est **l'interface** ente le modèle d'optimisation et les AG mêmes. Ainsi, c'est elle qui guide les AG vers l'optimum en respectant les contraintes imposées.

La FO est déterminée empiriquement en fonction de l'application, aucune norme mathématique n'existe pour son implémentation.

Sa fonction est **d'assigner une valeur à chaque individu selon ses performances** par rapport aux critères choisis. Cette valeur représente sa capacité à survivre lors la génération prochaine.

Les contraintes qui sont représentées par g(x) et h(x) dans le cas classique, sont aussi prises comptes dans la FO, car elle doit éliminer toutes les solutions non viables.

La FO présentée ci-dessous comprend généralement deux termes.

$$F(x) = P(x) + \theta \cdot B(d(x)) \tag{A4.3}$$

Où :

 θ Il vaut 1 quand une contrainte n'est pas respectée, si toutes les contraintes sont respectées vaut 0.

d(x) Dégré de violation de la contrainte i.

Le première de termes, P(x), n'évalue que l'aptitude de l'individu par rapport aux critères d'optimisation. Il donne donc la valeur même d'optimisation de l'individu. Selon le cas, cette fonction P(x) peut être linéaire, exponentielle, géométrique... [Zha-02] [Pet-98][Bak-02].

En effet, les AG n'optimisant qu'une seule valeur, les problèmes doivent être ramenées à un cas mono-objectif. Cela exige donc une pondération de chaque critère d'optimisation qui compose P(x) comme le montre par exemple l'équation (A4.4).

$$P(x) = \sum_{n=1}^{e} \frac{\alpha_n P_n(x)}{P_{opt_n}}$$
(A4.4)

Avec :

e Nombre total de critères d'optimisation.

 α_n Coefficient de pondération pour le critère n.

 $P_n(x)$ Valeur de l'individu x concernant le critère n.

 P_{opt_n} Valeur « optimale » pour le critère n.

Le deuxième terme, B(d(x)), appelé aussi fonction de pénalité, concerne les contraintes du procédés. Sa fonction est d'éliminer les solutions hors de l'espace des solutions possibles et de toujours guider les AG vers les solutions viables. Avec cet objectif, B(d(x)) se décompose en deux termes :

$$B(d(x)) = \sum_{i=1}^{k} \beta_i(d(x)) + G(d(x))$$
(A4.5)

Où : k est le nombre total de contraintes

Le première terme, $\beta_i(d(x))$, qui dépend de la violation des contraintes, guide rapidement les AG vers l'espace des solutions viables. Le deuxième, G(d(x)), est toujours grand devant P(x) et B(d(x)) pour faire en sorte que la valeur des solutions non-viables leur interdisse de survivre. Pour mieux guider les AG, ce terme est une fonction non-linaire de d(x) [Pet-98][Bak-02].

Critère de convergence

Actuellement, il n'existe pas de critère infaillible pour arrêter les AG. En fonction du cas, le critère d'arrêt est donc choisi empiriquement.

La méthode classique, celle utilisée dans notre cas, arrête le procédé, une fois que les AG sont arrivés à un nombre donné de générations. Cette méthode simple, qui se base sur l'expertise, peut amener à de mauvais optima, car il est fortement dépendant des caractéristiques de la population initiale et de la vitesse de convergence, elle ne peut pas assurer que l'optimum a toujours été atteint.

D'autres possibilités existent comme par exemple l'arrêt des AG après un nombre donné de générations sans amélioration ou encore la combinaison de plusieurs méthodes.

A4.2 Mode de fonctionnement

Pas 1

Une fois que la taille de la population est définie, la population initiale est générée aléatoirement. Ensuite, chaque individu est évalué avec la FO.

Pas 2

La probabilité de chaque individu est ensuite calculée selon sa valeur et l'algorithme de sélection. Les individus pour générer la nouvelle génération sont sélectionnés. Dans ce pas, l'algorithme de sélection joue un rôle capital.

Pas 3

A partir des individus sélectionnés, de nouveaux sont créés par les procédés de mutation et de croissement. Cette nouvelle génération est évaluée par la FO.

Pas 4

Le meilleur individu de la nouvelle génération est identifié et comparé au meilleur de toutes les autres générations. S'il est meilleur, il le remplace. Ainsi, c'est toujours le meilleur retenu.

Le processus s'arrête, si cette génération est la dernière, sinon, on reprend au pas 2. La Figure A4.4 illustre graphiquement ce procédés.



Figure A4.4 Pas d'un procédés d'optimisation basé sur les AG

A4.3 Paramètres d'optimisation

Comme le Tableau A4.1 le montre, les valeurs possibles des paramètres ont été limitées. Ces limitations ont été déterminées suite à une étude bibliographique.

Inductance du filtre de raccordement au réseau	0.5 mH	5 mH
Capacité du filtre de raccordement au réseau	1 µ F	50 µ F
Tension du bus continu	500 DC V	600 DC V
Fréquences de commutation (inverseur et hacheur DC/DC)	5 kHz	20 kHz
Capacité du bus continu	750 μF	2000 µF
Inductance du hacheur élévateur PAC	0.1 mH	3 mH
Capacité connectée aux bornes de la PAC	10 µF	300 µF
Nombre de modules	1	4

Tableau A4.1 Plage des valeurs possibles pour les paramètres des AG

La FO employée est donnée par l'équation (A4.6).

$$F(x) = -\frac{Pertes_ond(x)}{16} - \frac{Pertes_hacheur}{63} + \theta \cdot B(d(x))$$
Avec
Pertes_hacheur : Pertes dans le hacheur DC/DC
(A4.6)

Pertes_ond : Pertes dans l'OT

La fonction de pénalité se décompose en deux parties :

- $\beta_i(d(x)) = K \cdot d(x)$ (A4.7)
- G(d(x)) = Si d(x) > 20 % au dessus du limite

G(d(x)) = 100

Sinon

$$G(d(x)) = 50$$

Fin

Les paramètres des opérateurs des AG, listés ci-dessous ont été déterminés empiriquement.

Représentation	Virgule flottante	Taille de la population	30
Nombre de générations	300 AG 210 Hybride	Algorithme d'arrêt	Nombre de générations
Méthode de sélection	Classification géométrique	Valeur de sélection	0.1
Vecteur de mutation	[2 300 1]	Vecteur de croissement	[0.3]

Tableau A4.2 Paramètres de fonctionnement des AG
ANNEXE V Dimensionnement analytique

Le but de cette annexe est de présenter sommairement le dimensionnement classique, dit analytique d'une IP. Son principe, connu depuis longtemps, se base sur la détermination de la valeur de chaque composant indépendamment des autres composants.

A5.1 Dimensionnement

A5.1.1 Tension du bus continu

La tension du bus continu relie la partie DC/DC et la partie DC/AC. Les critères pour délimiter sa valeur sont :

- La technologie des semi-conducteurs. Les IGBT, semi-conducteurs les mieux adaptés, sont disponibles dans des gammes de tension maximale : 600 V, 1200 V et 1700 V. Pour des raisons de sécurité, dans notre cas, cette valeur vaut le double de la tension du bus.
- La tension minimale de la PAC. Cette tension impose avec celle du bus le rapport cyclique maximal du hacheur DC/DC.
- La puissance maximale. Du fait de la chute de tension dans le filtre de raccordement, la tension de bus doit être supérieure à la tension calculée par l'équation ci-dessous :

$$\frac{2V_{Bus}}{3} \ge \sqrt{\left(V_{Appli_MAX} + L_{AC} \ \omega \ I_{SMAX} \cdot \sin(\varphi)\right)^2 + \left(L_{AC} \ \omega \ I_{SMAX} \cos(\varphi)\right)^2} \tag{A5.1}$$

Pour notre cas, la tension minimale est égale à 487 V.

La tension du bus influence les pertes de puissance linéairement (Voir Figure A5.1 et Figure A5.2). Une augmentation de la tension de bus fait croître les pertes de commutation. En effet, les pertes de commutation des semi-conducteurs (P_{com}) augmentent, car la tenson à commuter par les IGBT est plus élevée (Voir Equation (A5.2)).

$$P_{Com} = f_{MLI} \cdot \left[E_{on} \left(I_{SMAX} \right) \cdot k_{on} \left(V_{Bus} \right) + E_{off} \left(I_{SMAX} \right) \cdot k_{off} \left(V_{Bus} \right) \right]$$

$$O\dot{u}:$$
(A5.2)

 E_{on} et E_{off} sont l'énergie dissipée par le semi-conducteur lors d'une commutation, à l'ouverture et à la fermeture respectivement. k_{on} et k_{off} sont des coefficients proportionnels à la tension du bus continu. f_{MLI} est la fréquence de découpage.





Figure A5.2 Pertes du hacheur en fonction de V_{BUS} Freq = 5 kHz P= 120 kW

Cependant, une très basse tension du bus continu rend plus difficile le contrôle (Voir Equation (A5.1)). Compte tenu de ces aspects, la tension du bus continu choisie est 600 V.

A5.1.2 Condensateur du bus continu

Le condensateur du bus continu est nécessaire pour connecter le hacheur DC/DC et l'onduleur de tension avec une tension stable. Il limite les ondulations de la tension du bus (ΔV_{Bus}). A partir de l'équation (2.3), on peut écrire :

$$\frac{dV_{Bus}}{dt} = \frac{\Delta I_{Hacheur} Onduleur}{C_{BUS}} \rightarrow \Delta V_{Bus} = \frac{\Delta I_{Hacheur} Onduleur}{C_{BUS}} \Delta t$$
(A5.3)

 $O\dot{u}$: $\Delta I_{Hacheur_Onduleur}$ est la différence sur une demi-période entre le courant fourni par le hacheur, $I_{Hacheur}$ et celui demandé par l'onduleur de tension, I_{Charge} .

On peut donc calculer les ondulations. Pour le dimensionnement, on doit connaître les courants $I_{Hacheur}$ et I_{Charge} . Si l'on se focalise sur une demi-peridode, $I_{Hacheur}$ est donc constante, tandis qu' I_{Charge} oscille [Foc-98]. Les ondulations de la tension sont provoquées principalement par les ondulations à basse fréquence du courant. Ces ondulations se traduisent par l'équation ci-dessous. On note que l'amplitude dépend de la puissance réactive.

$$(i_{Charge})_{BF} = \frac{3 \cdot m_{AC} \cdot I_{SMax}}{2} \cos(\varphi)$$
(A5.4)

Une autre méthode pour calculer la capacité se base dans le transit des énergies.

$$E_{cond_Bus} = P_{cond_bus} \cdot \frac{2}{f_{MLI}} = \frac{1}{2} \cdot C_{Bus} \cdot V_{Bus}^2$$
(A5.5)

Où :

 E_{cond_Bus} Energie à fournir par le condensateur du bus.

P_{cond bus} Valeur maximale de puissance à fournir par le condensateur.

En tenant compte des ces critères, la capacité calculée pour un ondulation de V_{Bus} de 3 % (18 V) est donc 1500 $\mu F.$

A5.1.3 Fréquence de découpage de l'OT

En sachant que la commande rapprochée est une MLI scalaire, la fréquence de commutation est donc égale à la fréquence de découpage. Une élévation de cette fréquence implique une augmentation des pertes de commutation (Voir Equation (A5.2)). En conséquence, cela nous incite à choisir une fréquence plutôt basse.

Par contre, une haute fréquence de commutation réduit le THD de la tension et du courant au point de raccordement avec un même filtre. Cela réduit donc les contraintes sur le filtre (Voir équation 2.17 et 2.18). Les courbes suivantes illustrent graphiquement ces aspects.



Figure A5.3 Pertes en fonction de la fréquence de commutation V_{Bus} = 600 V, P=100 kW, Q = 0 kVA

Figure A5.4 THD du courant en fonction de fréquence de commutation V_{Bus} = 600 V P=100 kW Q = 0 kVA L_{AC} =1mH C $_{AC}$ = 10 μ F

En définitive, la valeur de la fréquence est déterminée suite à un compromis entre ces deux aspects. Pour des puissances inférieures à 100 kW, la fréquence de commutation varie habituellement entre 5 kHz et 20 kHz.

On a choisi une fréquence de 7 kHz, assurant aussi est un compromis entre les pertes, la taille du filtre et les contraintes. Dans notre cas, on n'a pas tenu compte de la pollution sonore, laquelle limite encore plus la plage des fréquences.

A5.1.4 Filtre de raccordement

La principale condition sur le filtre de connexion LC concerne la fréquence de résonance. Elle doit être proche mais supérieure à celle du réseau ou de la charge indépendante (50 ou 60 Hz) et inférieure à la fréquence de commutation de l'onduleur. Ainsi, on n'atténue que les harmoniques polluantes avec une pente de 40 db.



Figure A5.5 Diagramme de Bode d'un filtre LC

La FT du filtre est donné ci-dessous.

$$FT_{Filtre_LC}(s) = \frac{1}{C_{AC} \cdot L_{AC} \cdot s^2 + C_{AC} \cdot R_{AC} \cdot s + 1}$$
(A5.6)

La fréquence de résonance du filtre vaut :

$$f_{\text{resonance}} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{L_{AC} \cdot C_{AC}}}$$
(A5.7)

Le rôle de l'inductance est principalement de limiter les ondulations du courant fourni au réseau (Voir équation (2.17)). Pour réduire ces ondulations, on doit augmenter la valeur de l'inductance. Par contre, une valeur trop élevée limite le transfert d'énergie et rend plus difficile le contrôle [Liu-95]. Le condensateur élimine les harmoniques du courant à haute fréquence. Ainsi, la tension au point de raccordement est plus sinusoïdale La capacité est calculée à l'aide de l'équation (A5.7).

Pour le dimensionnement, la première étape est de calculer la valeur maximale de l'inductance. Elle se calcule par l'équation (A5.1). Avec V _{Bus MAX} = 600 V, V _{Charge MAX} = 325 V et I _{Charge AC MAX} = 205 A, la valeur maximale est de 3.6 mH.

La valeur minimale de l'inductance est déterminée par les ondulations maximales du courant, $\Delta I_{S MAX}$. En sachant que le contrôle rapproché est une MLI et avec l'équation (2.17), on peut calculer l'ondulation maximale du courant par [Etx-03].

$$\Delta I_{SMAX} = \frac{T_{MLI} \cdot V_{Bus}}{8 \cdot L_{AC}}$$
(A5.8)

A partir de l'équation (A5.9), la valeur minimale de l'inductance peut être calculée par :

$$L_{AC MIN} = \frac{T_{MLI} \cdot V_{Bus}}{8 \cdot \Delta I_{S MAX}}$$
(A5.9)

Avec : $V_{Bus} = 600 \text{ V}$, $\Delta I_{S MAX} = 15 \%$, $I_{Appli MAX} = 30 \text{ A}$ et $T_{MLI} = 0.14 \text{ ms}$, la valeur minimale de l'inductance est de 0.35 mH.

En ce qui concerne le condensateur, sa capacité est aussi limitée. L'énergie réactive fournie par le condensateur doit être consommée par l'OT. Cela implique donc un surdimensionnement de l'OT. Pour limiter cet aspect, la capacité ne peut pas dépasser une valeur déterminée. La puissance fournie par le condensateur vaut [Etx-03].

$$Q = E^2 \cdot C_{AC} \cdot w \left(\frac{N^2}{N^2 - 1} \right)$$
(A5.10)

Où : N est le rapport entre la fréquence de coupure du filtre et celle de l'harmonique fondamental de la tension de raccordement E. Avec cela, on fixe la puissance réactive maximale qui sera échangé entre le condensateur et l'OT. A partir de (A5.10), on peut donc calculer la capacité maximale ($C_{AC MAX}$).

$$C_{AC_{MAX}} = Q_{MAX_{C}} \frac{N^2 - 1}{N^2 \cdot E^2 \cdot w}$$
(A5.11)

On fixe Q_{MAX_C} à 10 % de la puissance réactive 4 kVA et la fréquence de coupure du filtre à 250 Hz. Cela donne pour la capacité maximale 230 μ F.

L'influence des ces paramètres sur le THD du courant et de la tension au point de raccordement est illustrée par les figures suivantes.



Figure A5.6 THD du courant en fonction des composants du filtre de raccordement (V_{Bus}=600V P=100 kW Q=0 kVA Freq= 5 kHz)



Figure A5.7 THD de la tension en fonction des composants du filtre de raccordement (V_{Bus}=600V P=100 kW Q=0 kVA Freq= 5 kHz)



Figure A5.8 Fréquence de résonance du filtre en fonction des composants du filtre de raccordement (V_{Bus}=600V P=100 kW Q=0 kVA Freq= 5 kHz)

On note que l'inductance détermine principalement le THD du courant, ce qui est confirmé par l'équation (2.17). Le THD de la tension est influencé principalement par la capacité (Voir équation (2.18)).

Un autre aspect à prendre en compte est l'impédance du filtre de connexion qui peut être calculée à l'aide d'un circuit équivalent (Voir Figure A5.9). Les harmoniques de courant

provoquent des harmoniques de tension via l'impédance du filtre. Cela nous conduit donc à réduire l'impédance ce qui revient à augmenter la capacité et diminuer l'inductance (Voir Equation (A5.12) et (A5.13)).



Figure A5.9 Schéma équivalent du filtre de raccordement

$$Z(s) = \frac{L_{AC}s}{1 + L_{AC}C_{AC}s^2}$$
(A5.12)

$$Z(s) = \sqrt{\frac{L_{AC}}{C_{AC}}} \frac{\left(s \,/\, \omega_o\right)}{1 + \left(s^2 \,/\, \omega_o^2\right)} \tag{A5.13}$$

Pour le cas où le générateur se comporte comme une source de tension, il existe une boucle de régulation qui asservit la tension de sortie, soit la tension du filtre. Cela compense les chutes dans le filtre.

En-fin, tout cela nous conduit à un compromis entre tous ces aspects en tenant compte de la fréquence de commutation. Le résultat obtenu est présenté dans le tableau ci-dessous.

Oscillation maximale = 15 % Courant maximalFréquence de commutation = 7 kHzInductance minimale maximale =0.35 - 3.6 mHFréquence de résonance du filtre ≈ 750 HzCapacité maximale = $230 \,\mu\text{F}$ Différence de tension = $300 \,\text{V}$

Inductance L_{AC} = 1.5 mH, Capacité C_{AC} = 30 μ F

Tableau A5.1 Composants du filtre de raccordement

A5.1.5 Structure modulaire

Comme il a déjà été expliqué, le nombre de modules est compris entre 1 à 4. Cette valeur est déterminée suite à une étude comparative des pertes (Voir Figure A5.10).



Figure A5.10 a) Pertes en fonction de V_{Bus} $P_{Total} = 100$ kW Freq= 5 kHz, b) Pertes en fonction de fréquence de commutation $P_{Total} = 100$ kW $V_{BuS} = 600$ V

Ces figures montrent que les meilleurs résultats sont obtenus avec 4 hacheurs en parallèle.

A5.1.6 Fréquence du hacheur parallèle

En ce qui concerne les pertes, la fréquence de commutation joue un rôle similaire à celui décrit pour l'OT. Cependant, elle n'influence que les aspects de connexion à la PAC comme par exemple les ondulations du courant de la PAC. Ces ondulations sont réduites par une augmentation de la fréquence. L'équation ci-dessous obtenue à partir de l'équation (2.2) et la figure 2.10 illustre son influence sur les pertes et les ondulations.

$$\Delta I_{PAC} = \frac{1}{f_{MLI} \cdot L_{DC}} [V_{PAC} - V_{Bus} (1 - u_{DC})]$$
(A5.14)

Cela exige donc un compromis entre les pertes et les ondulations du courant. Compte tenu de la structure modulaire, la valeur choisie est égale à 5 kHz qui représente une fréquence équivalente de 20 kHz, tandis que les pertes sont très basses.

A5.1.7 Inductance du hacheur parallèle

Son rôle principal est de limiter les ondulations du courant de PAC. Une inductance élevée permet de réduire ces ondulations (Voir Figure A5.11 et Equation (A5.15)).



Figure A5.11 Oscillations du courant de PAC en fonction de L Hacheur (Freq= 5kHz, 4 Modules)

En fonction des contraintes (oscillations maximales du courant, 5 %) et des paramètres déjà déterminés (fréquence de commutation 20 kHz, différence maximale de tension, 350 V), l'inductance minimale est de 0.4 mH. Dans notre cas, l'inductance choisie a été 1 mH.

A5.1.8 Condensateur de la PAC

Son but est de réduire les ondulations et d'éliminer touts les harmoniques à haute fréquence du courant de la PAC. Dans certains cas, cet élément n'est pas nécessaire, mais il est généralement employé pour mieux protéger la PAC. L'équation (A5.16) précise son fonctionnement.

$$C_{PAC} \frac{dV_{PAC}}{dt} = I_{PAC_sortie} - I_{PAC}$$
(A5.15)

Où : IPAC sortie est le courant de sortie de la PAC avant le condensateur connecté à ses bornes.

Cette formule permet de calculer la valeur minimale de la capacité. Pour notre cas (I_{PAC} = 285 A, oscillation de la tension : 5V), la capacité minimale est égale à 150 µF.



Figure A5.12 Oscillations d' I_{PAC} en fonction de C_{PAC} (Freq= 5 kHz, 4 Modules, L_{DC} = 1 mH)

La valeur de cette capacité est aussi conditionnée par le contrôle. Pour ne pas perturber le contrôle, la fréquence de résonance du filtre (C_{PAC} & L_{DC}) doit être plus basse que la fréquence de résonance du hacheur. Elle est choisie une décade plus bas. Cette fréquence de résonance est calculée par l'équation :

$$f_{\text{resonante}} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{L_{DC} \cdot C_{PAC}}}$$
(A5.16)

Dans notre cas, la valeur choisie est de 200 μ F.

A5.2 Synthèse

Les tableaux suivants montrent les valeurs obtenues et les résultats concernant les contraintes et les critères de dimensionnement.

C _{Bus}	1500 μF	V_{Bus}	600 V
L _{AC}	1.5 mH	$f_{onduleur}$	7 kHz
C _{AC}	30 µF	$f_{hacheur}$	5 kHz
Nombre de modules	4	C _{PAC}	200 µF
L _{DC}		1 r	nH

Tableau A5.2	Valeurs obtenues	avec le dimensionne	ement analytique
--------------	------------------	---------------------	------------------

Contraints	Ondulations du courant PAC	3.36
	THD	2.37
Critère d'optimisation	Pertes	3432 W

Tableau A5.3 Résultats du dimensionnement analytique

<u>ANNEXE VI</u> <u>Modele de l'ES</u>

Cette annexe précise les modèles de batteries et de supercapacités employés en simulation. Même si des modèles plus complexes et plus exacts que ceux décrits ci-dessous existent, ceux ici présentés ont été sélectionnés, car ils répondent bien aux besoins et présentent un bon rapport complexité / précision. De plus, l'utilisation de modèles plus précis exige l'identification d'un plus grand nombre de paramètres, ce qui est pratiquement irréalisable avec les seules donnés techniques des constructeurs.

A6.1 Modèle de batterie au plomb

Il existe de nombreux modèles pour les batteries : de type statique ou dynamique. Ils sont basés sur des techniques de modélisation différentes selon leur utilisation. La complexité des ces modèles varie également, ce qui est conditionné par l'exactitude de l'étude et la connaissance de la batterie. Un modèle très précis implique une bonne connaissance physique de la batterie réelle (paramètres déterminés avec précision) et une augmentation du poids de calcul.

Pour notre étude, nous avons retenu dans un premier temps un modèle simple de batterie. Ce modèle est illustré par la Figure A6.1. Son avantage est que ses paramètres sont facilement identifiables avec l'information fournie par le constructeur. Cependant, il n'est pas très exact.



Figure A6.1 Modèle de batterie

Où :

- C_B Capacité totale de la batterie, qui est calculée à partir de la quantité d'énergie à fournir. La **tension minimale** de cette capacité est limitée à la tension minimale de la batterie.
- R_S Résistance effective interne en série (résistance des plaques, des terminaux et de l'interface électrique) pour la charge et décharge.

R_P Résistance d'autodécharge.

V_{BAT} Tension effective aux bornes de la batterie.

V_{Cap} Tension interne de la batterie.

Les équations décrivant le fonctionnement sont (A6.1) et (A6.2).

$$C_B \frac{dV_{C_{ap}}}{dt} = -\left(I_{ES} + \frac{V_{Cap}}{R_P}\right) \tag{A6.1}$$

$$V_{BAT} = V_{Cap} - I_{ES} \cdot R_S \tag{A6.2}$$

Même si ce modèle répond bien à nos besoins en général, on a aussi utilisé un autre modèle plus complexe. Ce modèle est illustré par la Figure A6.2. L'intérêt de ce denier modèle est principalement l'analyse avec plus d'exactitude du comportement de la batterie à hautes fréquences grâce à l'inclusion de l'inductance interne parasite ($L_{Int Bat}$) [Bia-01]. Cependant, la détermination de ces paramètres est plus problématique.



Figure A6.2 Modèle plus détaillé de la batterie

Les équations représentant son comportement sont les suivantes :

$$L_{Int_Bat}\frac{dI_{Int}}{dt} = V_0 + V_D - I_{Int} \cdot R_{Int_Bat} - V_{Bat}$$
(A6.3)

$$C_D \frac{dV_D}{dt} = -(I_{Intt} - \frac{V_D}{R_D})$$
(A6.4)

$$C_P \frac{dV_{Bat}}{dt} = I_{ES} - I_{Int}$$
(A6.5)

Avec :

 V_0 Tension de la batterie à vide.

C_D et R_D Impédance représentant les phénomènes de polarisation dynamique.

R_{Int Bat} Résistance interne de la batterie.

Mesure de l'état de charge

L'état de charge d'une batterie peut être calculé de plusieurs manières :

- Méthodes physiques.
- Méthodes électriques.
- Méthodes basées sur des mesures de tension.

- Méthodes basées sur des mesures de type coulométrique.
- Méthodes utilisant les mesures d'impédance.

Dans notre cas (batteries au plomb), la méthode de mesure doit être principalement basée sur une mesure coulométrique du fait du mode de fonctionnement de la batterie : elle est employée comme une source de puissance (variations brusques de puissance) et ceci limite donc la validité et l'utilité d'autres méthodes.

Cependant, du fait des résistances internes parasites de la batterie, cette méthode doit être complémentée sinon, les pertes internes dans la batterie conduisant à la décharge des batteries, ne sont pas prises en compte. Pour résoudre ce problème, plusieurs solutions sont possibles :

• utiliser un modèle de pertes de la batterie ou complémenter cette méthode avec une autre.

On a opté pour complémenter cette méthode par une mesure de la tension de la batterie. En conséquence, dans nos simulations l'état de charge sera déterminé en fonction de la mesure coulométrique et de la tension de sortie de la batterie [Nug-96][Mes-97].

Données de simulation

Pour le calcul des paramètres des modèles, on s'est référé à des produits existants dans le commerce [SAFTA][YUSA] et également à d'autres études [III-02]. Les valeurs des paramètres employés varient selon les besoins. Les valeurs présentées ci-dessous sont des ordres de grandeur.

R _S	1 Ω	$V_{min batterie} = V_0$	350 V	R _P	1.000 Ω
R _D	10 kΩ	R _{Int Bat}	0.1 Ω	L _{Int_Bat}	1 mH

Tableau A6.1 Paramètres du modèle des batteries

Les valeurs des capacités, C_B, C_P et C_D dépendent de l'énergie à stocker.

A6.2 Modèle des supercapacités

Comme pour les batteries, il existe des nombreux modèles de supercapacités [Can-02][Las-01][Men-01]. Pour les simulations analysant le contrôle commande, une modélisation avec deux « branches » semble être un bon compromis (Voir Figure A6.3).



Figure A6.3 Modèle des supercapacités

Les équations décrivant le fonctionnement de la supercapacité sont précisées ci-dessous :

$$V_{Sup} = V_{C1} - I_{ES} \cdot R_{Sup_{-1}}$$
(A6.6)

$I_{C2} = \frac{(V_{C1} - V_{C2})}{R_{Sup_2}}$	(A6.7)
dV_{c2}	

$$C_{Sup_2} \frac{dV}{dt} = I_{C2}$$
(A6.8)

$$C_{Sup_{-1}}\frac{dV_{C1}}{dt} = -I_{ES} - I_{C2}$$
(A6.9)

Avec :

V_{Sup} Tension de sortie de la supercapacité.

R_{sup 1} et R_{sup 2} Résistances représentant les pertes internes.

 $C_{Sup 1}$ Capacité dont valeur est fonction de la tension V_{C1} .

C_{Sup 2} Capacité de la supercapacité dépendant de l'énergie à fournir.

 V_{C1} et V_{C2} Tension aux bornes des condensateurs $C_{Sup 1}$ et $C_{Sup 2}$ respectivement

Mesure de l'état de charge

Pour les supercapacités, la tension de sortie donne une idée très fiable de l'état de charge de celles-ci. De ce fait, le contrôle commande utilisera de la tension plutôt que la mesure coulométrique pour évaluer l'état de charge.

Données de simulation

Actuellement, on ne dispose pas de données suffisantes pour identifier tous les éléments du modèle. En conséquence, les valeurs utilisées en simulation ont été estimées à partir de valeurs calculées dans les points précédentes et [Can-02]. Certains produits commerciaux ont également servi de support d'information [Maxwell][EPCOS]. Enfin, la détermination de la valeur de la capacité $C_{Sup 1}$ exige une analyse très détaillée en fonction de chaque système.

$C_{Sup_1} = 0.6 + 0.2 V_{C1}, F$ $R_{Sup_1} =$	$8 \text{ m}\Omega \qquad \qquad \text{R}_{\text{Sup}_2} = 1 \Omega$
---	--

Tableau A6.2 Paramètres de modélisation des supercapacités

Comme avec les batteries, la capacité du système, C_{Sup_2} , varie en fonction de l'énergie à stocker.

ANNEXE VII

DESCRIPTION DU BANC D'ESSAIS

Le but de cette annexe est de décrire le banc d'essais employé pour la validation expérimentale des régulateurs développés au cours de cette thèse. On rappelle que ces régulateurs (de tension et de courant) concernent le contrôle de l'OT.

Le banc d'essais, mis en place au Laboratoire d'Electrotechnique de Grenoble, se compose de plusieurs parties :

• Source de tension monophasée : Cette source de tension variable est la source d'énergie utilisée lors des essais. En effet, son rôle est de fixer la tension du bus continu à une valeur constante. Sa gamme de tension va de 0 à 125 V pour un courant maximal de 10 A.

Elle émule le système; PAC et ES avec leurs convertisseurs.

• Charge passive triphasée : Cette charge résistive est la source triphasée de l'OT lors des essais de régulation en tension. Sa puissance maximale est de 4 kW. La valeur de la charge est sélectionnée à l'aide des 6 contacteurs qui commutent un pourcentage de la charge : 25%, 20%, 15%, 10% et 5%.

Son rôle est **d'émuler les charges alternatives** de l'OT fonctionnant en régulation en tension.

• Banc universel pour la distribution électrique : Il est en fait le coeur du banc d'essais, car il constitue l'IP, l'interface de contrôle ainsi que le système de métrologie. Compte tenu de tout cela, il est l'objet d'une analyse postérieure plus approfondie.

A7.1 Fonctionnalités et structure de puissance

La structure de puissance du banc d'essais employé est illustrée dans §3.5.

Le banc universel pour la distribution électrique a été réalisé dans le cadre d'un projet ambitieux concernant diverses applications dans le domaine du génie électrique. De ce fait, de nombreux contacteurs composent l'IP en permettant ainsi autant de topologies qui élargissent son domaine d'application. L'objectif principal de ce banc est d'analyser un système dédié à la génération éolienne, constitué d'une machine asynchrone à double alimentation correspondant à la technologie la plus couramment vendue actuellement [Lav-04].

Ce banc sert aussi à l'analyse de compensateurs pour l'amélioration de la qualité de l'énergie. Il peut être utilisé pou la compensation des creux de tension (connexion série) ou des harmoniques (filtrage actif, connexion série et parallèle) [Etx-03].

Dans le contexte de la production décentralisée, une autre application est l'émulation de sources primaires, comme par exemple une PAC. Le banc permet d'émuler le comportement d'une source d'énergie quelconque sans en disposer physiquement. Cela constitue donc une **méthode efficace, simple et peu coûteuse pour étudier le comportement de ces sources et les stratégies de commandes qui leur sont associées.**

On présente ci-dessous l'exemple d'une PAC ; l'OT régule la tension du bus avec comme référence l'image de la courbe de polarisation d'une PAC. La courbe de la PAC a été adaptée en fonction des limites structurelles du banc ; c'est pourquoi la tension de la PAC est aussi élevée.





Figure A7.2 Puissance en fonction du courant

Notons que ce banc émule également le comportement dynamique de la source d'énergie, comme la Figure A7.3 l'illustre. Evidemment, la précision ainsi que la fréquence maximale du modèle sont limités par la rapidité des régulateurs asservissant le courant et la tension de l'OT.



Figure A7.3 Réponse dynamique d'une PAC émulée

On n'a malheureusement pas disposé d'assez de temps pour exploiter à fond toutes les potentialités du banc expérimental. En effet, la connexion de l'OT émulant une PAC à un hacheur élévateur de tension aurait pu nous permettre de tester différents types de correcteurs d'un IP.

A7.2 Banc universel pour la distribution électrique

A7.1.1 Interface d'EP

Lors de nos essais, le seul OT employé a été l'OT 1 (Voir Figure 3.66). C'est un OT triphasé dont la puissance nominale est de 7.5 kW. Cependant, cette valeur n'est pas atteinte à cause des limites de la source de tension continue.

Les caractéristiques de l'EP employée pour les essais sont ci-dessous listées.

- Onduleur de tension à IGBT (50 A, 1200 V, 10 kHz) SKM 50 GAL 123 de Semikron. Des protections contre les surtensions ainsi qu'une protection thermique y sont associées.
- Une inductance de 3 mH par phase mise en série avec l'OT.
- Un bus continu constitué par 4 condensateurs de 2200 µF supportant 450 V chacun.
- Un condensateur de 100 μ F par phase connecté en parallèle avec l'OT lors des essais de régulation en tension.

Le dimensionnement de ces composants s'est inspiré des travaux effectués dans le cadre de cette thèse, mais principalement des travaux réalisés au sein du LEG concernant la génération éolienne [Lav-04], le filtrage actif [Guf-00] et la compensation de creux de tension pour la qualité de l'énergie [Etx-03].

A7.1.2 Structure de la commande

La commande du banc comprend une partie matérielle et une partie logiciel de prototypage rapide – système DSPACE qui fonctionne sur l'environnement Matlab Simulink. Le DSPACE est un TMS320F240, processeur à virgule fixe de 16 bits, d'une capacité d'exécution de 20 millions d'instructions. Les principaux éléments de ce système modulaire sont ci-dessous listés :

- Une carte processeur **DS1005 PCC board** (carte mère) : PowerPC 750 fonctionnant à 480 MHz avec 128 Mo de RAM et 16 Mo de mémoire flash.
- Une carte DS2003 (carte d'acquisition des mesures): 32 entrées analogiques multiplexées avec une résolution jusqu'à 16 bits et d'échantillonneurs-bloqueurs synchrones.
- Une carte DS2101 (carte de visualisation) : 5 sorties analogiques avec une résolution de 12 bits.
- Une carte DS4003 (carte de I/O) : 96 entrées sorties logiques.
- Une carte DS5101 (carte de PWM) : 16 sorties PWM avec une résolution de 25 ns.

Le principal avantage de ce système évolutif est sans doute sa flexibilité et sa simplicité. En effet, on peut implanter automatiquement des lois de contrôle développées et simulées sous

Matlab Simulink dans le DSP, ce qui réduit notablement le temps de test. De plus, il permet, en temps réel, de visualiser toutes les grandeurs du système, de modifier les lois de contrôle et de stocker des données.

Les outils logiciels, utilisés pour la traduction, la charge et l'interfaçage du programme sont les suivants :

- Matlab Simulink : puissant logiciel de simulation qui permet la simulation et développement des lois de contrôle pour être ensuite implémentées sur le banc d'essais.
- **RTI (Real Time Interface):** librairie spécifique de Simulink pour l'interface et le contrôle du DSP.
- **RTW (Real Time Work) :** compilateur des fichiers Simulink pour être chargés dans le DSP.
- **Control Desk :** Malgré les nombreuses fonctionnalités de ce logiciel, il n'est utilisé dans notre cas que pour récupérer, si nécessaire, les grandeurs mesurées ou calculés que l'on a stockées dans la mémoire flash lors des essais.

L'interaction de ces logiciels est illustrée graphiquement par la Figure A7.4.



Figure A7.4 Communication et interaction des différents logiciels du banc

La Figure A7.5 présente un cas de commande implanté dans l'environnement décrit précédemment.

A7.1.3 Métrologie

Compte tenu du vaste domaine d'application du banc, il existe de nombreux points de mesure : 32, ce qui permet d'avoir accès à toutes les grandeurs de contrôle. Les capteurs employés, présentés ci-dessous, sont connectés à des cartes de conditionnement afin d'adapter les niveaux et de filtrer les signaux d'entrée du DSPACE.

- LEM AV 100-250 pour les tensions alternatives.
- LEM AV 100-500 pour les tensions continues.
- LEM LA 55-P pour les signaux de courant.

Les gains des signaux mesurés sont :

• Pour les tension alternatives : 1 V / 25 V.

- Pour les tensions continues : 1 V / 50 V.
- Pour les courants : 1 V / 5 A.



Figure A7.5 Interface graphique de contrôle du banc d'essais sous Matlab Simulink

A7.1.4 Eléments de manœuvre

Du fait des nombreuses topologies permises par le banc, on utilise une carte pour la commande des contacteurs. Cette commande est réalisée directement sous Matlab Simulink. Le Tableau A7.1 liste les contacteurs employés lors des essais et leur fonction respective.

CONTACTEUR	FONCTION	Essais
KM1, KM3	Alimentation banc	Source de courant
KM4	Raccordement à la charge indépendante	Source de tension
VMC	Connexion à la source de tension	Source de tension Source de courant
K.WIO	Connexion à une charge résistive variable	Régulation de V _{BUS} par l'OT.

Tableau A7.1 Contacteurs employés

ANNEXE VIII

REPONSE FREQUENTIELLE DES CORRECTEURS

Cette annexe présente les réponses fréquentielles des correcteurs présentés dans le chapitre III. Pour faciliter la compréhension des résultats, les courbes sont classifiées en fonction de chaque correcteur.



A8.1 Contrôle du hacheur parallèle de la PAC

Figure A8.1 Diagramme de Bode du hacheur parallèle classique

Figure A8.2 Diagramme de Bode d'un régulateur PI

Hacheur parallèle classique avec un correcteur PI







Hacheur parallèle classique avec un correcteur RST

Figure A8.4 Réponse fréquentielle du hacheur parallèle par rapport à la perturbation

A8.2 Contrôle du hacheur de L'ES

Hacheur réversible avec un correcteur P, boucle courant



Figure A8.5 Réponse fréquentielle en BO de la boucle de courant du hacheur réversible

Figure A8.6 Réponse fréquentielle en BF de la boucle de courant du hacheur réversible





Figure A8.7 Réponse fréquentielle du hacheur réversible par rapport à la perturbation

A8.3 Contrôle de l'OT

Régulation en courant, OT avec un correcteur PI en repère tournant



Figure A8.8 Réponse fréquentielle par rapport à la perturbation de la boucle de courant de l'OT



Régulation en courant, OT avec un correcteur RST













Figure A8.12 Réponse fréquentielle de l'OT par rapport à la perturbation



Régulation en tension, boucle de courant de l'OT utilisant un correcteur P

Figure A8.13 Réponse fréquentielle en BO de la boucle de courant de l'OT

Figure A8.14 Réponse fréquentielle en BF de la boucle de courant de l'OT











Figure A8.17 Réponse fréquentielle par rapport à la perturbation de la boucle de tension de l'OT







Figure A8.18 Réponse fréquentielle en BO de la boucle de tension de l'OT

Figure A8.19 Réponse fréquentielle en BF de la boucle de tension de l'OT



Figure A8.20 Réponse fréquentielle par rapport à la perturbation de la boucle de tension de l'OT



Régulation en tension, boucle de tension de l'OT utilisant un RST



Figure A8.22 Réponse fréquentielle en BF de la boucle de tension de l'OT



Figure A8.23 Réponse fréquentielle par rapport à la perturbation de la boucle de courant de l'OT

ANNEXE IX VALIDATION EXPERIMENTALE DES MODELES DE PAC

Le but de cette annexe est de présenter les travaux expérimentaux réalisés pour la validation des modèles de PAC.

Bien que la PAC sur laquelle nos études se focalisent, n'ait pas été construite, nous avons disposé d'une autre PAC industrielle de type PEM. Ses principales caractéristiques sont présentées dans le Tableau A9.1. Elle a été construite par le fabricant de la PAC de 100 kW, en l'occurrence Axane, filiale d'Air Liquide pour la production des PEM et qui est actuellement la plus importante compagnie française pour le développement des PAC. Par ailleurs, les essais expérimentaux ont été réalisés au sein de la société Axane sur un banc dédié au test des nouveaux stacks.

Nombre de cellules = 50	Température de fonctionnement = 60 °C
Courant nominal = 50 A	Tension nominale = 30.1 V

Tableau A9.1 Caractéristiques de la PAC utilisée expérimentalement

Le but des essais est donc de valider expérimentalement les principes théoriques des modèles présentés précédemment.

L'intérêt de ces essais réside dans le fait qu'ils ont été effectués sur un stack destiné à une application réelle. Cela constitue une différence par rapport à la plupart des travaux existants, car ceux-ci n'analysent généralement qu'une seule cellule expérimentale dont l'utilisation se cantonne au domaine de la recherche. De plus, la PAC utilisée est de même technologie que celle prévue dans le projet FEBUSS, ce qui implique de nombreuses similitudes.

Les conditions des essais réalisés sont décrites dans le Tableau A9.2. Il faut noter les nombreux problèmes rencontrés du fait de la présence de courants parasites lors des essais. A cause de cela, on n'a pas pu exploiter la totalité des résultats obtenus. En outre, le manque de temps a empêché de répéter les essais. [Eva-03] détaille cette problématique de mesure. Compte tenu de tout cela, on a considéré qu'une étude additionnelle se révèle nécessaire pour valider et confirmer les résultats obtenus. De ce fait, on considère ces résultats comme une première validation du principe de modélisation mais elle doit être suivie d'une étude plus approfondie.

Puissance nominale = 1.5 kW	Stœchiométrie = 3	
Température de fonctionnement = 60 °C		
Débit d'air = 130.7 1 / min	Débit d'hydrogène = $5.91 / \min$	

Tableau A9.2 Conditions des essais

A9.1 Descriptions des essais

Les essais réalisés ont consisté en la mesure de l'amplitude et du déphasage de la composante alternative de la tension aux bornes de la PAC en réponse à un courant sinusoïdal superposé au courant de polarisation de la PAC. Cela permet d'identifier l'impédance de la PAC à diverses fréquences. Le point de polarisation choisi est le point de puissance nominale. Pour garantir que les conditions de la PAC restent invariables, l'amplitude du courant sinusoïdal est inférieure à 10 % de celle du courant nominal. Cette méthode est très habituelle pour caractériser les générateurs électrochimiques.

Les fréquences des essais ont varié de quelques dizaines de Hz jusqu'à plusieurs kHz. Puisqu'ils ont été réalisés manuellement, le nombre de points par courbe a donc été limité. Cela a rendu l'allure définitive de la courbe plutôt imprécise (Voir Figure A9.1).

Le diagramme d'impédance obtenu expérimentalement permet de découpler différents comportements de la PAC :

- Un comportement inductif aux hautes fréquences dû aux inductances.
- Un comportement purement résistif autour de 2 kHz.
- Un comportement capacitif à basses fréquences.

Sur cette dernière partie, il faut noter que nous ne trouvons pas exactement l'allure du demicercle théorique [Wal-01][Can-02]. Cela peut être dû en partie aux problèmes constatés lors des essais et aussi à la forte valeur de la fréquence minimale des essais qui empêche de constater l'arc lié aux phénomènes de diffusion, en très basses fréquences. L'allure de la courbe est définie principalement par le transport de charges.



Figure A9.1 Diagramme d'impédance mesuré

A9.2 Modèles proposées

Pour déduire un modèle de ce diagramme, on s'est basé d'abord sur un modèle ayant un seul arc capacitif. Celui-ci ainsi que ses paramètres et la comparaison de sa réponse à la réalité sont illustrés sur la Figure A9.2. On peut constater des différences importantes entre l'impédance déduite de la modélisation et celle mesurée, surtout autour de 300 Hz. Cette différence peut être due en partie à un deuxième arc de transfert de charges.



Figure A9.2 Diagrammes d'impédance : mesure et modélisation avec 1 arc



Figure A9.3 Modèle avec un arc

Paramètres du modèle

 $C_{M} = 60 \text{ mF } R_{Mp} = 190 \text{ m}\Omega$ $R_{Ms} = 79 \text{ m}\Omega \quad L_{C} = 0.45 \text{ }\mu\text{H}$

Ces différences nous ont donc conduit à introduire un deuxième « arc » dans notre modèle. Cela rend le modèle plus complexe mais plus précis ; l'amélioration est notable (Voir Figure A9.4).





Figure A9.5 Modèle avec deux arcs

Paramètres du modèle $C_{M1} = 10 \text{ mF } R_{Mp1} = 20 \text{ m}\Omega$ $C_{M2} = 80 \text{ mF } R_{Mp2} = 210 \text{ m}\Omega$ $R_{Ms} = 78.5 \text{ m}\Omega$ $L_C = 0.45 \mu \text{H}$

Les résultats obtenus ont montré que la réponse d'une PAC peut être représentée par un circuit électrique équivalent ; cela valide la modélisation ici employée.

A9.3 Conclusions

On constate qu'une modélisation exacte d'une PAC exige un modèle relativement complexe, composé de plusieurs composants électriques conduisant aux différents arcs sur le diagramme d'impédance. De plus, cela exige une grande précision des mesures pour assurer une représentation correcte de la PAC..

Compte tenu du fait que la PAC de 100 kW n'est pas encore construite, un modèle d'une telle précision n'est pas d'une nécessité absolue. C'est pourquoi nous avons adopté le modèle basé sur un seul arc qui suffit amplement à nos besoins.

Résumé : Interfaçage et contrôle commande de piles a combustible pour applications stationnaires et transport.

L'objectif de cette thèse est le dimensionnement, l'optimisation et la commande de l'interfaçage électrique pour groupes électrogènes à base de pile à combustible (PAC) pour des applications transport et stationnaire. Cette thèse a d'abord sélectionné la structure la mieux adaptée pour des PAC de 100 kW en se focalisant sur les applications les plus prometteuses. Cette structure a été optimisée par un procédé combinant les algorithmes génétiques et une méthode déterministe. Les différents niveaux de contrôle de l'interface de puissance ont été ensuite conçus et analysés. Concernant le niveau intermédiaire, divers correcteurs ont été proposés pour chaque convertisseur. Ils sont testés et validés en simulation. Les correcteurs concernant l'onduleur de tension sont validés expérimentalement. Finalement, la thèse propose trois stratégies globales de gestion des flux énergétiques. Elles sont validées et comparées en simulation grâce à des données réelles issues d'applications choisies.

Mots clés

Contrôle commande, pile à combustible, gestion d'énergie, optimisation, modélisation, simulation, électronique de puissance, interface de puissance.

Summary : Power interface and control of fuel cell destinated for transport an stationary applications

The aim of this thesis is the design, the optimization and the control of the power interface for Fuel Cell (FC) based generators destined for transport and stationary applications. First of all, this thesis selected one power structure for 100 kW FC, focusing on the most promising applications. This structure was optimised by a method combining the genetic algorithms and one deterministic algorithm. The different control levels of the power interface were conceived and tested after. Concerning the intermediate control level, this work proposes several correctors for each converter. They were tested and validated in simulation. The storage element was also analysed. The correctors concerning the inverter were validated experimentally. Finally, the thesis proposes three global energy strategies to manage the power flows, each of them is focused on one working criterion. They were validated and compared in simulation thanks to real data obtained from the previously chosen applications.

Keywords

Control command, fuel cell, energy management, optimization, modelling, simulation, power electronics, power interface.

Intitulé et adresse de l'UFR ou du laboratoire :

Laboratoire d'Electrotechnique de Grenoble Rue de la Houille Blanche – BP 46 38402 Saint Martin d'Hères