

Optimisation par essais particuliers appliquée à la co-conception du circuit d'air d'une pile à combustible

A. Sari, C. Espanet, D. Hissel



Laboratoire de recherche
en Electronique, Electrotechnique
et Systèmes

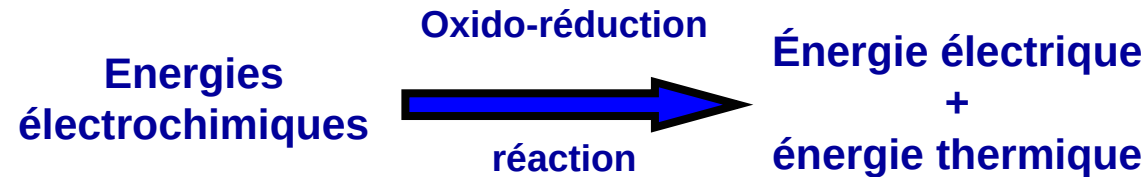


1. Introduction
2. Système considéré
3. Méthodologie d'optimisation
4. Résultats
5. Conclusions et perspectives

Introduction: la PAC et ses auxiliares

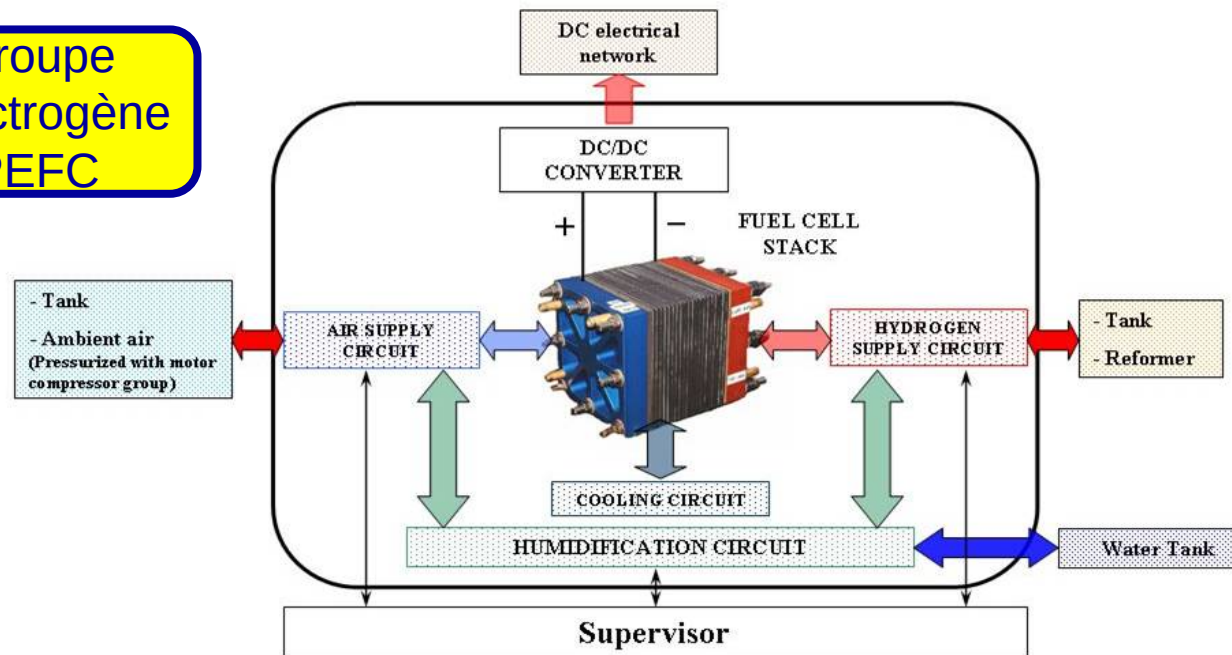
3

PAC



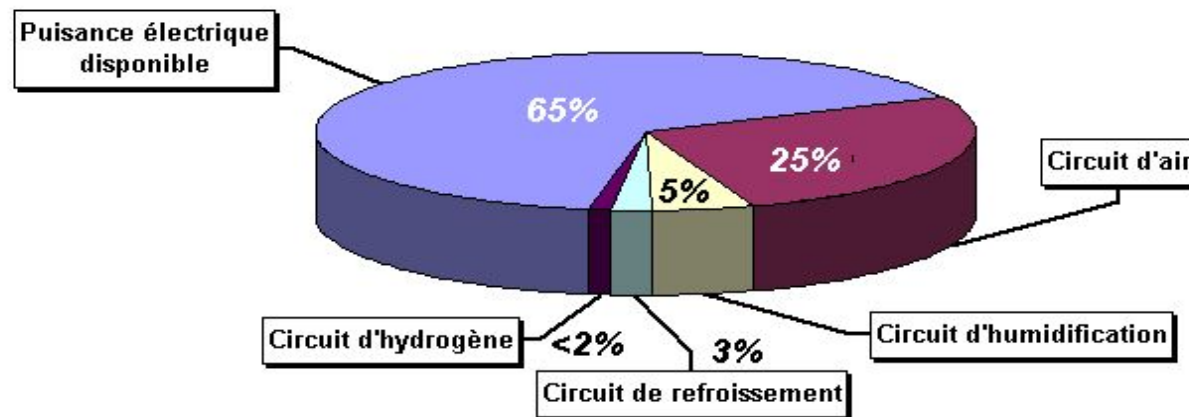
L'efficacité nette de conversion de l'énergie apportée par le carburant en énergie électrique est autour de 50%

Groupe
Électrogène
PEFC



Groupe
Électrogène
PEFC

- Jusqu'à 35% de l'énergie produite est consommée par les circuits auxiliaires, ce qui amène le rendement du groupe à 32%.



- Pour illustrer, sur une pile de 5kW, seulement une puissance autour de 3kW est vraiment disponible sur le bus continu.
→ Ainsi, l'optimisation énergétique du circuit d'air est nécessaire !

Circuit d'alimentation en air

Tête de compression

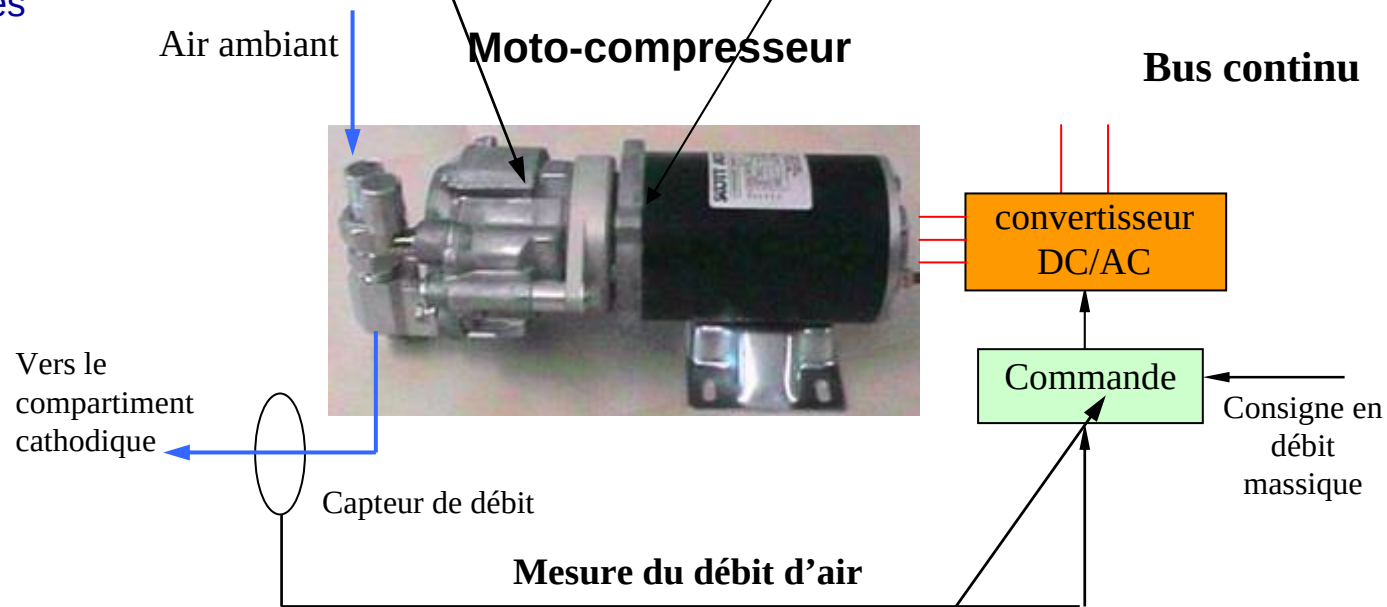
- Conception de têtes de compression consacrée aux applications PAC embarquées

Moteur d'entraînement

- Choisir la technologie de moteur appropriée aux applications PAC embarquées
- conception optimale

Moto-compresseur

Bus continu



Système de contrôle/commande

- lois de commande
- dynamique élevée
- efficacité améliorée

Approche classique

Optimisation séquentielle :

- moteur électrique
- lois de commande non linéaire

→ **Est ce vraiment l'optimum ?**

Approche proposée

Optimisation simultanée :

- moteur électrique
- + lois de commande non linéaire

→ **Évaluer l'efficacité d'une telle approche**

1. Introduction
- 2. Système considéré**
3. Méthodologie d'optimisation
4. Résultats
5. Conclusions et perspectives

Machine électrique

Type :

Synchrone à aimants permanents
Moteur brushless

Structure :

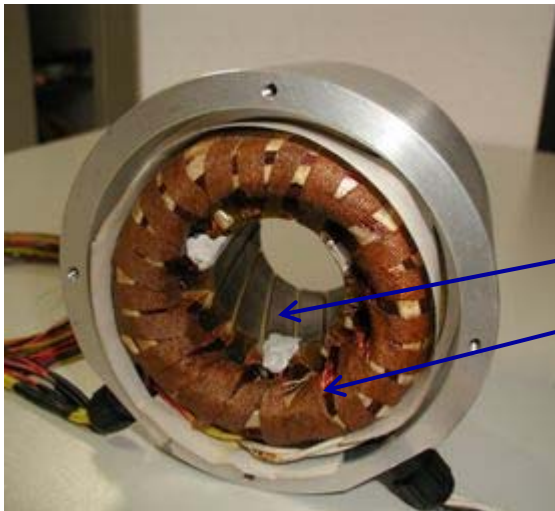
- Stator feuilleté
- Bobinages
- Aimants permanents
- Axe

Caractéristiques :

- Bon couple spécifique
- Bon rendement
- Bon facteur de puissance

Mais coût élevé

stator



rotor

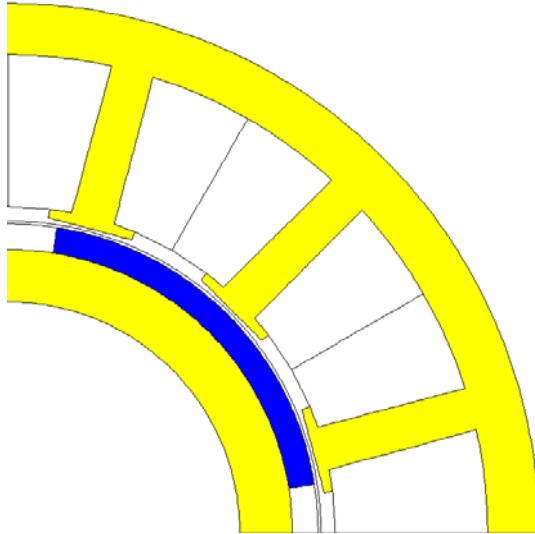


Système Considéré

Modélisation de la machine électrique

Paramètres
de constructions

- Ex :
- L_{fer} → longueur de la machine
 - H_{ai} → hauteur d'aimant
 - N_s → nombre de spire
 - ...

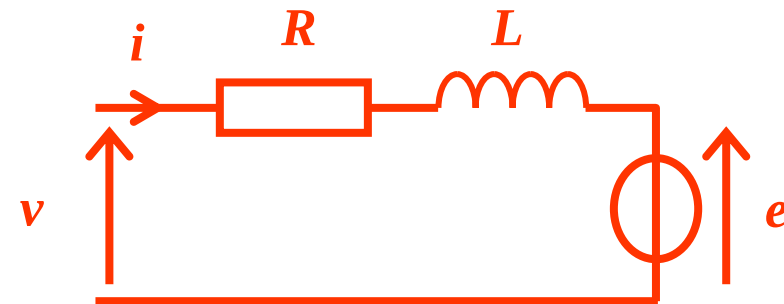


Modèle géométrique

Modèle
de la
Machine

Paramètres
électromécaniques

- Ex :
- R → résistance de bobinage
 - L → inductance de bobinage
 - e → force électromotrice
 - T → couple électromagnétique
 - ...

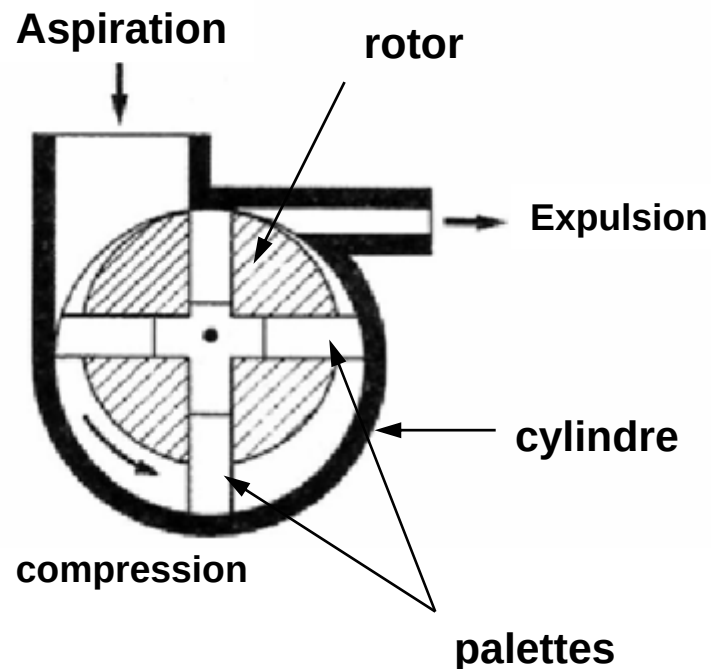


Modèle électrique

- *Modèle Non linéaire*
- *Entrées et sorties contraintes*
- *Variables continues et discrètes*

Tête de compression

- Compresseur rotatif spécifique aux applications PAC
- Conception pour un stack PEFC de 5kW
- Débit massique nominal = 6g/s (200A à une stœchiométrie de 2)
- Pression de sortie maximale = 2 bars (absolue)

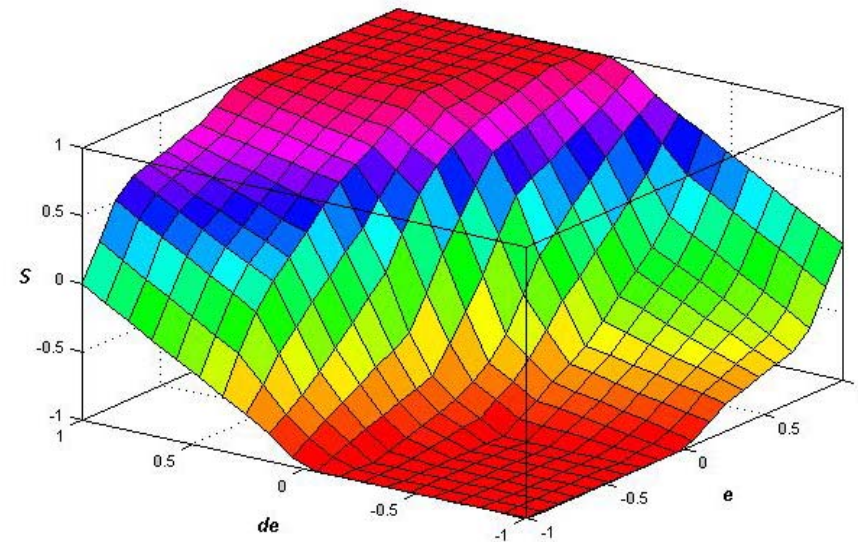
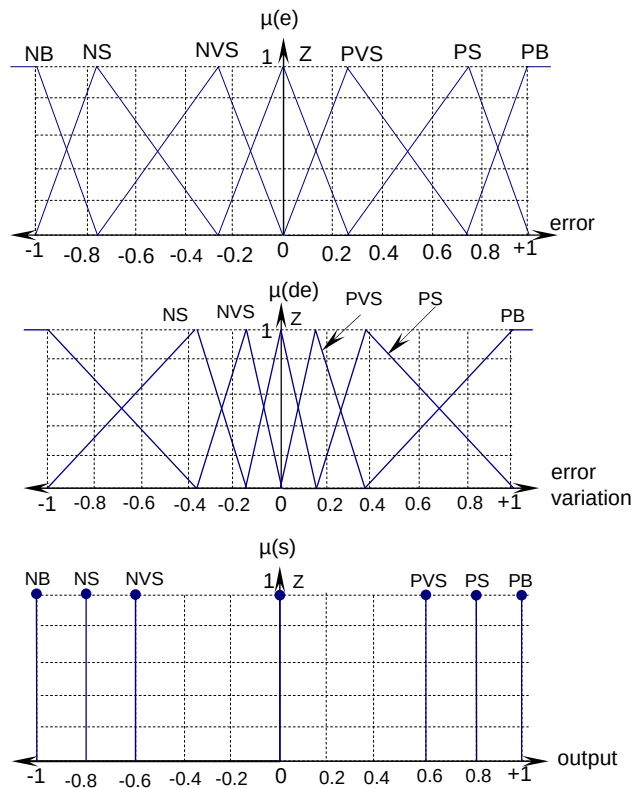


- Nombre de palettes: 3
- Diamètre de rotor: 8.2 cm
- Diamètre de cylindre: 9.8 cm
- Longueur de cylindre: 6.7 cm
- Débit massique maximal: 10 g/s
- Pression de sortie: 1.5 bars

Système Considéré

Lois de commande non linéaire : floue

- Nombre énorme de paramètres à régler (ici 74 paramètres) !
- 10 paramètres sont identifiés comme les plus influents (pour ce processus d'optimisation)

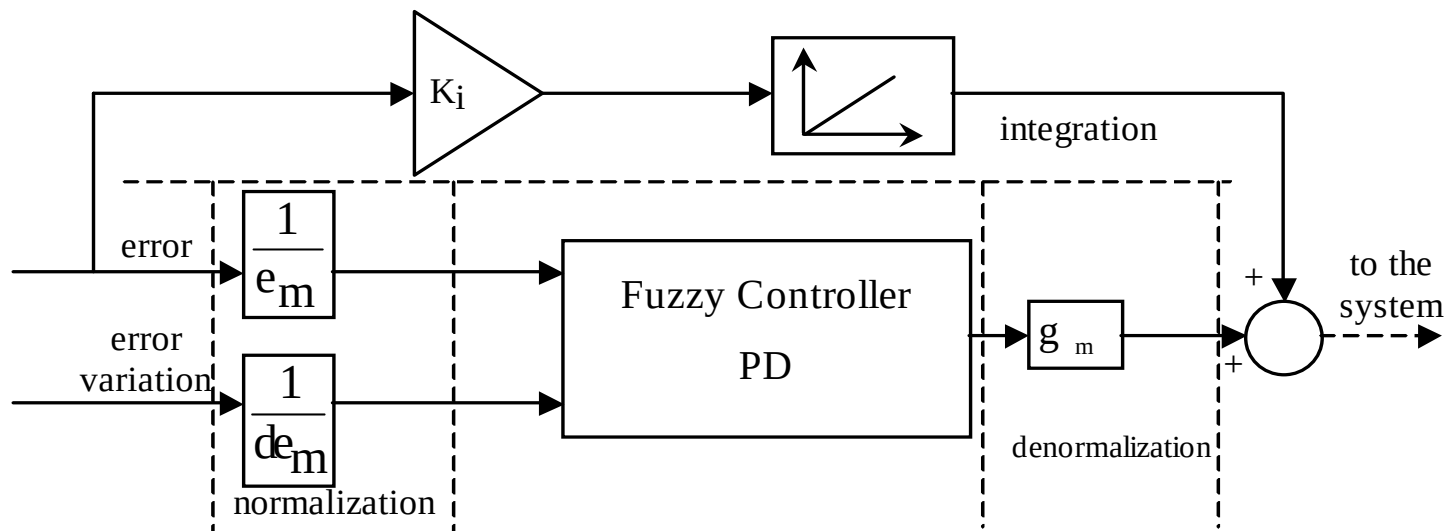


Surface de commande

Fonctions d'appartenance des entrées et sortie

Lois de commande floue

- Commande en PD+I floue



- Pourquoi un contrôle flou ?

- système non linéaire
- dynamique élevée en assurant une bonne stabilité
- permet de diminuer la consommation énergétique du système
- robuste face aux variations paramétriques
- ne nécessite pas de modèle
- commande en temps réel possible aisément

1. Introduction
2. Système considéré
- 3. Méthodologie d'optimisation**
4. Résultats
5. Conclusions et perspectives

Choix de la méthode

Type de méthode	Convergence	Type d'optimum	Contraintes	Programmation
Déterministe (gradient, SQP...)	<i>rapide</i>	<i>local</i>	<i>possible et facile</i>	<i>compliqué</i>
Stochastique (AG, tabou, OEP...)	<i>lent</i>	<i>global</i>	<i>possible mais ardue</i>	<i>facile</i>

Optimisation par essais particuliers

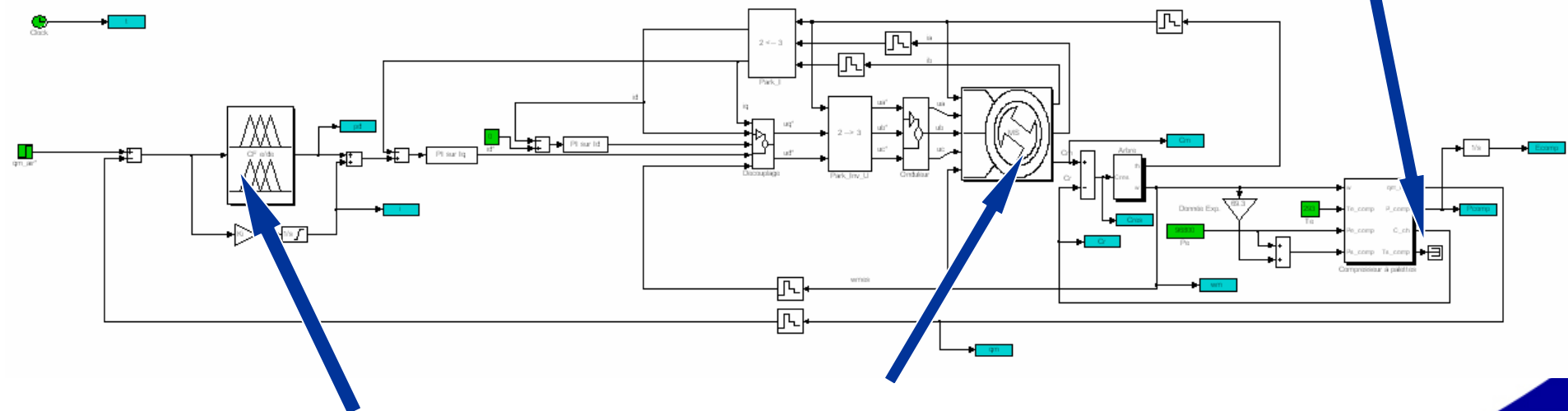
- L'OEP, essentiellement sur des systèmes réel non linéaire, obtient de bon optima et une meilleur convergence avec une plus petite taille de population que la plus part des algorithmes évolutionnaires :
 - **J. Kennedy and R. C. Eberhart**, "Particle swarm optimization," in *Proc. IEEE Int. Conf. Neural Networks* Perth, Australia, 1995, vol. IV, pp.1942–1948.
 - **P. N. Suganthan**, « Particle Swarm Optimiser with Neighbourhood Operator », Department of Computer Science and Electrical Engineering, in *Proc. IEEE Int. Congr. Evolutionary Computation*, vol. 3, 1999, pp.1958-1962.
 - **M. Clerc, J. Kennedy**, « The Particle Swarm – Explosion, Stability and Convergence in a Multidimensional Complex Space », *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, Vol.6, No. 1, Février 2002.
 - **Parsopoulos. K. E. and Vrahatis. M. N.**, "Particle swarm optimization method for constrained optimization problems", *Proceedings of the Euro-international Symposium on Computational intelligence* 2002.
 - **Suomin Cui et Daniel S. Weile**, « Application of a Parallel Particle Swarm Optimization Scheme to the Design of Electromagnetic Absorbers », *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol.53, no. 11, Novembre 2005.
 - **Chao-Ming Huang, Chi-Jen Huang, and Ming-Li Wang**, « A Particle Swarm Optimization to Identifying the ARMAX Model for Short-Term Load Forecasting », *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol.20, No. 2, mai 2005.
 - **Jong-Bae Park, Ki-Song Lee, Joong-Rin Shin et Kwang Y. Lee**, « Economic Load Dispatch for Non-Smooth Cost Functions Using Particle Swarm Optimization », *IEEE Transactions on Power Systems*, Volume 20, Issue 1, Feb. 2005 Page 41–42.

Choix de la variante d'OEP

Version d'OEP	Convergence	Type d'optimum	Contraintes	Programmation
Version basique	<i>rapide</i>	<i>Globale mais recherche fine lente</i>	<i>imprécis</i>	<i>facile</i>
Version avec coefficient variable	<i>Très rapide</i>	<i>Globale avec recherche fine rapide mais peu être piégé</i>	<i>imprécis</i>	<i>facile</i>
Version avec coefficient de constriction	<i>Très rapide</i>	<i>Globale</i>	<i>imprécis</i>	<i>facile</i>
Version avec division de travail	<i>Très rapide</i>	<i>Globale</i>	<i>imprécis</i>	<i>compliqué</i>
Les Tribes	<i>lent</i>	<i>Globale</i>	<i>imprécis</i>	<i>Compliqué mais utilisation très simple</i>
Version avec essais coopérative	<i>Moins rapide</i>	<i>Globale même avec une dimensionnalité très importante</i>	<i>Plus précis</i>	<i>compliqué</i>

OEP

- Exécution de l'algorithme d'OEP :
 - Environnement Matlab/Simulink
 - nombre de paramètres à optimiser = 21
 - nombre d'essais = 1
 - nombre de particules = 20
 - nombre d'itérations = 401
 - un concept de voisinage basé sur l'interaction sociale



10 paramètres
(Commande en logique floue)

11 paramètres
(Conception du moteur électrique)

Le critère d'évaluation : le point essentiel

L'objectif est de minimiser le critère d'évaluation qui sera en fonction du cahier des charge du groupe moto-compresseur. C'est ce critère qui drainera l'évolution des particules afin d'atteindre l'optimum recherché.

Quelques exemples:

- **rendement**
- **consommation énergétique**
- **consommation énergétique + temps de montée (ou réponse)**
- **rendement + masse des parties actives**
- **consommation énergétique + masse des parties actives**
- **consommation énergétique + coût des matières premières**

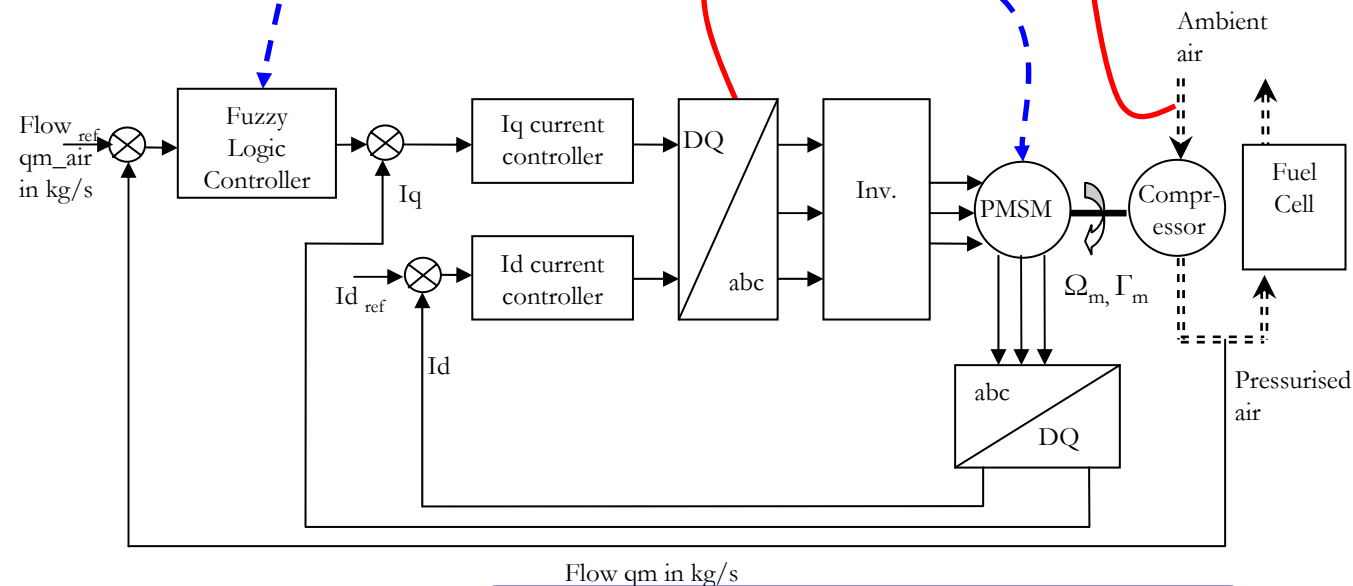
Cycle d'optimisation

PSO algorithme:

- Génération des paramètres structuraux du moteur et les paramètres de la loi de commande,
 - Suite à l'étape 3: évaluation de la fonction objectif (f) à minimiser. Puis modification des paramètres afin de minimiser f.
- Etape1**

Résultats de simulation:

- Évaluation de la consommation énergétique
 - Évaluation des performances (erreur statique, temps de montée ...)
- Etape3**



Flow qm in kg/s

Etape2

Modèle Matlab/Simulink du
Moteur + Compresseur+ loi de commande

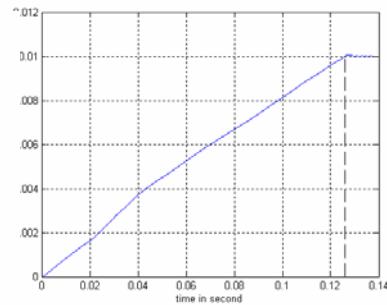
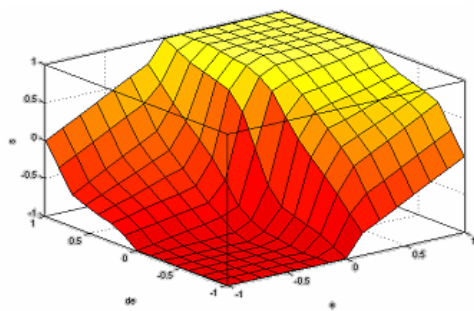
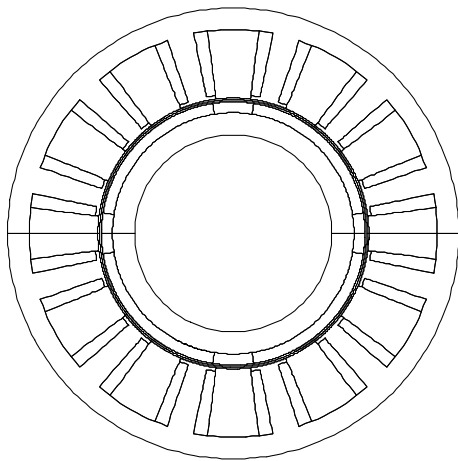
1. Introduction
2. Système considéré
3. Méthodologie d'optimisation
- 4. Résultats**
5. Conclusions et perspectives

Optimisation sur consigne de débit de type indicielle

Caractéristiques

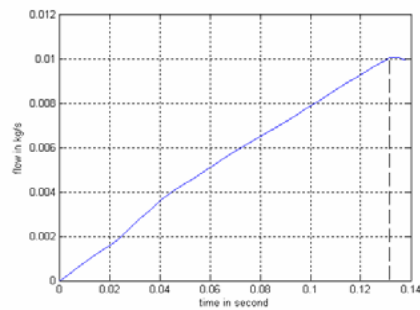
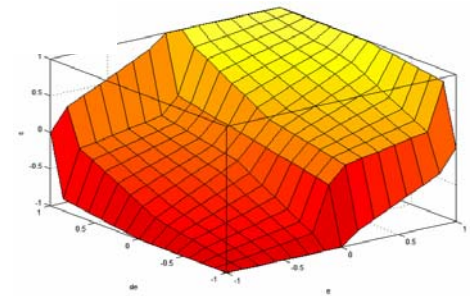
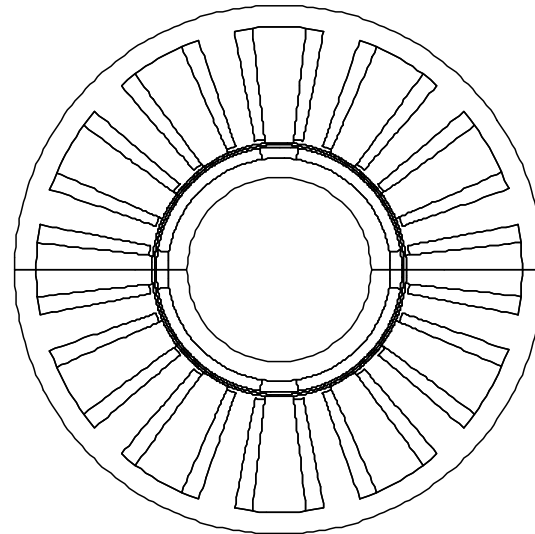
du système initial :

- critère d'évaluation : **0.80**
- consommation d'énergie : 763,6 J
- temps de montée : 125 ms

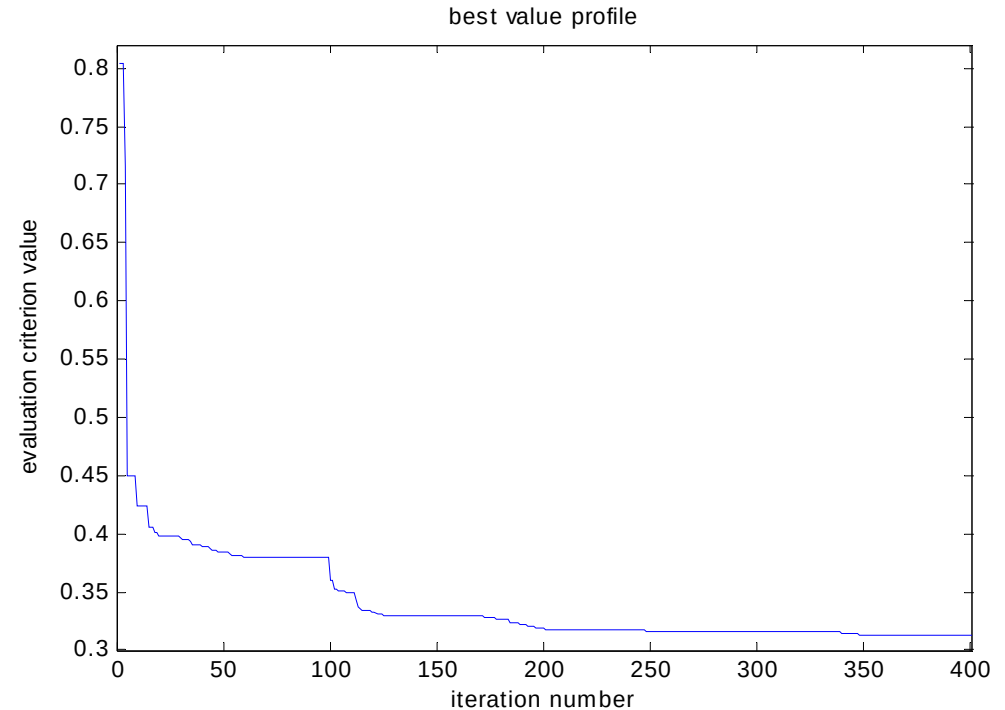
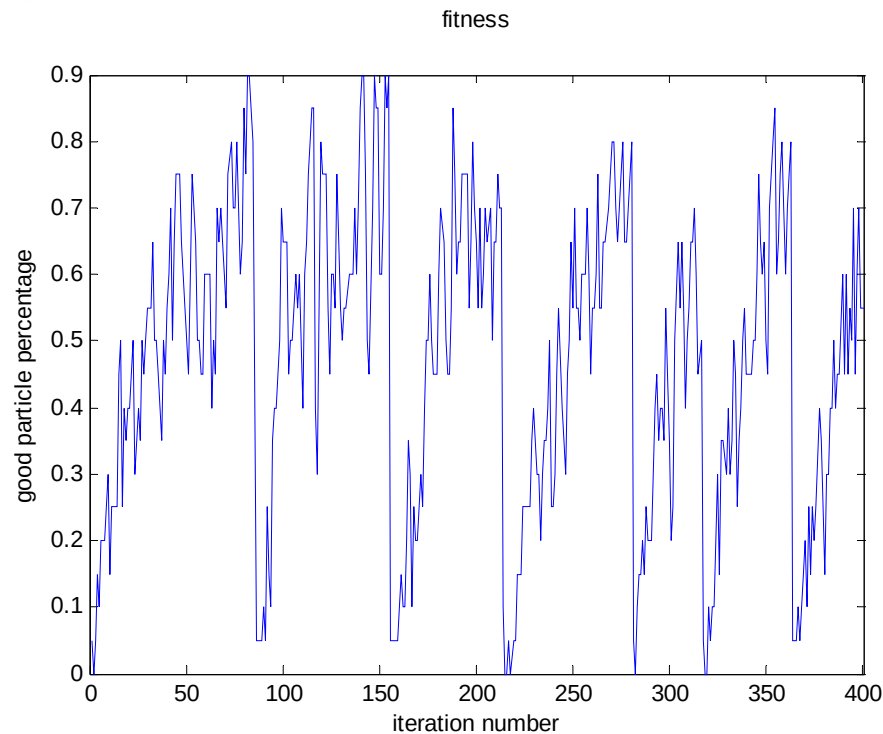


Résultats de l'optimisation séquentielle :

- critère d'évaluation : **0.65**
- consommation d'énergie : 458.7 J
- temps de montée : 132 ms



Résultats d'optimisation



- Le critère d'évaluation est un compromis entre la consommation d'énergie et la performance (le temps de montée)
- Les contraintes sont prises en considération par un système de pénalité (une valeur de critère élevé est donné aux particules qui ne respectent pas les contraintes)

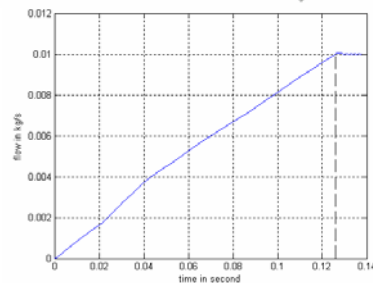
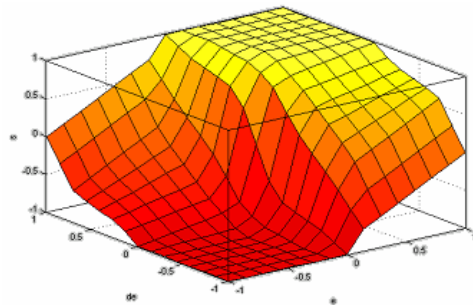
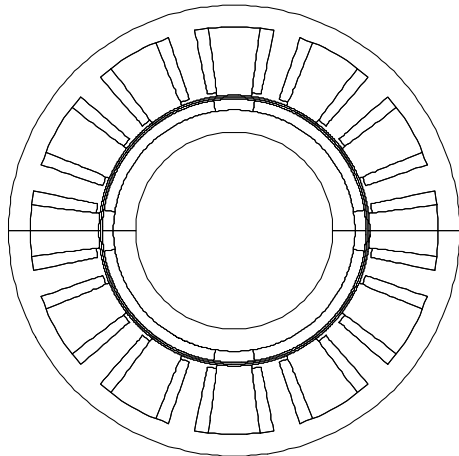
Résultats – Optimisation sur consigne indicielle

23

Caractéristiques

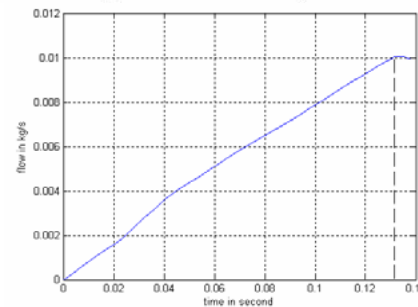
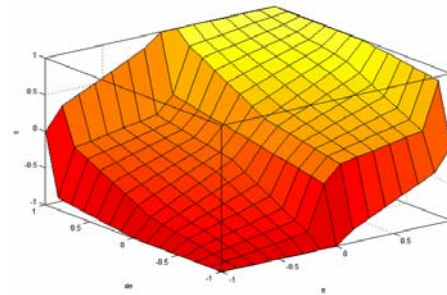
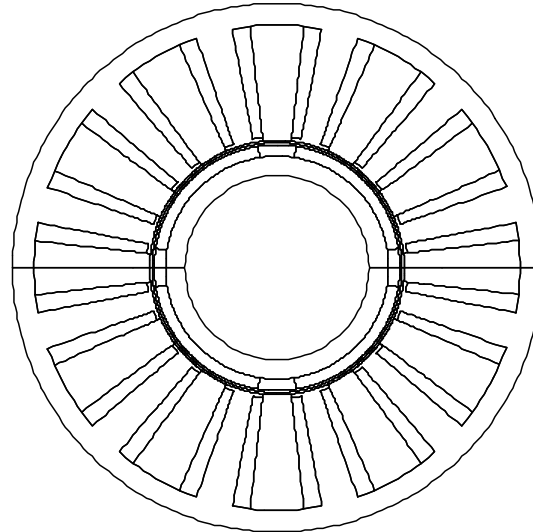
du système initial :

- critère d'évaluation : **0.80**
- consommation d'énergie : 763,6 J
- temps de montée : 125 ms



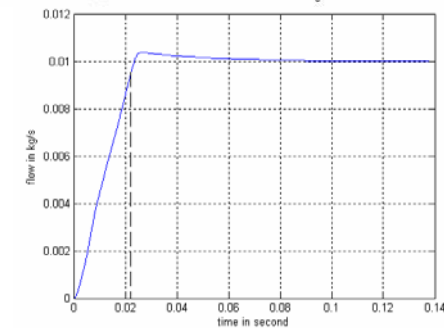
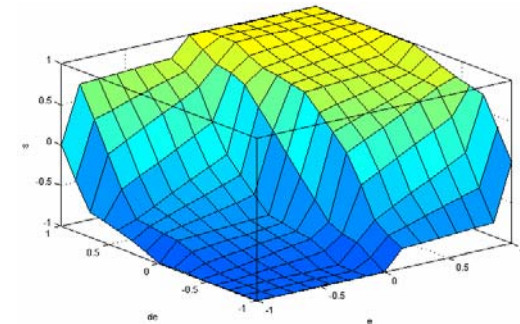
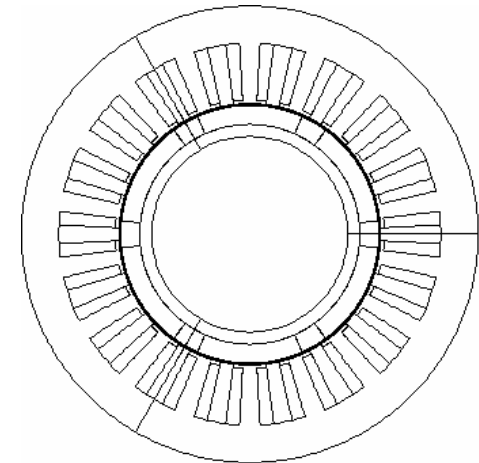
Résultats de l'optimisation séquentielle :

- critère d'évaluation : **0.65**
- consommation d'énergie : 458.7 J
- temps de montée : 132 ms



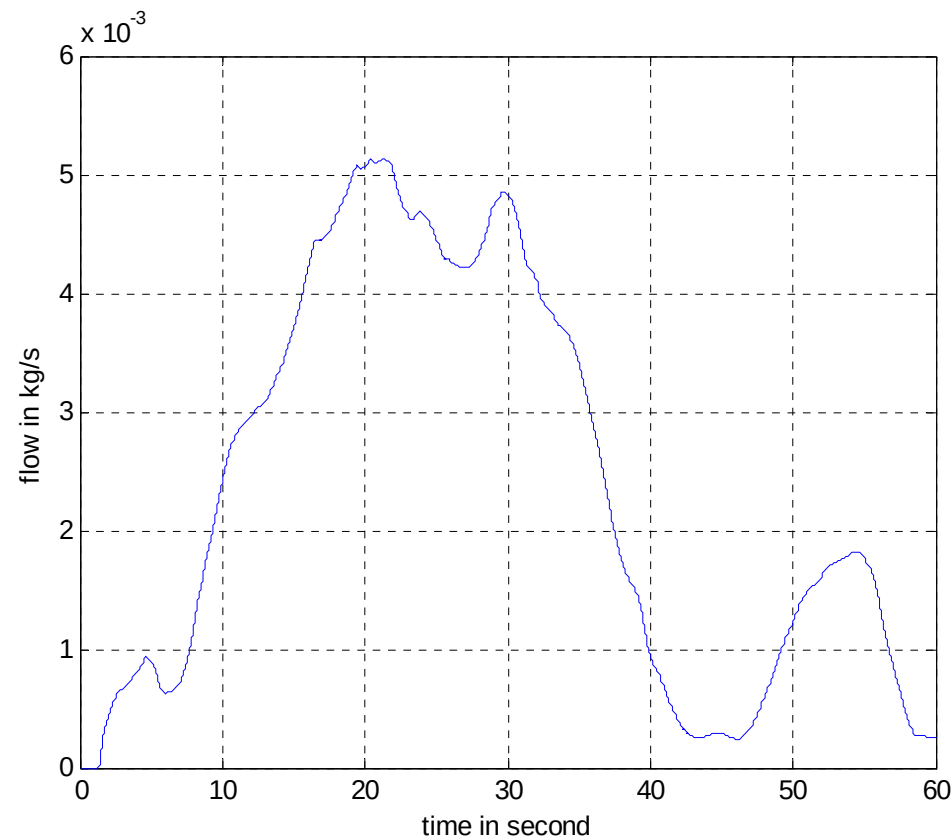
Résultats d'optimisation simultanée :

- critère d'évaluation : **0.31**
- consommation d'énergie : 568,2 J
- temps de montée : 25 ms



Optimisation sur consigne de débit de type cyclique

Advisor® (profile “CYC_UDDS: Urban Dynamometer Driving Schedule”).

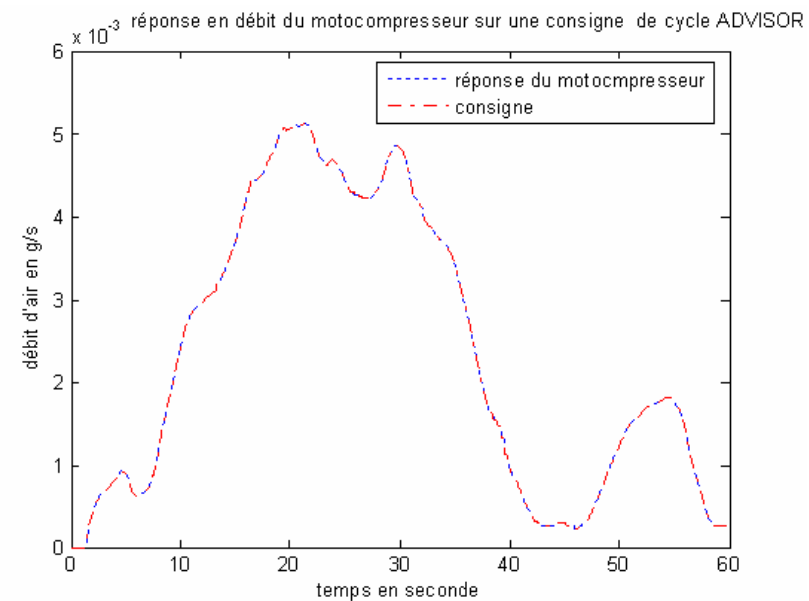
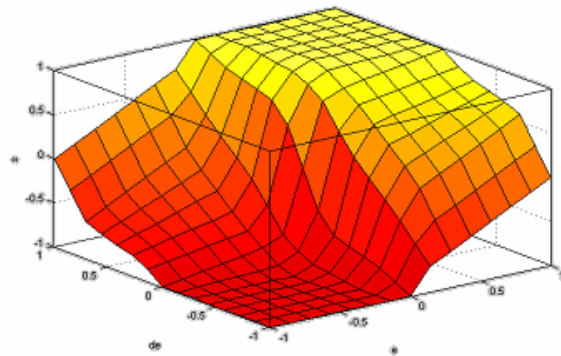
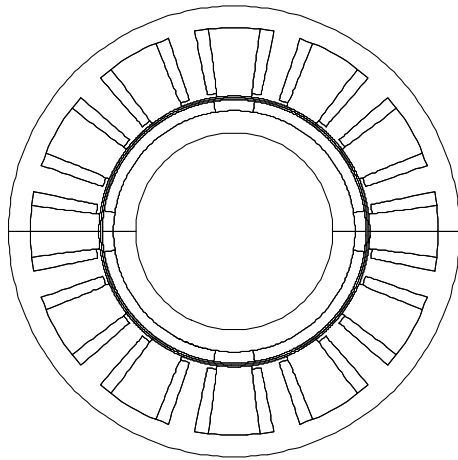


Fuel cell air mass flow consumption profile from Advisor® (CYC_UDDS)on 60 seconds

Résultats – Caractéristiques du système initial sur consigne cyclique²⁶

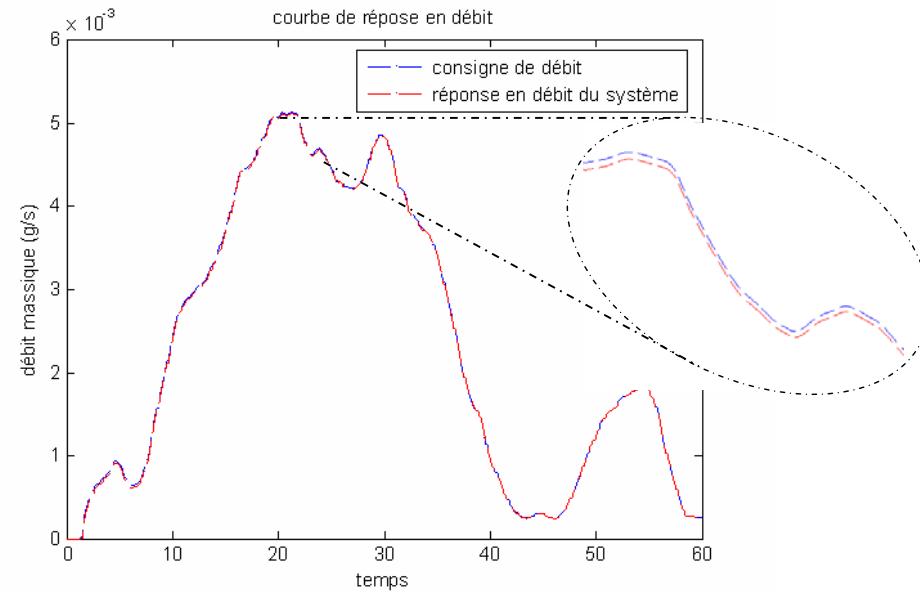
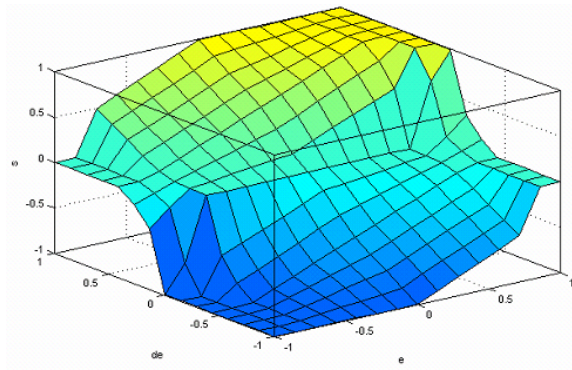
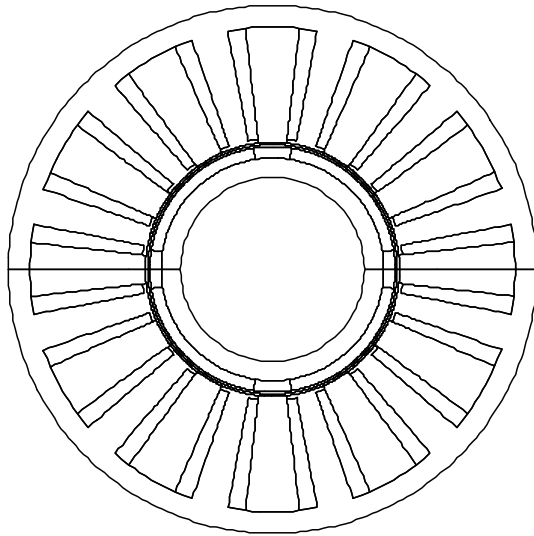
Caractéristiques du système initial :

- consommation d'énergie : 45129 J
- déficit d'air max : $8.17E-4$ g
- paires de pôle : 2



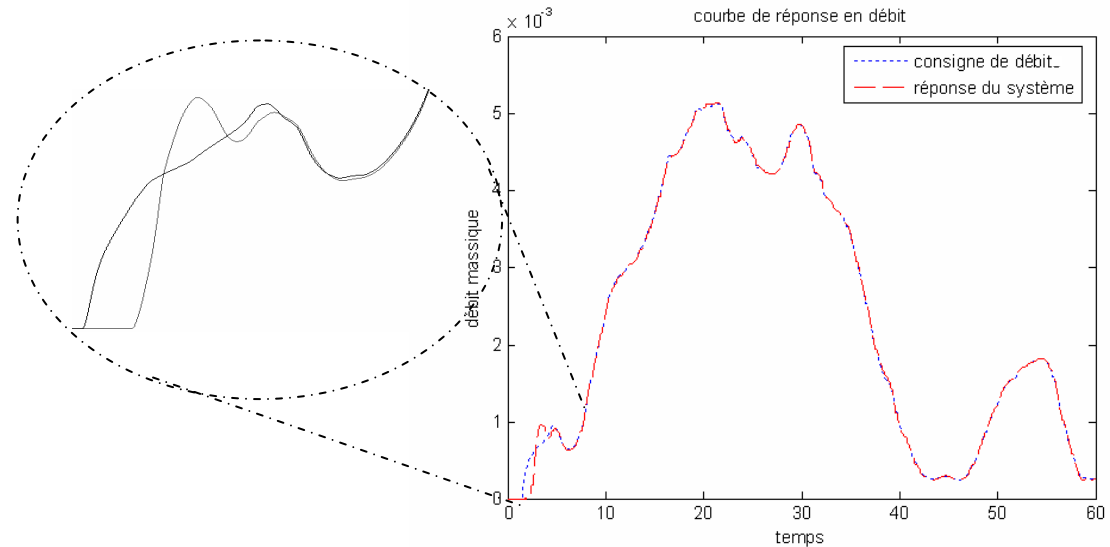
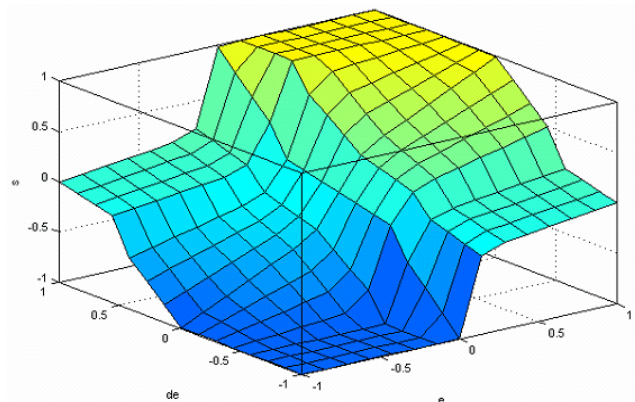
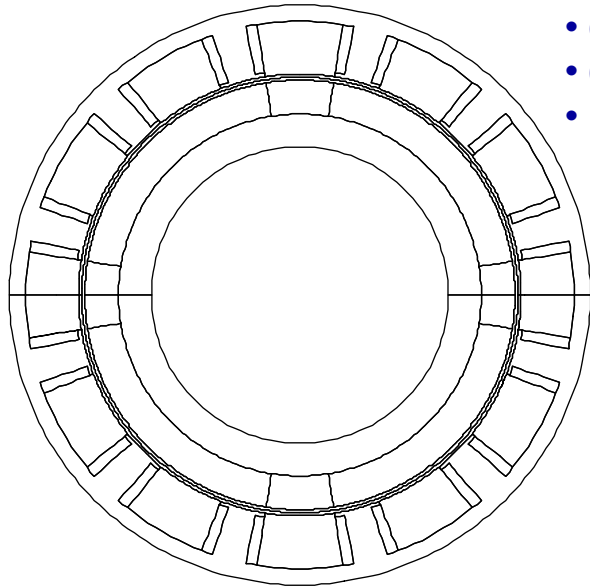
Résultats de l'optimisation séquentielle :

- critère d'évaluation : **0.65**
- consommation d'énergie : 9718 J
- déficit d'air max : 0.689 g
- paires de pôle : 2



Résultats de l'optimisation simultanée (critère énergétique) :

- critère d'évaluation : **0.61**
- consommation d'énergie : 9133 J
- déficit d'air max : 0.48 g
- paires de pôle : 2



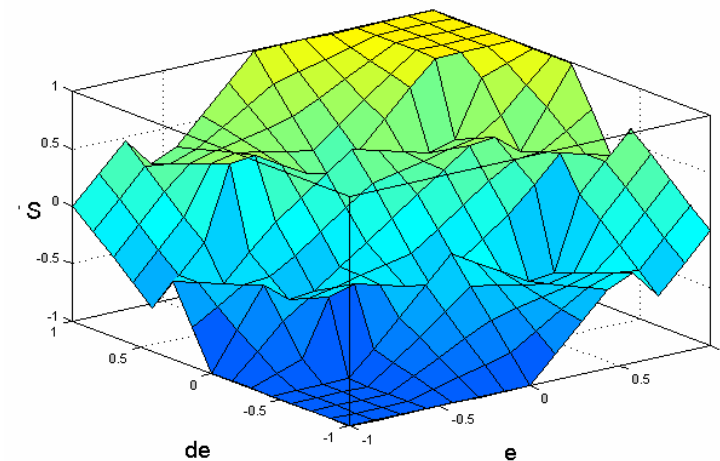
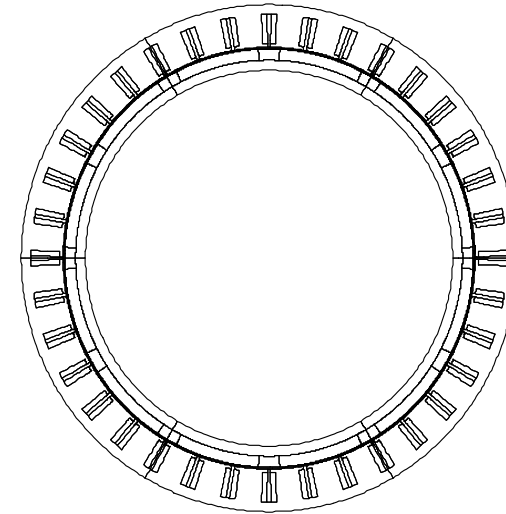
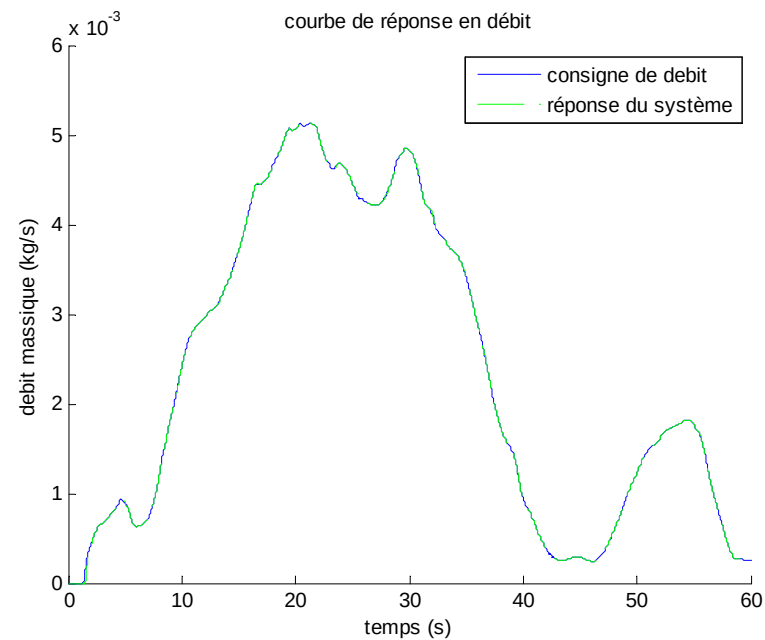
Résultats – Récapitulatif pour une consigne cyclique

29

Grandeurs caractéristiques	Système initial	Système optimisé séquentiellement sur consigne cyclique	Système optimisé simultanément sur consigne cyclique et un critère d'énergie
Rayon extérieur de la culasse statorique	<i>61.6 mm</i>	<i>79.1 mm</i>	<i>70.4 mm</i>
Longueur de fer	<i>30 mm</i>	<i>49.2 mm</i>	<i>73.9 mm</i>
Paires de pôle	2	2	2
Énergie consommée sur un cycle	45129 J	9718 J	9133 J
Masse des parties actives de la machine	3.39 kg	6.94 kg	8.72 kg

Résultats de l'optimisation simultanée (critère masse – énergie) :

- critère d'évaluation : **0.52**
- consommation d'énergie : 10886 J
- déficit d'air max : 4.34e-005 g
- paires de pôle : 6



Résultats – Récapitulatif pour une consigne cyclique

31

Grandeurs caractéristiques	Système initial	Système optimisé séquentiellement sur consigne cyclique	Système optimisé simultanément sur consigne cyclique et un critère d'énergie	Système optimisé simultanément sur consigne cyclique et un critère masse/énergie
Rayon extérieur de la culasse statorique	61.6 mm	79.1 mm	70.4 mm	75.7 mm
Longueur de fer	30 mm	49.2 mm	73.9 mm	16.05 mm
Paires de pôle	2	2	2	6
Énergie consommée sur un cycle	45129 J	9718 J	9133 J	10886 J
Masse des parties actives de la machine	3.39 kg	6.94 kg	8.72 kg	1.07 kg

1. Introduction
2. Système considéré
3. Méthodologie d'optimisation
4. Résultats
5. **Conclusions et perspectives**

Conclusions

- Une nouvelle approche d'optimisation proposée pour le moto-compresseur dédié aux PAC.
- L'OEP semble être très efficace (en termes de complexité, temps demandés par optimisation, résultats,...) pour ce problème.

Perspectives

- Les différents résultats ont prouvé que l'optimisation simultanée utilisé avec des OEP donne de meilleurs résultats que l'approche séquentielle mais cela doit être, maintenant, validé sur une expérimentation en grandeur réelle.
- Inclure les paramètres de conception principaux du compresseur dans le processus d'optimisation simultané.
- Améliorer le modèle en introduisant les pertes rotorique.

Optimisation par essais particuliers appliquée à la co-conception du circuit d'air d'une pile à combustible

A. Sari, D. Hissel, C. Espanet



Laboratoire de recherche
en Electronique, Electrotechnique
et Systèmes

