

Gestion de l'air dans les piles à combustible de type PEM

— État de l'art et perspectives —

Benjamin Blunier, Abdellatif Miraoui
benjamin.blunier@utbm.fr



2–3 avril 2008

Journées thématiques Société Française de Thermique (CEA, Grenoble)
Piles à combustible à membrane PEMFC, modélisation et retour d'expérience

- 1 État de l'art et objectifs des systèmes pile à combustible
 - Présentation du système PàC
 - Verrous technologiques du système PàC
 - Objectifs et travaux
- 2 Système d'alimentation en air
 - Rôle et objectifs
 - Choix du compresseur
 - Topologies des systèmes de compression et d'humidification
 - Synthèse sur la gestion de l'air
- 3 Simulation et validation expérimentale
 - Banc de tests
 - Résultats expérimentaux et simulés
 - Prédiction de la puissance de la pile
- 4 Conclusion et perspectives

Plan

- 1 État de l'art et objectifs des systèmes pile à combustible
 - Présentation du système PàC
 - Verrous technologiques du système PàC
 - Objectifs et travaux
- 2 Système d'alimentation en air
 - Rôle et objectifs
 - Choix du compresseur
 - Topologies des systèmes de compression et d'humidification
 - Synthèse sur la gestion de l'air
- 3 Simulation et validation expérimentale
 - Banc de tests
 - Résultats expérimentaux et simulés
 - Prédiction de la puissance de la pile
- 4 Conclusion et perspectives

Système pile à combustible (1/2)

Propriétés de la pile PEFC ($\text{H}_2 + \frac{1}{2} \text{O}_2 \rightarrow \text{H}_2\text{O} + \text{électricité} + \text{chaleur}$)

- Production de chaleur (à évacuer)
- Production d'électricité
- Production d'eau (à évacuer)
- Tension de sortie non constante

Besoins de la pile à combustible

- Alimentation en combustible (H_2) sous pression
- Alimentation en comburant (O_2) sous pression
- Humidification de la membrane

Systeme pile à combustible (1/2)

Propriétés de la pile PEFC ($\text{H}_2 + \frac{1}{2} \text{O}_2 \rightarrow \text{H}_2\text{O} + \text{électricité} + \text{chaleur}$)

- Production de chaleur (à évacuer)
- Production d'électricité
- Production d'eau (à évacuer)
- Tension de sortie non constante

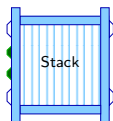
Besoins de la pile à combustible

- Alimentation en combustible (H_2) sous pression
- Alimentation en comburant (O_2) sous pression
- Humidification de la membrane

Conclusion

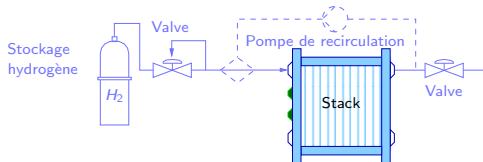
Nécessité d'un grand nombre d'auxiliaires pour satisfaire les besoins de la pile et assurer son bon fonctionnement

Systeme pile à combustible (2/2)



Sous-systèmes

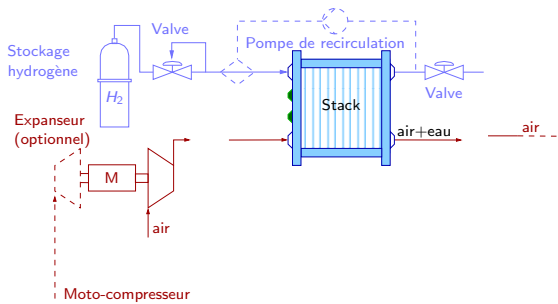
Système pile à combustible (2/2)



Sous-systèmes

- Hydrogène

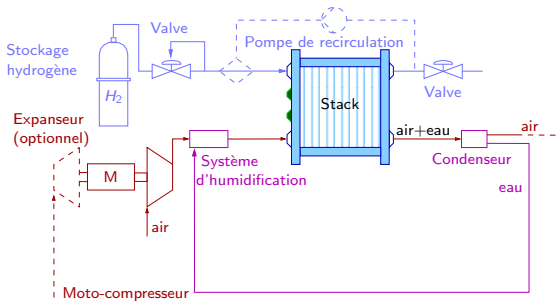
Système pile à combustible (2/2)



Sous-systèmes

- Hydrogène
- Air

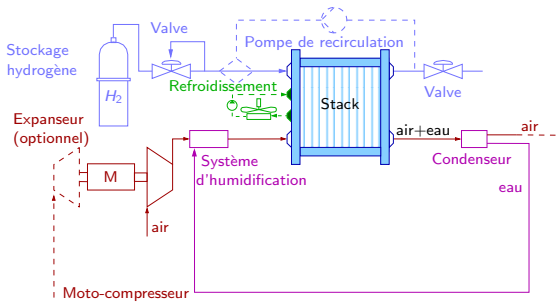
Système pile à combustible (2/2)



Sous-systèmes

- Hydrogène
- Air
- Humidification

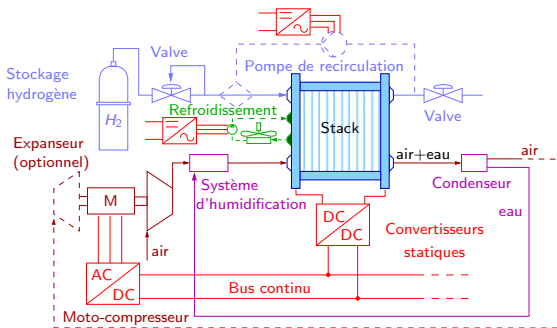
Système pile à combustible (2/2)



Sous-systèmes

- Hydrogène
- Air
- Humidification
- **Refroidissement**

Système pile à combustible (2/2)

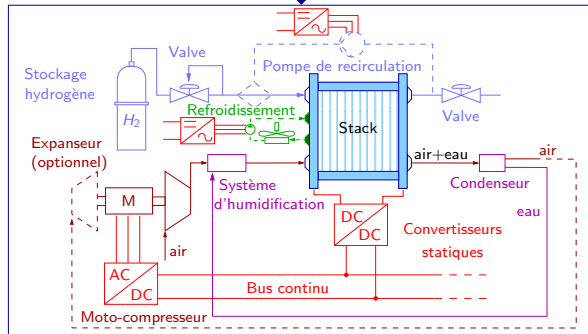
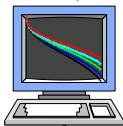


Sous-systèmes

- Hydrogène
- Air
- Humidification
- Refroidissement
- **Puissance**

Système pile à combustible (2/2)

Contrôle, supervision

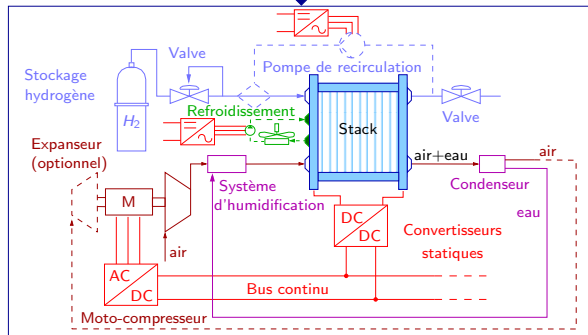
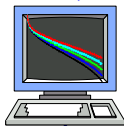


Sous-systèmes

- Hydrogène
- Air
- Humidification
- Refroidissement
- Puissance
- **Contrôle**

Système pile à combustible (2/2)

Contrôle, supervision



Sous-systèmes

- Hydrogène
- Air
- Humidification
- Refroidissement
- Puissance
- Contrôle

Conclusion

Le système pile est complexe \Rightarrow nécessite une approche globale pour la conception et l'optimisation

Verrous technologiques du système PàC

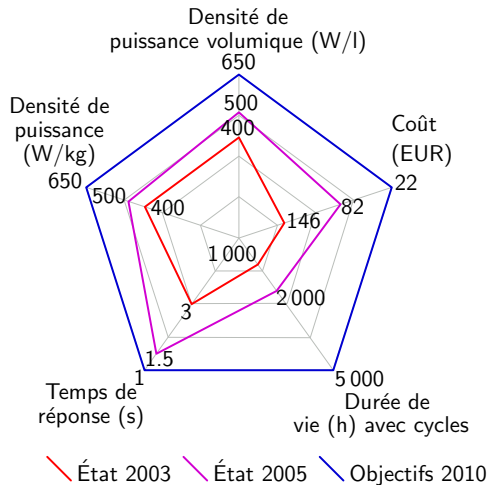
Verrous (applications transports)

- **Coût** : concerne le système
- **Durée de vie** : concerne principalement le cœur de pile
- **Démarrage à froid** : concerne principalement le cœur de pile et certains auxiliaires
- **Compacité** : concerne le système
- **Temps de réponse** : concerne principalement les auxiliaires

Verrous technologiques du système PàC

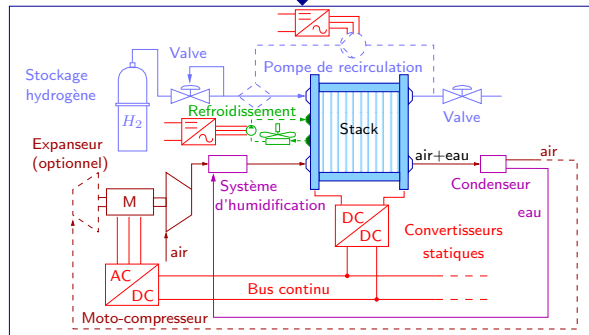
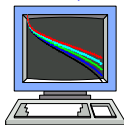
Verrous (applications transports)

- **Coût** : concerne le système
- **Durée de vie** : concerne principalement le cœur de pile
- **Démarrage à froid** : concerne principalement le cœur de pile et certains auxiliaires
- **Compacité** : concerne le système
- **Temps de réponse** : concerne principalement les auxiliaires

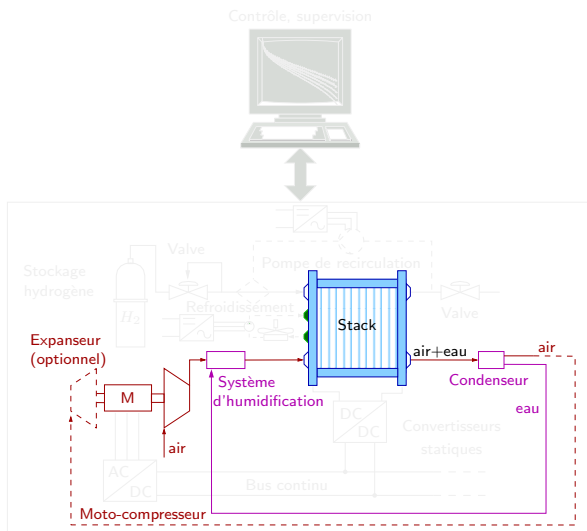


Objectifs et travaux sur le gestion de l'air

Contrôle, supervision



Objectifs et travaux sur le gestion de l'air



Gestion de l'air

- Influence du compresseur sur le système pile à combustible
- Choix et modélisation du compresseur
- Choix de l'humidification
- Modélisation de la PàC orientée gestion de l'air

Plan

- 1 État de l'art et objectifs des systèmes pile à combustible
 - Présentation du système PàC
 - Verrous technologiques du système PàC
 - Objectifs et travaux
- 2 Système d'alimentation en air
 - Rôle et objectifs
 - Choix du compresseur
 - Topologies des systèmes de compression et d'humidification
 - Synthèse sur la gestion de l'air
- 3 Simulation et validation expérimentale
 - Banc de tests
 - Résultats expérimentaux et simulés
 - Prédiction de la puissance de la pile
- 4 Conclusion et perspectives

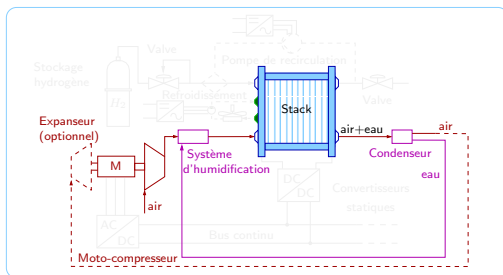
Rôle et objectifs du système d'alimentation en air

Rôle

- Transport de l'air
- Purification de l'air
- Mise sous pression du système
- Humidification de l'air

Contraintes

- Air exempt d'huile
- Limitation des ondulations de pression
- Bonne dynamique
- Compacité élevée



Système de compression : haute ou basse pression ?

Avantages de la haute pression

- Amélioration du rendement du cœur de pile (V_{gain})

Inconvénients de la haute pression

- Diminution du rendement du système (V_{perte})

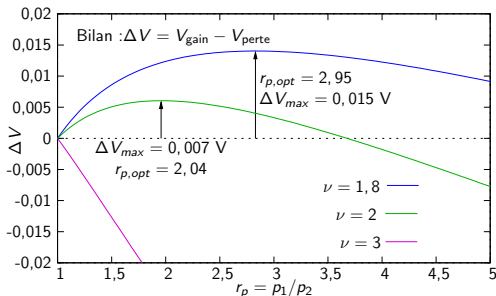
Système de compression : haute ou basse pression ?

Avantages de la haute pression

- Amélioration du rendement du cœur de pile (V_{gain})

Inconvénients de la haute pression

- Diminution du rendement du système (V_{perte})



$$V_{\text{gain}} = C \ln \left(\frac{p_2}{p_1} \right)$$

$$V_{\text{perte}} = \nu k \left(\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1 \right)$$

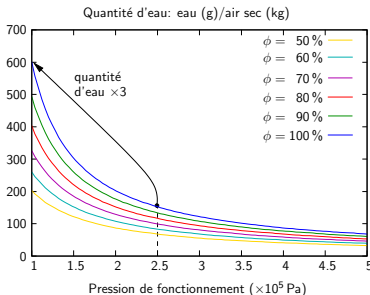
Système de compression : haute ou basse pression ?

Avantages de la haute pression

- Amélioration du rendement du cœur de pile (V_{gain})
- Amélioration de la gestion de l'eau

Inconvénients de la haute pression

- Diminution du rendement du système (V_{perte})



Système de compression : haute ou basse pression ?

Avantages de la haute pression

- Amélioration du rendement du cœur de pile (V_{gain})
- Amélioration de la gestion de l'eau
- **Système compact**

Inconvénients de la haute pression

- Diminution du rendement du système (V_{perte})

Système de compression : haute ou basse pression ?

Avantages de la haute pression

- Amélioration du rendement du cœur de pile (V_{gain})
- Amélioration de la gestion de l'eau
- Système compact

Inconvénients de la haute pression

- Diminution du rendement du système (V_{perte})

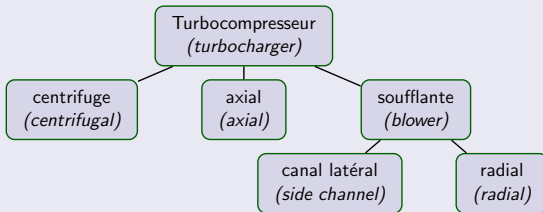
Conclusion

Le choix de la pression de fonctionnement résulte d'un compromis entre les objectifs de compacité, de gestion de l'eau et du rendement du système

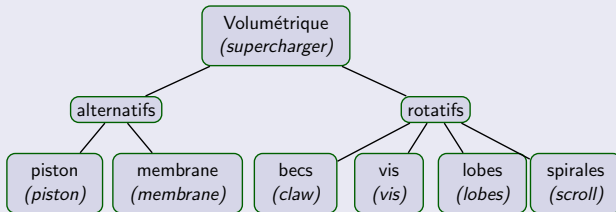
Suivant le système la pression optimale est d'environ 1,5 – 2,5 bar

Système de compression : quel type de compresseur ?

Compresseurs dynamiques



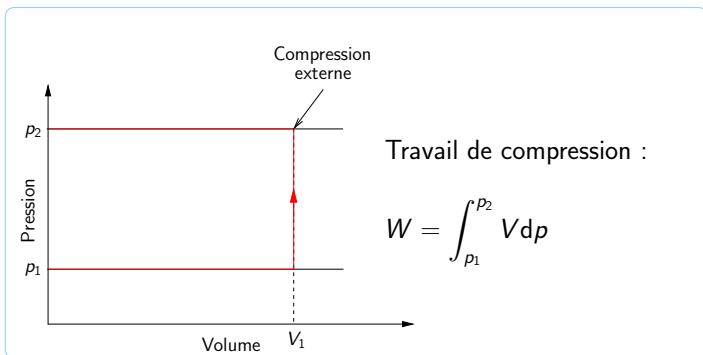
Compresseurs volumétriques



Système de compression : avec ou sans compression interne ?

Deux sous-familles de compresseurs volumétriques

- 1 Sans compression interne (compression isochore)
- 2 Avec compression interne (variation de volume)



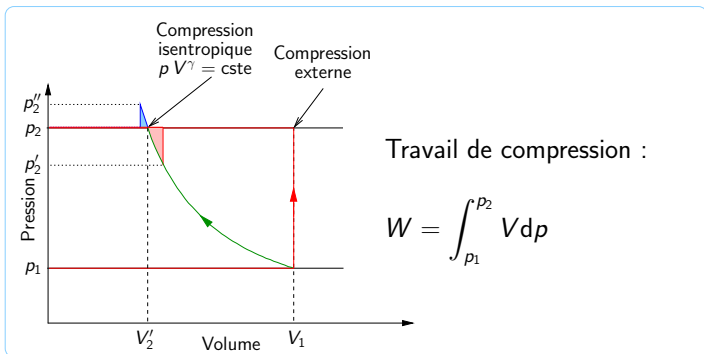
Travail de compression :

$$W = \int_{p_1}^{p_2} V dp$$

Système de compression : avec ou sans compression interne ?

Deux sous-familles de compresseurs volumétriques

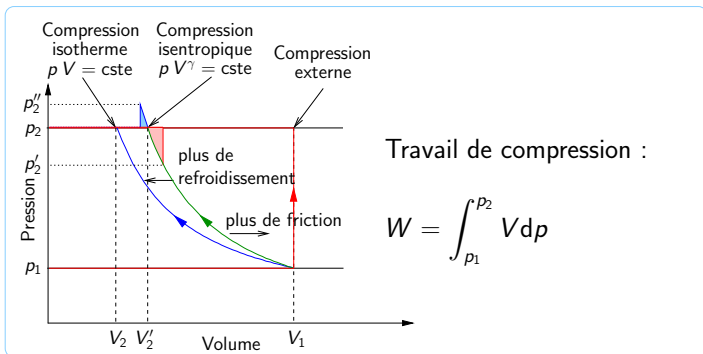
- 1 Sans compression interne (compression isochore)
- 2 Avec compression interne (variation de volume)



Système de compression : avec ou sans compression interne ?

Deux sous-familles de compresseurs volumétriques

- 1 Sans compression interne (compression isochore)
- 2 Avec compression interne (variation de volume)

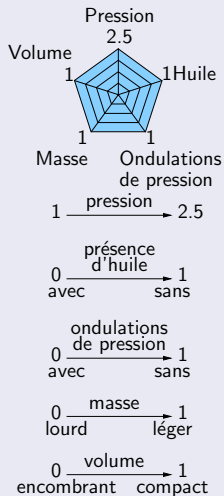


Travail de compression :

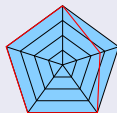
$$W = \int_{p_1}^{p_2} V dp$$

Système de compression : synthèse

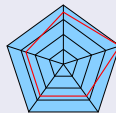
Objectifs, Légende



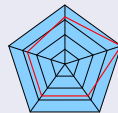
Comparaison



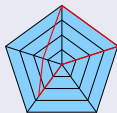
Centrifuge



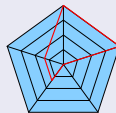
Becs



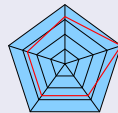
Lobes



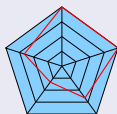
Membrane



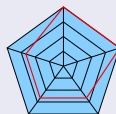
Piston



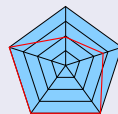
Palettes



Vis



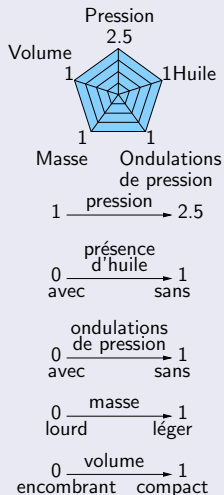
Scroll



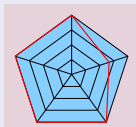
Canal latéral

Système de compression : synthèse

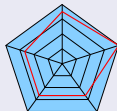
Objectifs, Légende



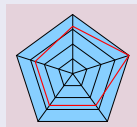
Comparaison



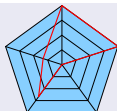
Centrifuge



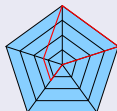
Becs



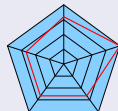
Lobes



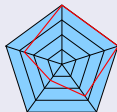
Membrane



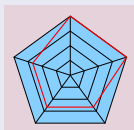
Piston



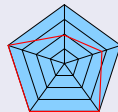
Palettes



Vis



Scroll

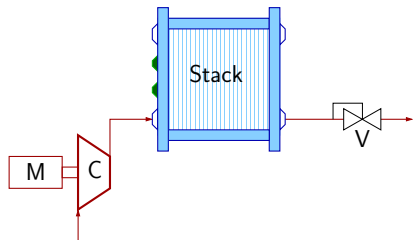


Canal latéral

Topologies : système de compression

Topologies envisageables

- 1 Compresseur seul (centrifuge ou volumétrique)
- 2 Compresseur-expandeur (centrifuge ou volumétrique)
- 3 Compresseur volumétrique et turbocompresseur



Avantage

Simple et compact

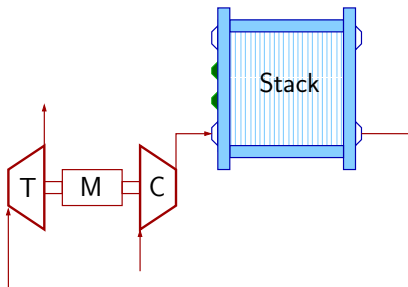
Inconvénient

Efficacité plus faible

Topologies : système de compression

Topologies envisageables

- 1 Compresseur seul (centrifuge ou volumétrique)
- 2 **Compresseur-expandeur (centrifuge ou volumétrique)**
- 3 Compresseur volumétrique et turbocompresseur



Avantage

Efficacité plus élevée

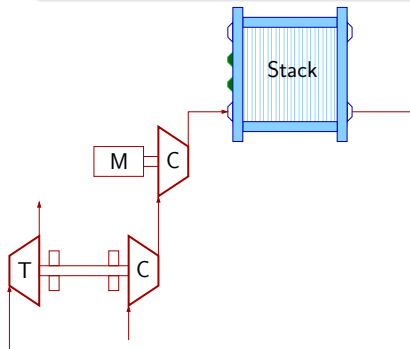
Inconvénient

Complexe (plus cher)

Topologies : système de compression

Topologies envisageables

- 1 Compresseur seul (centrifuge ou volumétrique)
- 2 Compresseur-expandeur (centrifuge ou volumétrique)
- 3 **Compresseur volumétrique et turbocompresseur**



Avantage

Efficacité plus élevée

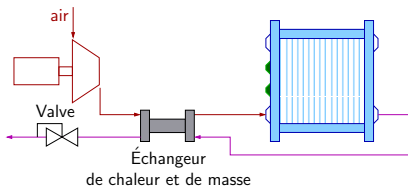
Inconvénient

Très complexe (plus cher)

Topologies : systèmes d'humidification

Topologies envisageables

- 1 Échangeur de chaleur et de masse
- 2 Injection directe d'eau (compresseur-humidificateur intégrés)



Avantages

Simple et consommation énergétique supplémentaire nulle

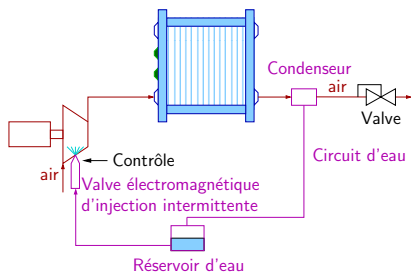
Inconvénients

- Système passif
- Difficilement contrôlable

Topologies : systèmes d'humidification

Topologies envisageables

- 1 Échangeur de chaleur et de masse
- 2 Injection directe d'eau (compresseur-humidificateur intégrés)



Avantages

Efficacité de la compression, compacité, contrôlabilité

Inconvénients

Lois de contrôle à mettre en œuvre

Synthèse de la gestion de l'air

Constats

- 1 Le système pile est complexe : la modélisation du système de gestion de l'air doit nécessairement prendre en compte le modèle de la pile à combustible

B. Blunier, A. Miraoui. Modelling of Fuel Cells using Multi-Domain VHDL-AMS Language, *Journal of Power Sources*, 177 (2) pp 434–450, 2007

- 2 La modélisation du compresseur doit être assez fine afin de pouvoir déterminer :
 - la consommation énergétique (efficacité)
 - les relations entre le débit, la vitesse de rotation et la pression
 - les ondulations de pression

1. B. Blunier, G. Cirrincione, and A. Miraoui. Novel Geometrical Model of Scroll Compressors for the Analytical Description of the Chamber Volumes. In *18th International Compressor Engineering Conference at Purdue*, number C074, 17-20 July 2006.

2. B. Blunier, G. Cirrincione, Y. Hervé et A. Miraoui. A New analytical and Dynamical Model of a Scroll Compressor With Experimental Validation, *International Journal of refrigeration*, 2007 (Article soumis)

Synthèse et choix

Pression de fonctionnement

1,5 – 2,5 bar

Choix du compresseur

Centrifuge, **scroll** ou lobes

Topologie du système de compression

Compresseur seul ou compresseur/expandeur

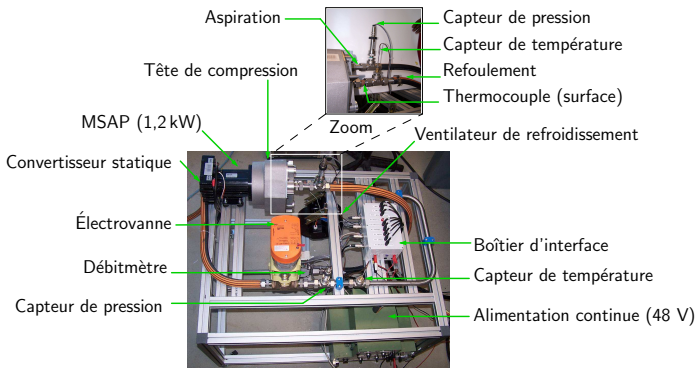
Système d'humidification

Échangeur de chaleur et de masse ou **compresseur-humidificateur intégrés**

Plan

- 1 État de l'art et objectifs des systèmes pile à combustible
 - Présentation du système PàC
 - Verrous technologiques du système PàC
 - Objectifs et travaux
- 2 Système d'alimentation en air
 - Rôle et objectifs
 - Choix du compresseur
 - Topologies des systèmes de compression et d'humidification
 - Synthèse sur la gestion de l'air
- 3 **Simulation et validation expérimentale**
 - Banc de tests
 - Résultats expérimentaux et simulés
 - Prédiction de la puissance de la pile
- 4 Conclusion et perspectives

Présentation du banc de tests



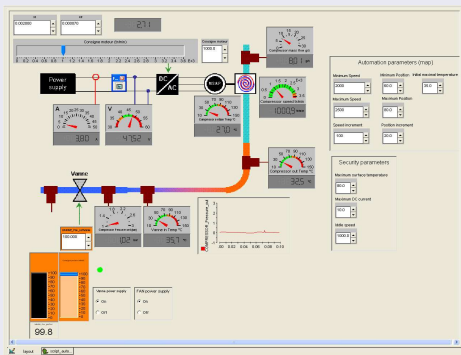
Caractéristiques du banc de tests

- Modulaire : permet de tester plusieurs types de compresseurs
- Automatisé : tests reproductibles

Présentation de l'interface utilisateur et automatisation

Interface utilisateur

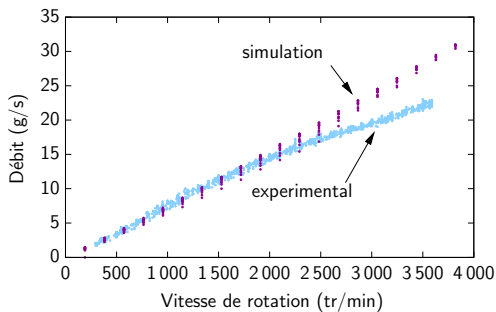
- Tests manuels
- Paramétrisation des tests
- Paramètres de sécurité



Script d'automatisation

- Écrit en Python
- Détecte les limites du compresseur
- Création d'un fichier de données exploitables directement
- Création d'un fichier journal des évènements

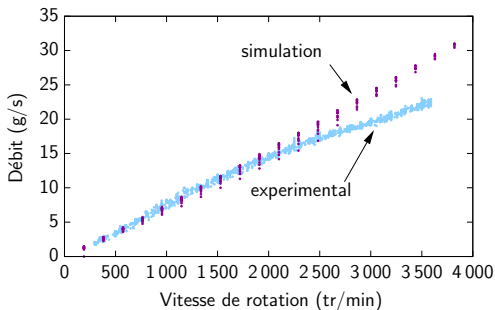
Résultats simulés et validés : débit-vitesse (scroll)



Conséquences

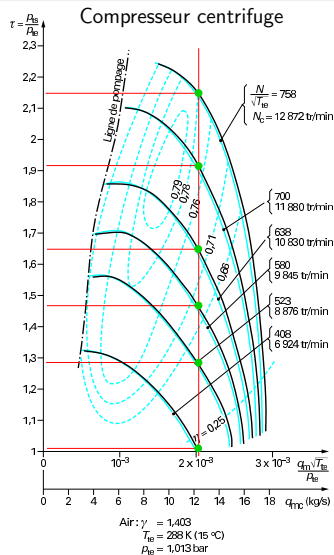
- Dépendance débit-vitesse bijective
- Contrôle sans capteurs possible
- Contrôle simplifié : découplage de la régulation de pression et de débit

Résultats simulés et validés : débit-vitesse (scroll)



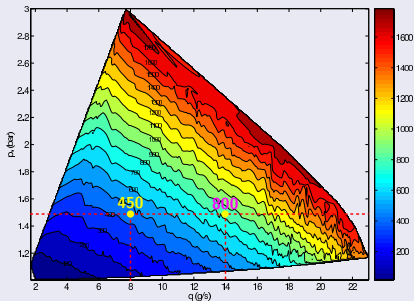
Conséquences

- Dépendance débit-vitesse bijective
- Contrôle sans capteurs possible
- Contrôle simplifié : découplage de la régulation de pression et de débit

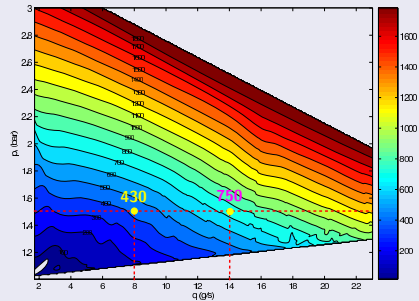


Résultats simulés et validés : iso-puissances

Expérimental



Simulation

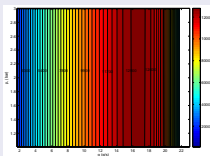


Résultats

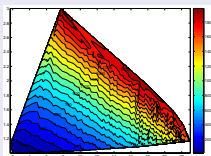
- Bonne prédiction de la puissance du compresseur
- Hypothèse adiabatique \Rightarrow erreurs

Exploitation des résultats : méthode de prédiction de la puissance nette de la pile à combustible

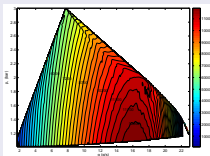
Puissance brute P_{brute}
(simulée ou expérimentale)



Puissance compresseur P_{comp}
(simulée ou expérimentale)



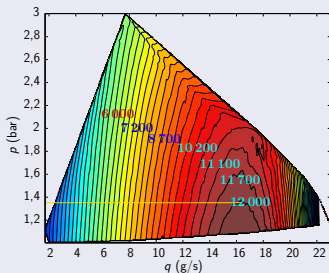
Puissance nette P_{nette}



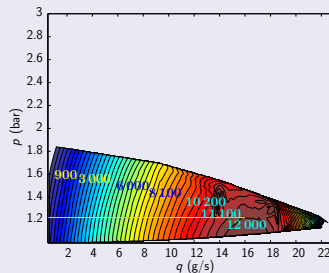
$$P_{nette} = P_{brute} - P_{comp} - P_{aux}$$

Exploitation des résultats : exemple 1

Scroll (compression interne)



Confidentiel (sans compression interne)

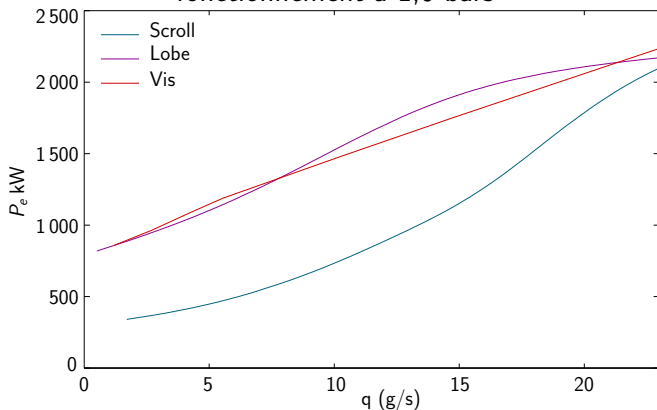


Conclusion

- Compression interne : plus haute pression pour la même puissance nette (meilleur rendement de compression)
- Humidification facilitée

Exploitation des résultats : exemple 2

Comparaison des puissances de trois compresseurs pour un fonctionnement à 1,6 bars



Plan

- 1 État de l'art et objectifs des systèmes pile à combustible
 - Présentation du système PàC
 - Verrous technologiques du système PàC
 - Objectifs et travaux
- 2 Système d'alimentation en air
 - Rôle et objectifs
 - Choix du compresseur
 - Topologies des systèmes de compression et d'humidification
 - Synthèse sur la gestion de l'air
- 3 Simulation et validation expérimentale
 - Banc de tests
 - Résultats expérimentaux et simulés
 - Prédiction de la puissance de la pile
- 4 Conclusion et perspectives

Conclusion

État de l'art de la gestion de l'air des PàCs

- Gestion de l'air des systèmes pile à combustible
- Comparaison des compresseurs et choix privilégiés

PERSPECTIVES : approche systémique

Pour en savoir plus (1/2)



Benjamin Blunier and Abdellatif Miraoui.

Piles à combustible, Principe, modélisation et applications avec exercices et problèmes corrigés.

Ellipses, Technosup. 2007.



Benjamin Blunier and Abdellatif Miraoui.

Air management in pem fuel cell : State-of-the-art and prospectives.

In *ACEMP'07, Electromotion*, pages 245–253. IEEE-PES-MSC, sep 2007.

Invited paper.



Benjamin Blunier and Abdellatif Miraoui.

Modelling of fuel cells using multi-domain VHDL-AMS language.

Journal of Power Sources, 177(2) :434–450, 2007.



Benjamin Blunier

Modélisation de moto-compresseurs en vue de la gestion de l'air dans les systèmes pile à combustible — simulation et validation expérimentale.

Thèse de Doctorat, Université de Technologie de Belfort-Montbéliard, 7 décembre 2008.

Pour en savoir plus (2/2)



Benjamin Blunier, Giansalvo Cirrincione, and Abdellatif Miraoui.

Novel geometrical model of scroll compressor for the analytical description of the chamber volumes.

In Proceedings of International Compressor Engineering Conference at Purdue, number CO74, 2006.



Benjamin Blunier, Marcello Pucci, Giansalvo Cirrincione, Maurizio Cirrincione, and Abdellatif Miraoui.

A scroll compressor with a high performance sensorless induction motor drive for the air management of a pemfc system for automotive applications.

IEEE Transaction on Vehicular Technology, 2007.

In print.



Benjamin Blunier, Marcello Pucci, Giansalvo Cirrincione, and Abdellatif Miraoui.

A scroll compressor with a high performance induction motor drive for the air management of a pemfc system for automotive applications.

IEEE Transactions on Industry Applications., 2008.

In print.

Gestion de l'air dans les piles à combustible de type PEM

— État de l'art et perspectives —

Benjamin Blunier, Abdellatif Miraoui
benjamin.blunier@utbm.fr



2–3 avril 2008

Journées thématiques Société Française de Thermique (CEA, Grenoble)
Piles à combustible à membrane PEMFC, modélisation et retour d'expérience