

Les technologies de piles à combustible

Axes de recherche pour l'amélioration des systèmes PACs

Daniel HISSEL

Professeur des Universités - Université de Franche- Comté

Directeur – Fédération FCLAB / Belfort

(daniel.hissel@univ-fcomte.fr)

Verrous technologiques et scientifiques

Axes de recherche au niveau système PAC

Focus sur le diagnostic de PAC

La Fédération de Recherche CNRS FCLAB

- Environ 80 chercheurs, dont 40 doctorants
- Un sujet : « le Système Pile à Combustible » :
 - Son intégration dans des applications transport et stationnaires
 - Des capacités de tests importantes (PEMFC et SOFC)
 - Prise en compte des enjeux scientifiques, technologiques et sociétaux
- Une « force de frappe » unique au niveau Européen
- 5 partenaires nationaux ou régionaux:
 - Niveau national : CNRS, IFSTTAR
 - Niveau régional : Université de Franche-Comté, UTBM, ENSMM
- 4 laboratoires impliqués
 - Institut FEMTO-ST, UMR CNRS 6174
 - Institut IRTES, EA UTBM
 - Laboratoires LTN (siège à Satory) et LTE (siège à Bron) de l'IFSTTAR

Le « Système Pile à Combustible »

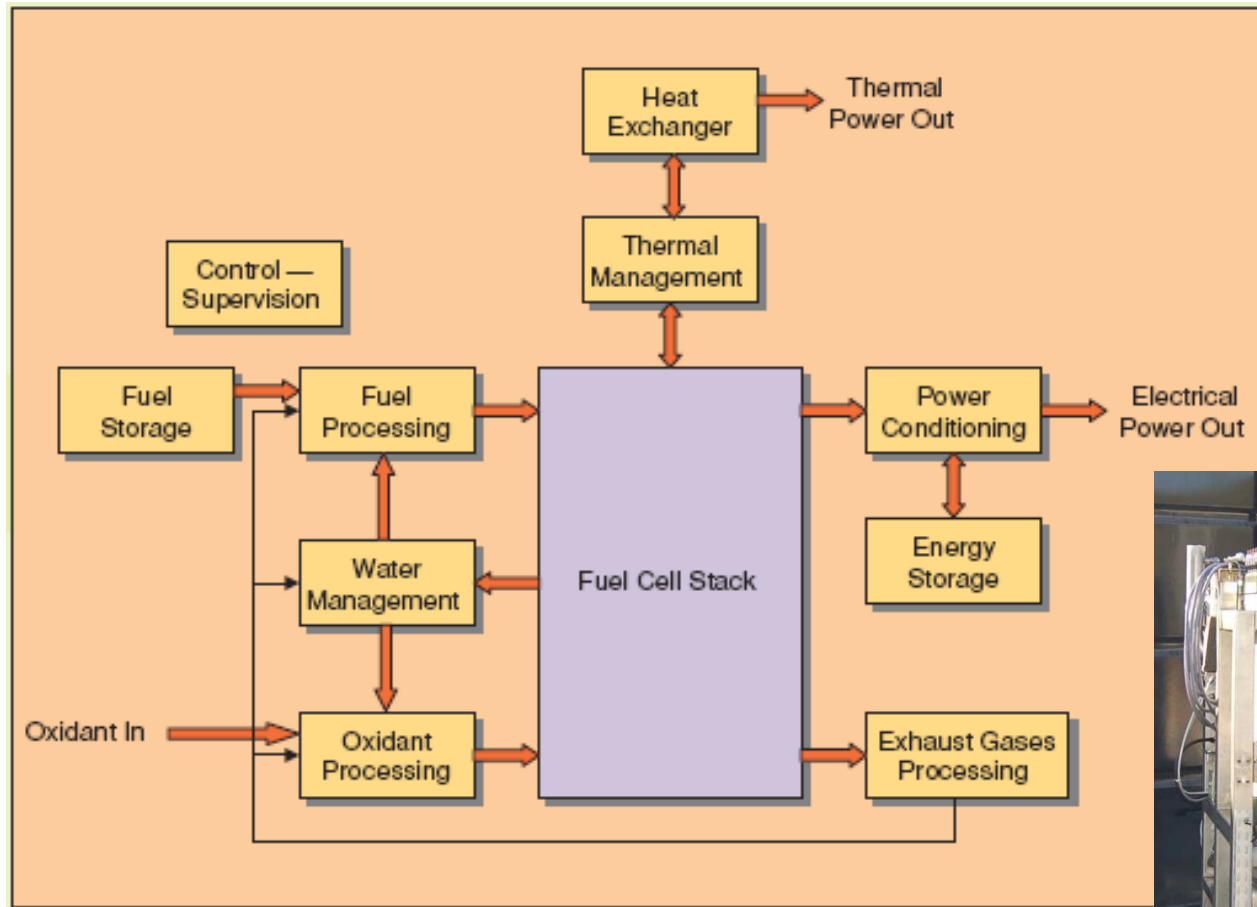


Photo : Areva - Helion Fuel Cells

Capacités expérimentales (échelle-1)



Bancs d'essais mobiles

Charges électriques
(machines, batteries,
supercondensateurs...)



Bancs d'essais
1kW, 10kW, 25kW, ...



Pot vibrant &
Chambre climatique
200kg – 2.3 m3

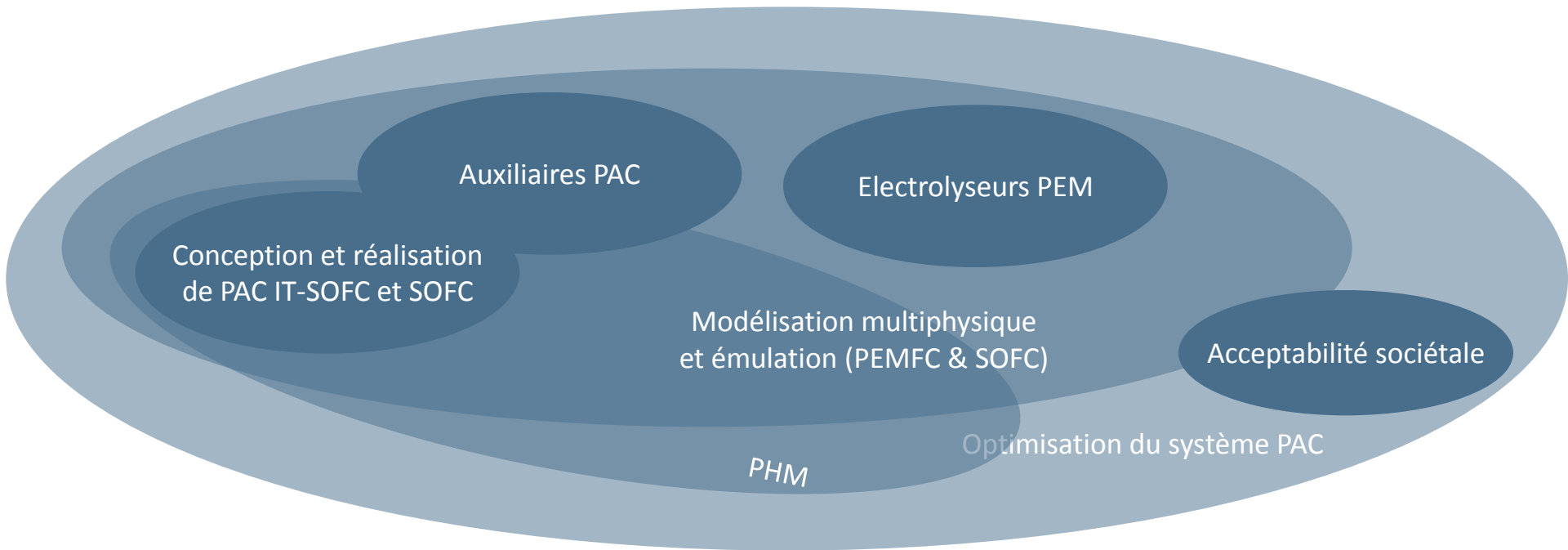


PEMFC
SOFC
Stacks & systèmes
Auxiliaires ad-hoc



7 axes de recherches et d'innovations

- Thématiques complémentaires, du cœur de pile au système dans son environnement
- Domaines applicatifs : transport et énergie



Plan

- Quelques ordres de grandeur...
- Verrous scientifiques et techniques
- Axes de recherche scientifique et technologique pour l'amélioration des systèmes PAC
- Focus sur le diagnostic
- Conclusion

Système Pile à Combustible - PEMFC

Quelques idées de valeurs numériques...

- Rendement maximal (élec.) d'un stack PEMFC $\approx 55\%$
- Classiquement, dans les systèmes PAC, jusqu'à 1/3 de l'énergie électrique peut être consommée par les auxiliaires (compresseur d'air, humidification, refroidissement, convertisseurs statiques,)
- Volume du stack $\approx 30\%$ du volume du système (70% est lié aux auxiliaires)
- Prix du stack $\approx$ prix des auxiliaires
- Mythe du prix du platine pour les PEMFC... (aujourd'hui seulement environ 5% du prix du groupe électrogène complet)
- Courant
 - Densité de courant (A/cm^2)
 - Liée directement aux performances des matériaux (membrane, électrodes, GDL, ...)
 - Typiquement entre 0.5 et 1 A/cm^2 (PEMFC)
 - Surface active
 - Pour un type de cellule donné, augmenter le courant max. revient à augmenter la surface
- Tension
 - Par cellule :
 - Limitation thermodynamique : 1.18V à pression atmosphérique et à 80°C
 - OCV par cellule – typiquement 0.9V
 - Tension nominale par cellule : 700mV
 - Tension minimale par cellule : environ 400mV
 - Liée au nombre de cellules unitaires en série
- Puissance et énergie spécifiques
 - 1kW/l à 1.35 kW/l (stack seul) / Ballard System FCvelocity
 - Densité d'énergie liée au stockage H₂



www.h2fc-fair.com

Système Pile à Combustible - SOFC

Quelques idées de valeurs numériques...

- Rendement maximal (élec.) d'un stack SOFC $\approx 45\%$, $\approx 400 \text{ mW/cm}^2$
- Possibilité de valorisation de la chaleur produite (haute température $\approx 800^\circ\text{C}$)
- Management des gaz : auxiliaire crucial
- Pas de métal noble comme catalyseur, mais matériaux d'électrodes chers
- Courant
 - Densité de courant (A/cm^2)
 - Liée directement aux performances des matériaux (électrolyte, qualité des électrodes, ASR (résistance surfacique spécifique), ...)
 - Typiquement entre 0.5 et 1 A/cm^2 (dynamiques lentes)
 - Surface active
 - Pour un type de cellule donné, augmenter le courant max. revient à augmenter la surface
- Tension
 - Par cellule :
 - Limitation thermodynamique : 0.965V à pression atmosphérique et à 800°C
 - OCV par cellule – typiquement environ 0.95V
 - Tension nominale par cellule : environ 750mV
 - Tension minimale par cellule : environ 400mV
 - Tension associée au nombre de cellules unitaires en série
- Puissance et énergie spécifiques
 - 1.35kW/l (stack seul) / SOFCPower
 - Densité d'énergie liée au stockage de combustible et au process



<http://www.sofcpower.com>

Plan

- Quelques ordres de grandeur...
- **Verrous scientifiques et techniques**
- Axes de recherche scientifique et technologique pour l'amélioration des systèmes PAC
- Focus sur le diagnostic
- Conclusion

Verrous scientifiques et techniques- PEMFC

- **Optimisation « système » du système PAC**
 - Faire progresser le rendement électrique du système de 30% à environ 40-45%
- **Durabilité des stacks et systèmes PAC**
 - La faire progresser d'environ 2000h à 5000h (objectif en conditions transport), et jusqu'à 100000h (objectif pour des applications stationnaires)
- *Acceptabilité sociétale*
- *Production, stockage, distribution H_2*
- *Coût → associé au déploiement industriel à grande échelle*

Plan

- Quelques ordres de grandeur...
- Verrous scientifiques et techniques
- Axes de recherche scientifique et technologique pour l'amélioration des systèmes PAC
- Focus sur le diagnostic
- Conclusion

Etape 1 :

Modélisation multiphysique et multiéchelles (PEMFC et SOFC)

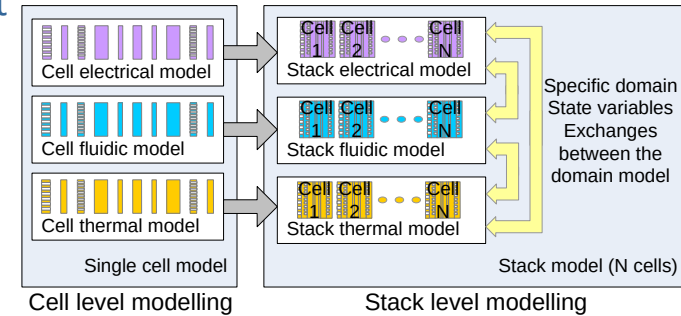
Objectifs:

- comprendre et interpréter la physique et le comportement des cœurs de piles et des systèmes
- retour vers la conception et/ou le contrôle et/ou le diagnostic

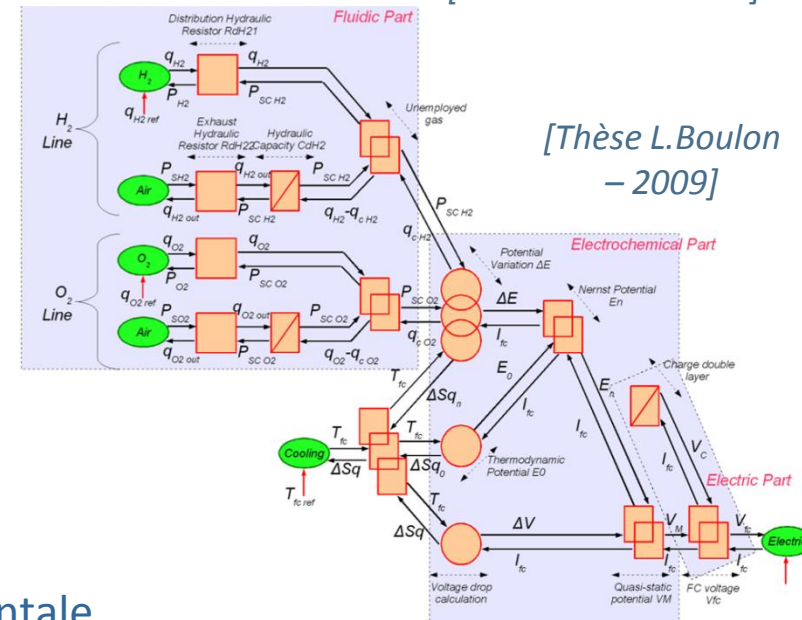
Méthode :

- Modèles boîtes noires, équivalents circuits, modèles analytiques
- Modélisation multiphysique (thermique, électrique, électrochimique, fluidique)
- Modélisation multiéchelles – du μm au m
- Modélisation multiéchelles – de temps
 - Electrochimie $\approx$ instantané
 - Convertisseur statique $\approx 10^{-4}\text{s}$
 - Hydratation de la membrane - PEMFC $\approx 10^0\text{s}$
 - Température $\approx 10^2\text{s}$
 - Durabilité $\approx 10^5\text{s}$
- Intégration du vieillissement au sein des modèles

Emulation de systèmes PAC / Validation expérimentale



[Thèse F.Gao – 2010]

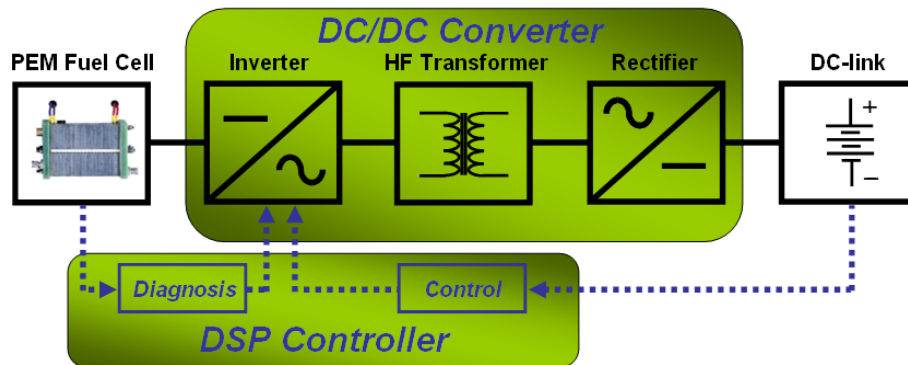


[Thèse L.Boulon – 2009]

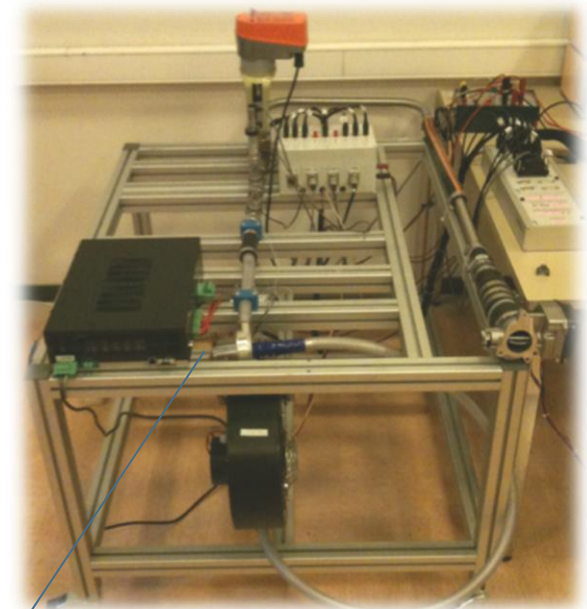
Etape 2 :

Auxiliaires spécifiques, fiables et performants

- Objectifs : imaginer et concevoir des auxiliaires de PAC, dédiés, légers, compacts, performants et fiables
 - Compresseur d'air
 - Humidificateur
 - Compresseurs / humidificateurs intégrés
 - Systèmes de refroidissement
 - Convertisseurs DC/DC à fort rapport d'élévation en tension
- Méthodes
 - Modélisation ad-hoc et simulations
 - Optimisation « système » - hardware / software, par auxiliaire
 - Développement de bancs d'essais et évaluation



Convertisseur DC/AC/DC intégrant la fonctionnalité diagnostic [Thèse A.Narjiss – 2008]



Banc d'essais modulaire pour compresseurs d'air [Thèse B.Blunier – 2007]

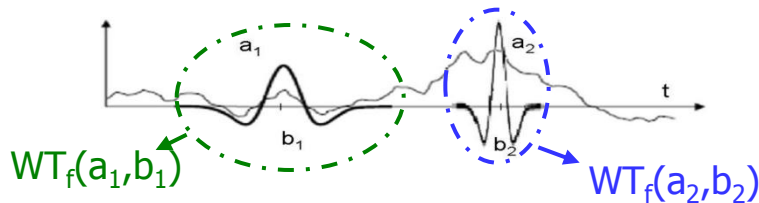


Le plus petit compresseur d'air pour PAC au monde

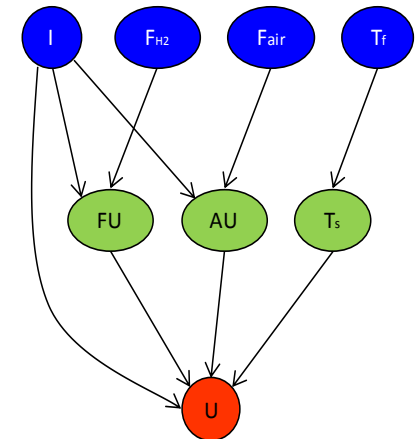
Etape 3 :

PHM (Pronostic & Health Management) de PAC et systèmes PAC

- Objectifs : augmenter la durabilité et la fiabilité des systèmes PAC
- Méthode:
 - Utiliser le moins de capteurs possibles, non intrusifs, pour diagnostic / pronostic temps réel
 - Estimation temps réel du SOH (State-of-Health)
 - Hardware = utiliser le convertisseur statique pour réaliser la spectrométrie d'impédance
 - Software =
 - Approches basées connaissance (logique floue, réseaux de neurones, réseaux bayésiens, ...)
 - Approches basées signal (approches temps-échelle, approches statistiques, ...)
 - Approches basées modèle (modèles analytiques, boîtes noires, boîtes grises, ...)
 - Contrôle tolérant aux fautes
 - Pronostic :
 - Estimation du RUL (Remaining Useful Lifetime)
 - Approches neuro-floues
 - Approches mixtes analytiques / bayésiennes



Décomposition en ondelettes pour le diagnostic d'une PAC
[Thèse N.Yousfi-Steiner – 2009]

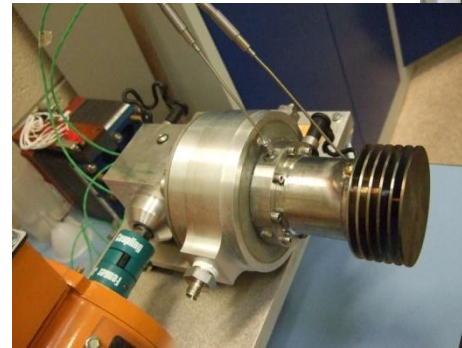


Réseau Bayésien pour l'estimation
de la tension d'une SOFC [Thèse K.Wang – 2012]

Etape 4 :

Optimisation « système » du système PAC

- Objectifs:
 - Conception optimale de systèmes PAC hybridés
 - Applications transport ou stationnaires
 - Valorisation de l'énergie thermique / micro-cogénération
 - Commande avancée de systèmes PAC
- Méthode:
 - Travail en relation étroite avec l'industrie
 - Développement d'architectures innovantes
 - Contrôle multiphysique (électricité, température, humidité, pressions, débits gaz, ...)
 - Contrôle local des auxiliaires (compresseur d'air, humidificateurs, ...)
 - Gestion d'énergie en ligne (intelligence artificielle, méthodes temps-échelle ...)
 - Critères : consommation énergétique, durée de vie, émissions polluantes, ...

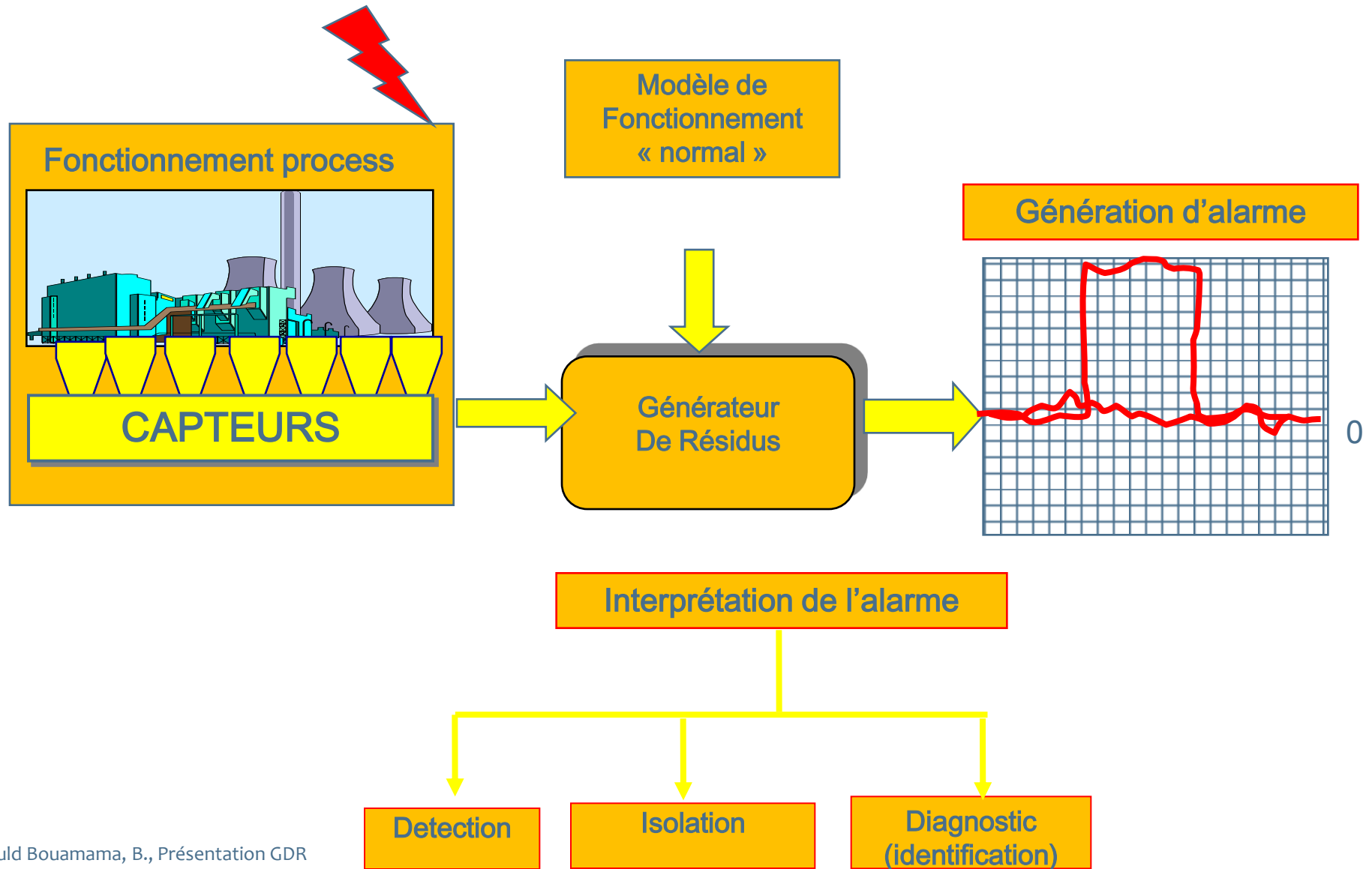


*Couplage
SOFC / Moteur Stirling
pour la micro-cogénération
[Thèse C.Gay – 2012]*

Plan

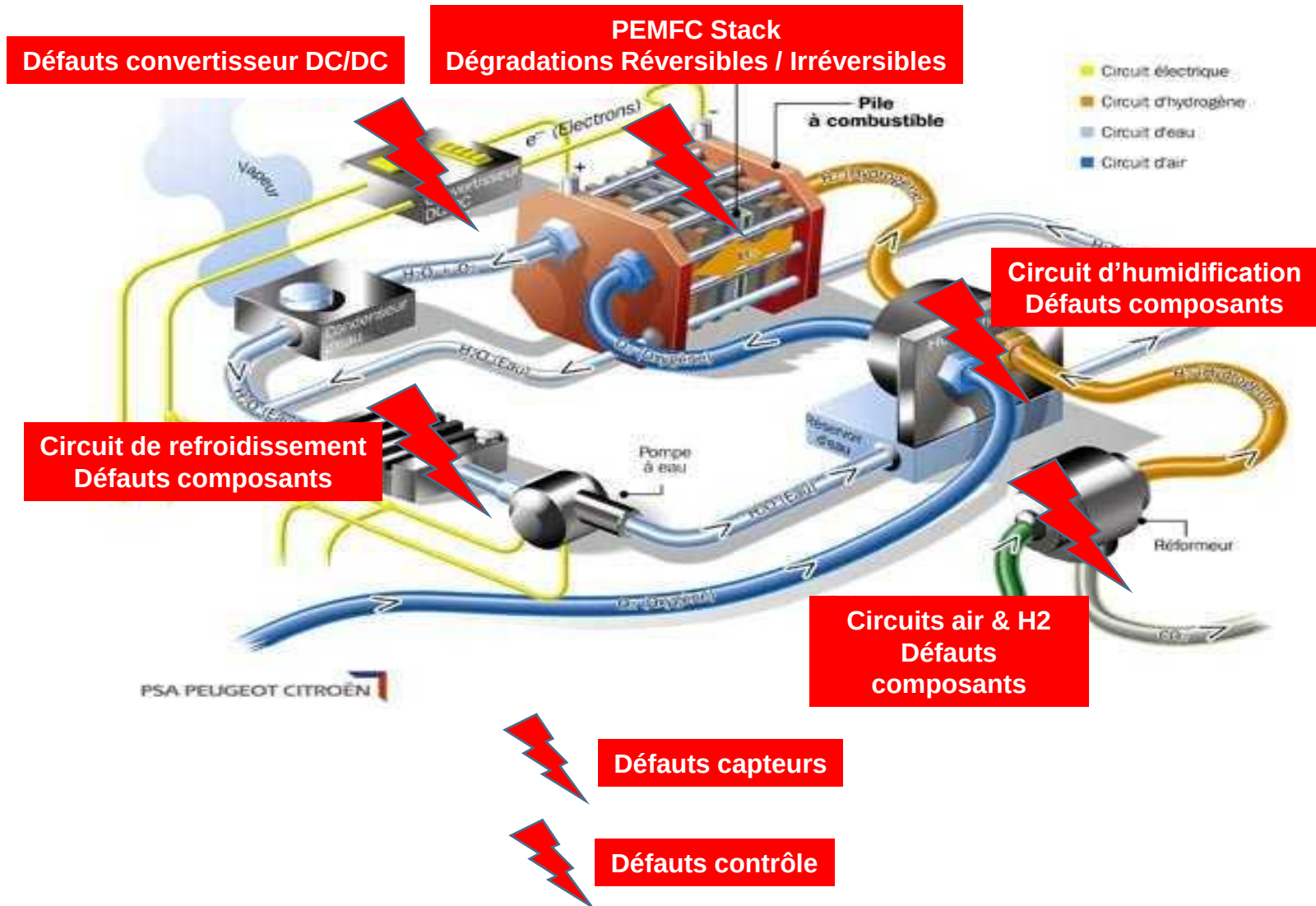
- Quelques ordres de grandeur...
- Verrous scientifiques et techniques
- Axes de recherche scientifique et technologique pour l'amélioration des systèmes PAC
- **Focus sur le diagnostic**
- Conclusion

Diagnostic – basé modèle



Ould Bouamama, B., Présentation GDR PACTE, axe Systèmes, 2009.

Diagnostic – défauts possibles sur un système PAC embarqué



Diagnostic – quels capteurs utiliser ?

Objectif : utiliser un nombre minimal de capteurs physiques / matériels

Mesures techniquement et économiquement faisables	Mesures techniquement ou économiquement délicates	Mesures techniquement et/ou économiquement non envisageables
• Tension stack • Courant stack • Température circuit refroidissement • Températures H2/air (entrées / sorties) • Vitesse du compresseur d'air	• Tensions cellules • Pressions air / H2 (entrées / sorties) • Températures internes stack	• Débits dans les canaux de distribution • Densités de courant locales • Hygrométrie air / H2 • Teneur en eau de la membrane électrolytique • Spectre d'impédance en utilisant un spectromètre dédié • Compositions gaz entrées • Compositions gaz sorties

Diagnostic – Exemple expérimental PEMFC

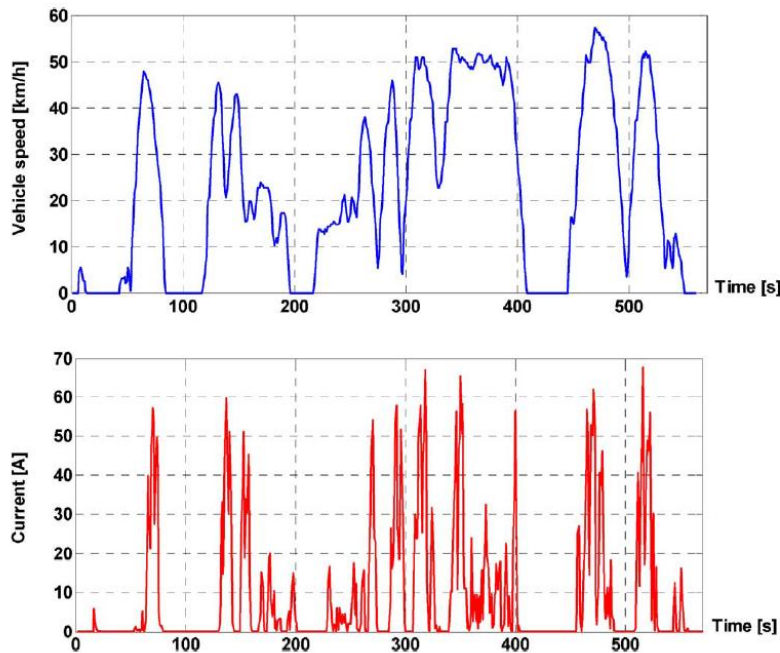
2 conditions de charge (durée du test = 1000h)



Stack 1 : courant constant 50 A



Stack 2 : Profil dynamique de courant (issues de données véhicule réelles)



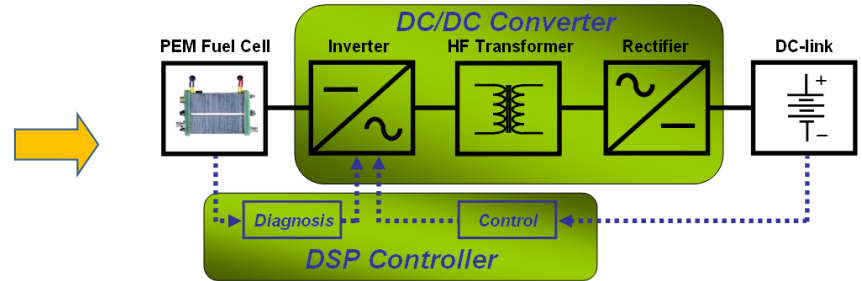
TECHNICAL SPECIFICATIONS OF THE CONSIDERED PEFC STACKS

Number of cells	3
Nominal current	50A
Maximal power	100W
Cell area	100cm ²
Operating temperature	20°C to 65°C
Nominal operating temperature	55°C
Nominal air dew point	45°C
Operating pressure	Max 1.5 bar (abs)
Maximal differential pressure (anode/cathode)	0.6 bar
Media inlet	
Anode	Pure, dry hydrogen
Cathode	Humidified air
Coolant circuit	De-ionized water



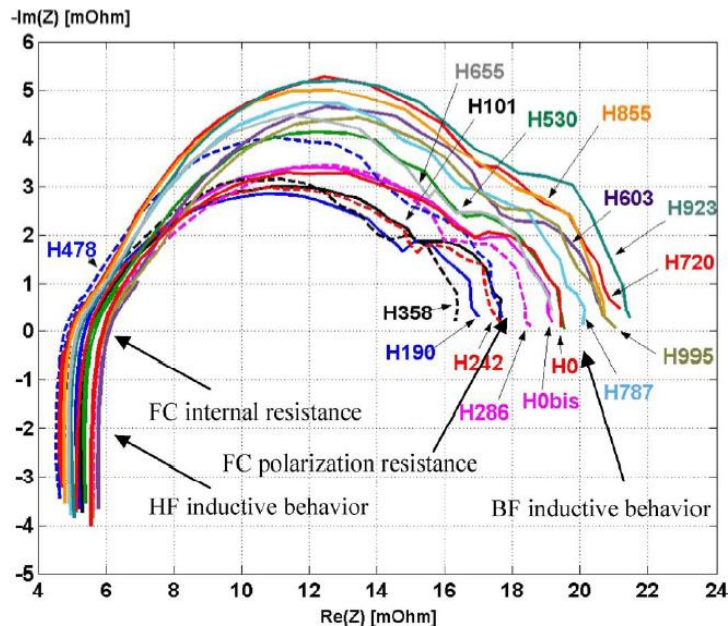
Diagnostic – Exemple expérimental PEMFC

Mesures de spectres d'impédance
(temps réel, sans spectromètre)

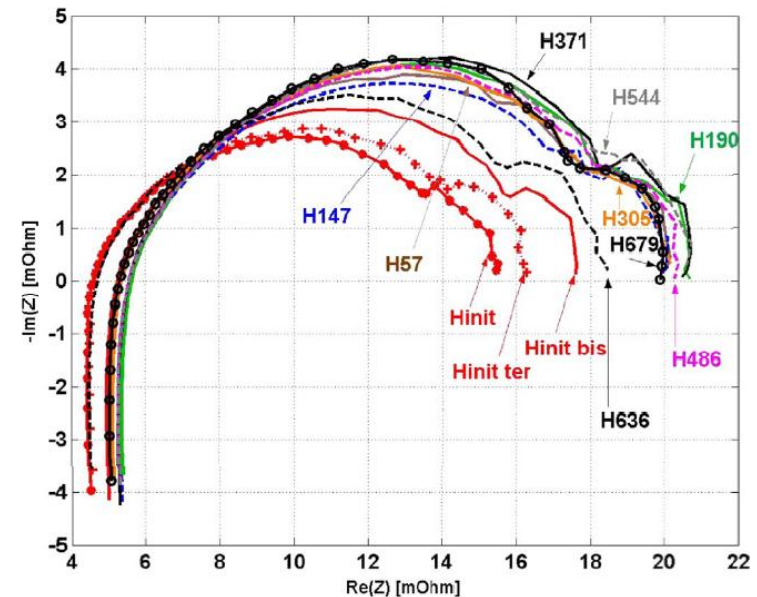


2 conditions de charge (1000h)

Stack 1 : courant constant



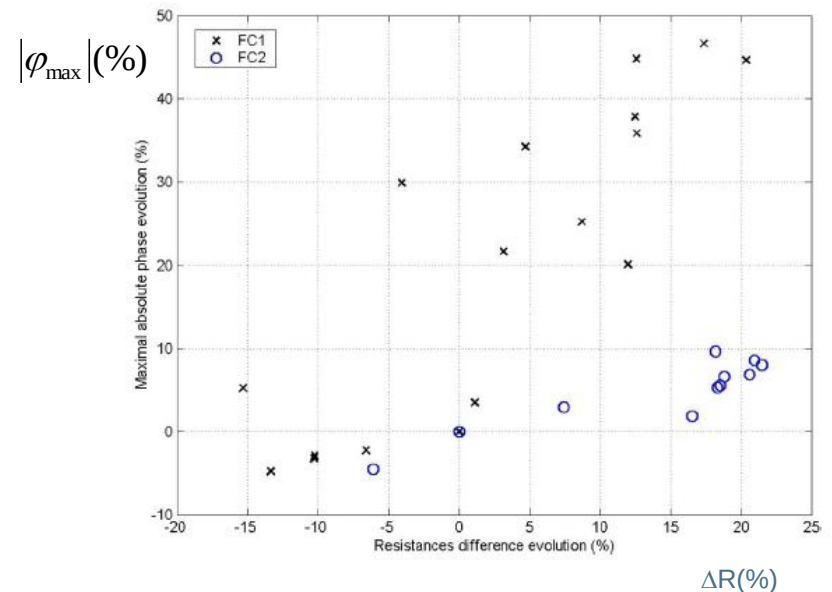
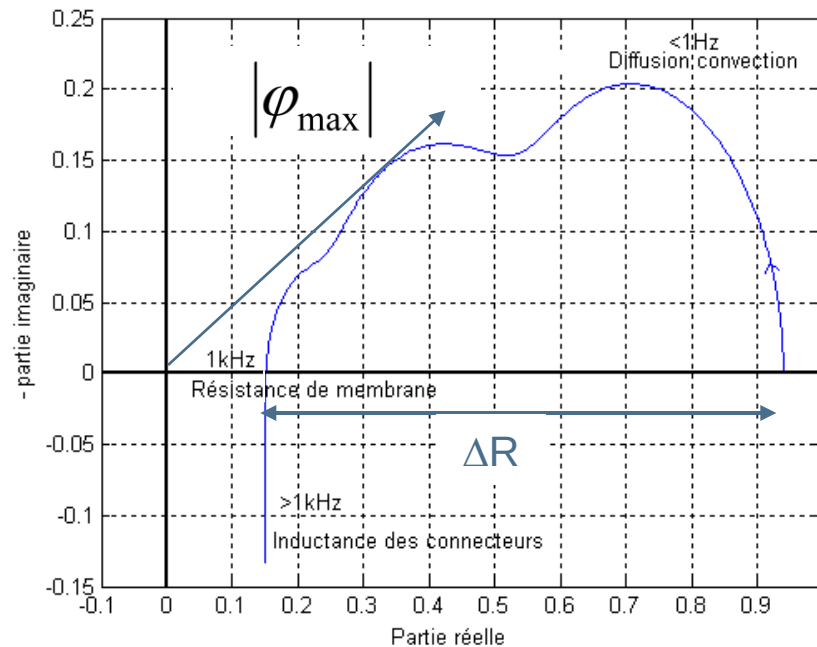
Stack 2 : profil dynamique de courant



Diagnostic – Exemple expérimental PEMFC

Traitement des données par clustering flou

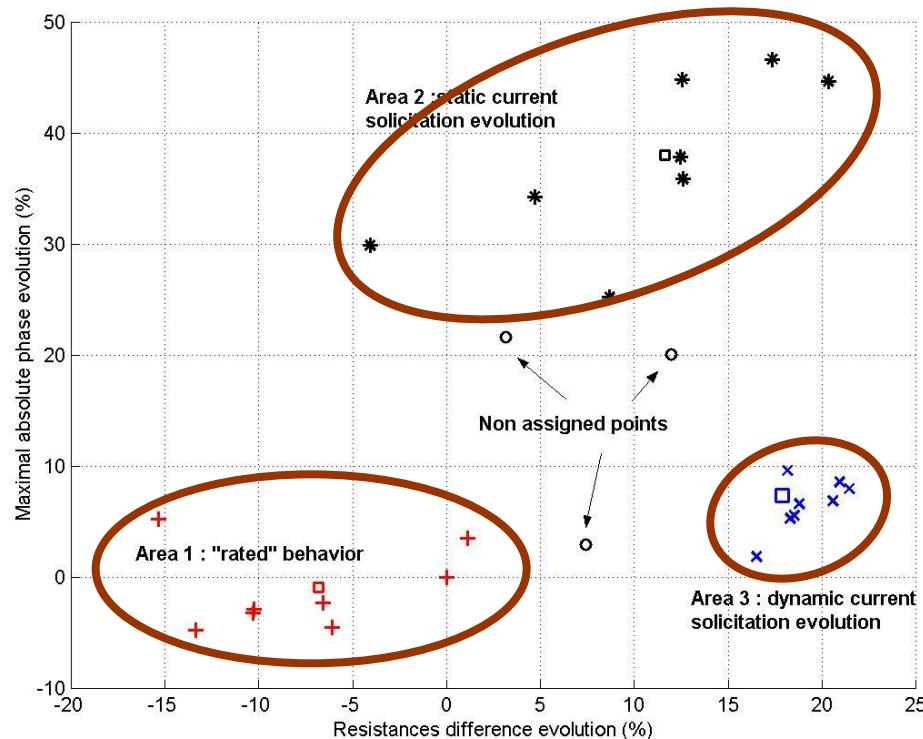
- Post traitement : recherche de 2 hyperparamètres pour chaque spectre d'impédance



Diagnostic – Exemple expérimental PEMFC

Données collectées :

1. Début de vie
2. Dégradation typique pour une charge constante
3. Dégradation typique pour une charge dynamique (profil transport)
4. Quelques points “intermédiaires” – non affectés à un cluster



[Hissel, D. et al., IEEE Trans. on Vehicular Technology, 2007]

Plan

- Quelques ordres de grandeur...
- Verrous scientifiques et techniques
- Axes de recherche scientifique et technologique pour l'amélioration des systèmes PAC
- Focus sur le diagnostic
- Conclusion

Conclusion

- Au niveau « système PEMFC », nous y sommes presque...
 - Mais des efforts restent à faire :
 - Durée de vie en condition transport
 - Intégration du vieillissement dans les modèles
 - Développement d'auxiliaires spécifiques
 - Optimisation « système » du système PAC
 - Développement d'outils de diagnostic et de pronostic temps réel
- +
- *Intégration dans le « panel » des solutions pour le stationnaire (stockage d'électricité long terme)*
 - *Production / distribution / stockage H2*
 - *Acceptabilité sociétale*

Les technologies de piles à combustible

Axes de recherche pour l'amélioration des systèmes PACs

Daniel HISSEL

Professeur des Universités - Université de Franche- Comté

Directeur – Fédération FCLAB / Belfort

(daniel.hissel@univ-fcomte.fr)

Verrous technologiques et scientifiques

Axes de recherche au niveau système PAC

Focus sur le diagnostic de PAC