

# FC LAB

FR CNRS 3539

## 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

[\(daniel.hissel@univ-fcomte.fr\)](mailto:daniel.hissel@univ-fcomte.fr)

Verrous technologiques et scientifiques

Axes de recherche au niveau système PAC

Focus sur le diagnostic de PAC

IRTES

femto-st  
sciences & technologies

LTE

LTN



ensmm



IFSTAR

UFC  
UNIVERSITÉ DE FRANCHE-COMTÉ

utbm  
université de technologie  
Belfort-Montbéliard

# 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 »

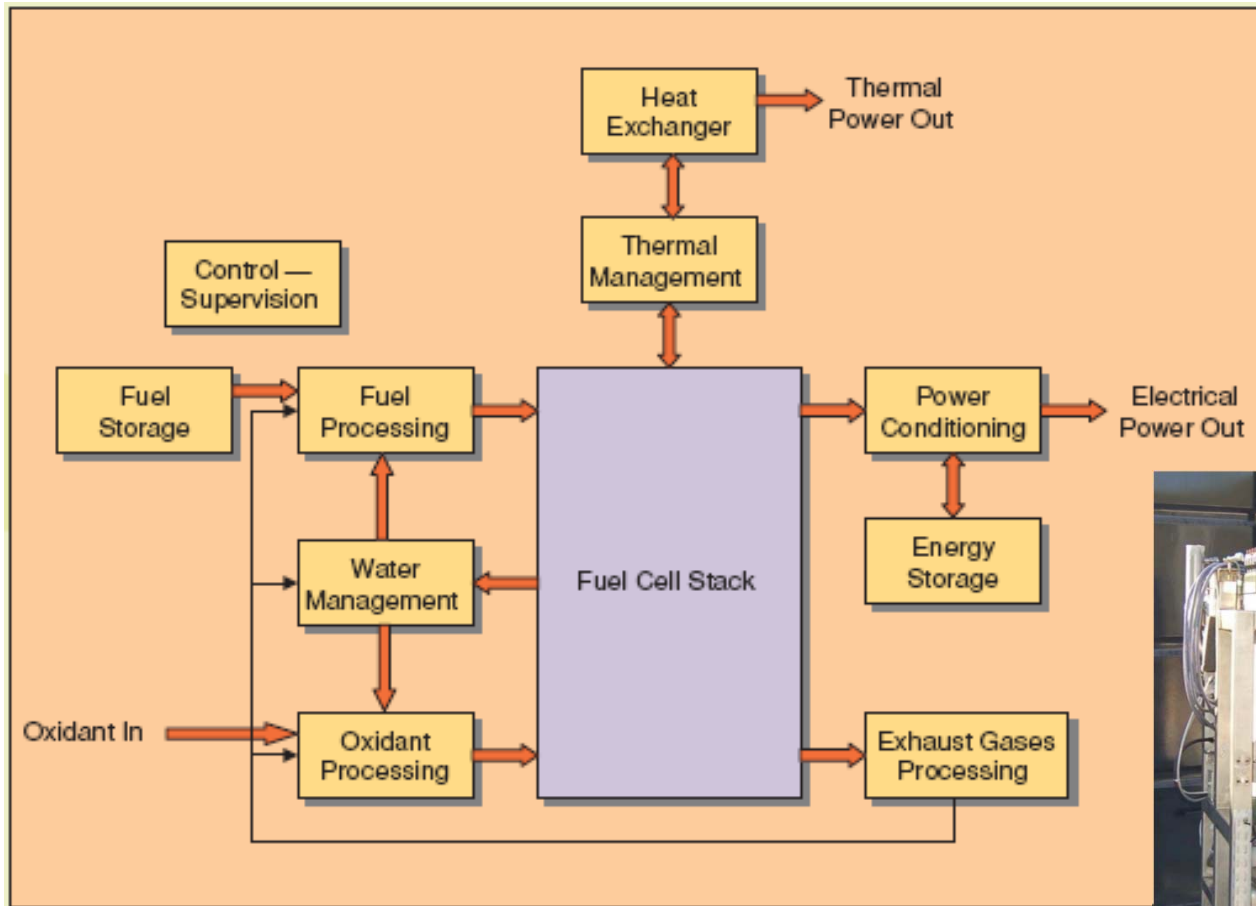


Photo : Areva - Helion Fuel Cells

# 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

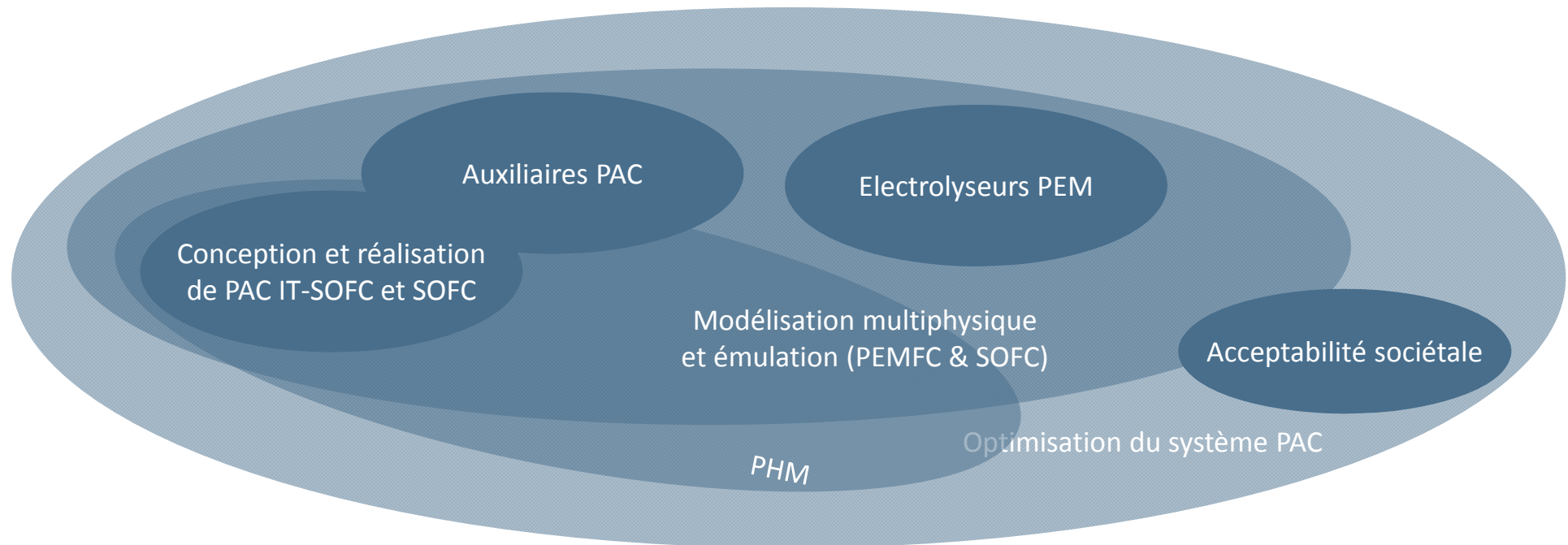


PEMFC  
SOFC  
Stacks & systèmes  
Auxiliaires ad-hoc



# 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 H<sub>2</sub>



[www.h2fc-fair.com](http://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 ( $\text{A/cm}^2$ )
    - Liée directement aux performances des matériaux (électrolyte, qualité des électrodes, ASR (résistance surfacique spécifique), ...)
    - Typiquement entre  $0.5$  et  $1 \text{ A/cm}^2$  (dynamiques lentes)
  - Surface active
    - Pour un type de cellule donné, augmenter le courant max. revient à augmenter la surface
- Tension
  - Par cellule :
    - Limitation thermodynamique :  $0.965\text{V}$  à pression atmosphérique et à  $800^\circ\text{C}$
    - OCV par cellule – typiquement environ  $0.95\text{V}$
    - Tension nominale par cellule : environ  $750\text{mV}$
    - Tension minimale par cellule : environ  $400\text{mV}$
  - Tension associée au nombre de cellules unitaires en série
- Puissance et énergie spécifiques
  - $1.35\text{kW/l}$  (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<sub>2</sub>*
- *Coût → associé au déploiement industriel à grande échelle*

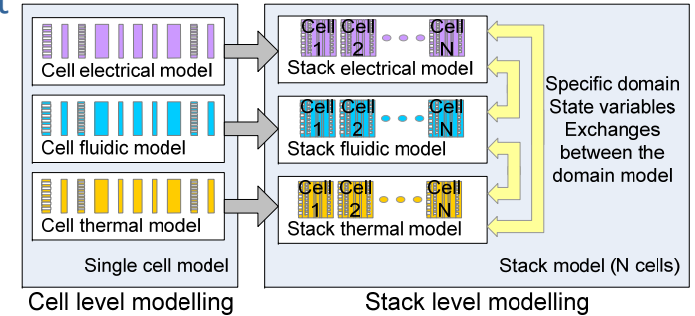
# Plan

- 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

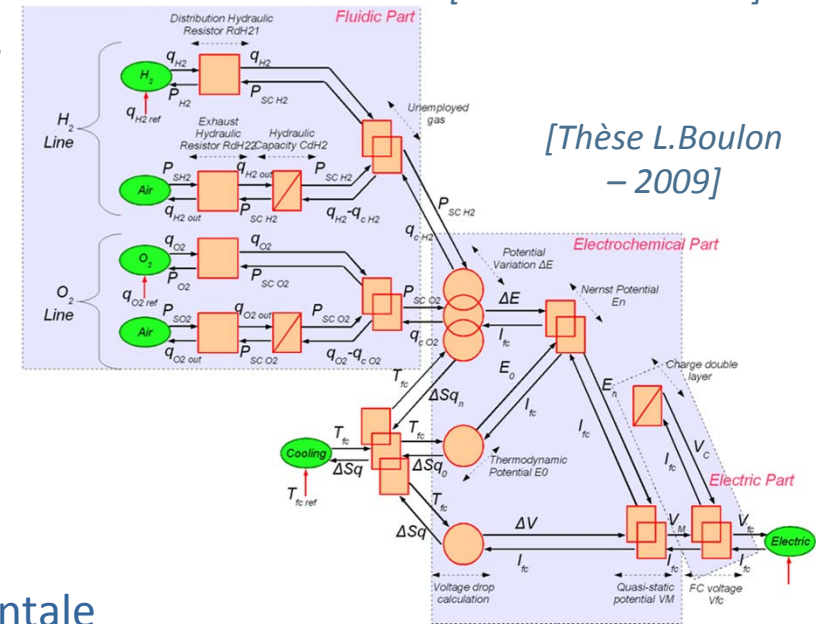
# Etape 1 :

## 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, fluide)
  - Modélisation multiéchelles – du  $\mu\text{m}$  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]

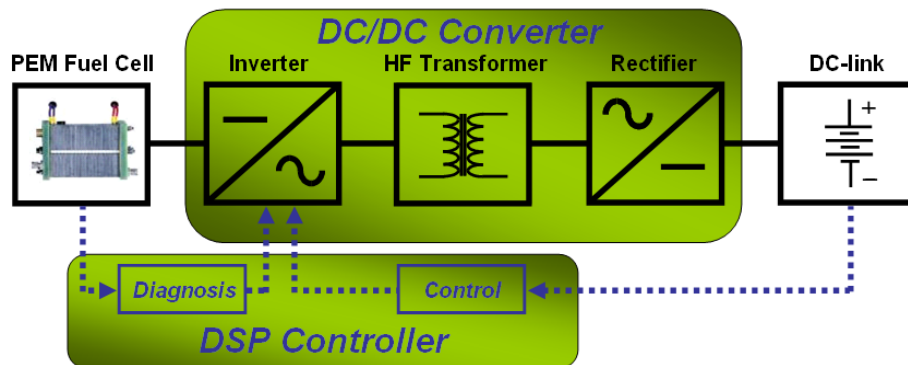


[Thèse L.Boulon – 2009]

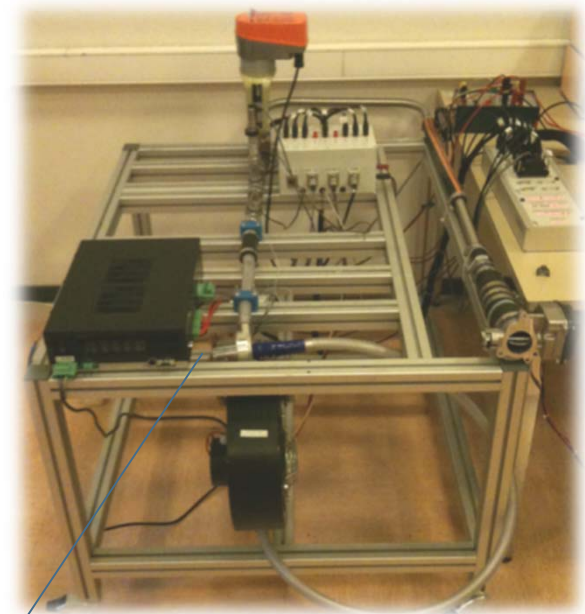
## Etape 2 :

### 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 diagnostique [Thèse A.Narjiss – 2008]



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

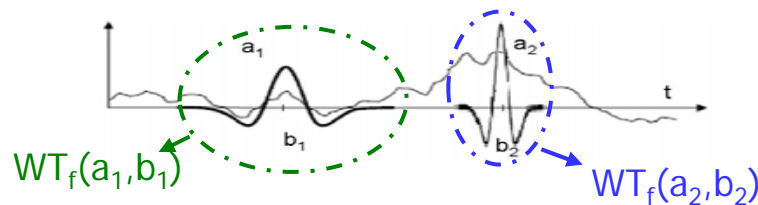


Le plus petit compresseur d'air pour PAC au monde

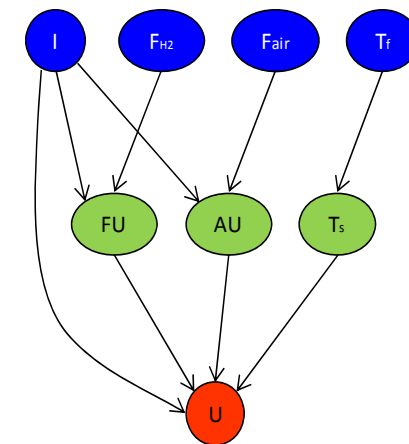
## Etape 3 :

# 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



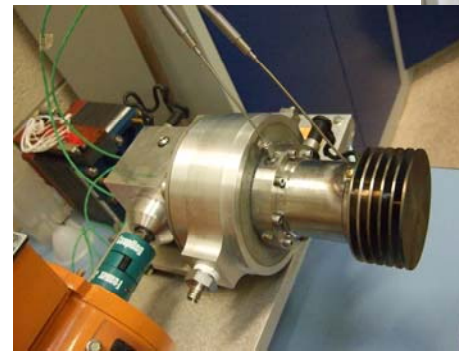
Décomposition en ondelettes pour le diagnostic d'une PAC  
[Thèse N.Yousfi-Steiner – 2009]



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 hybrides
  - 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, ...



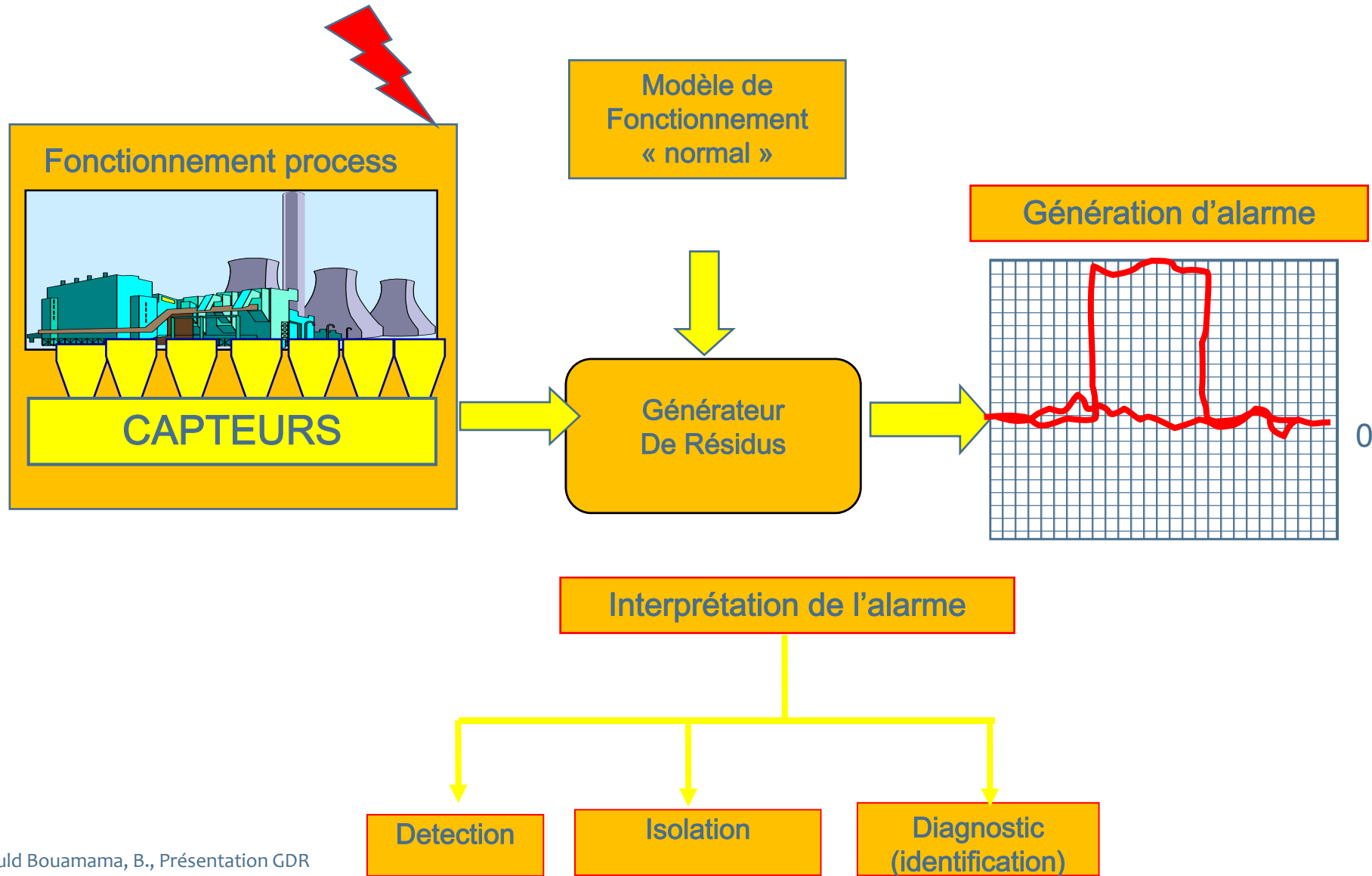
*Couplage  
SOFC / Moteur Stirling  
pour la micro-cogénération  
[Thèse C.Gay – 2012]*

# 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

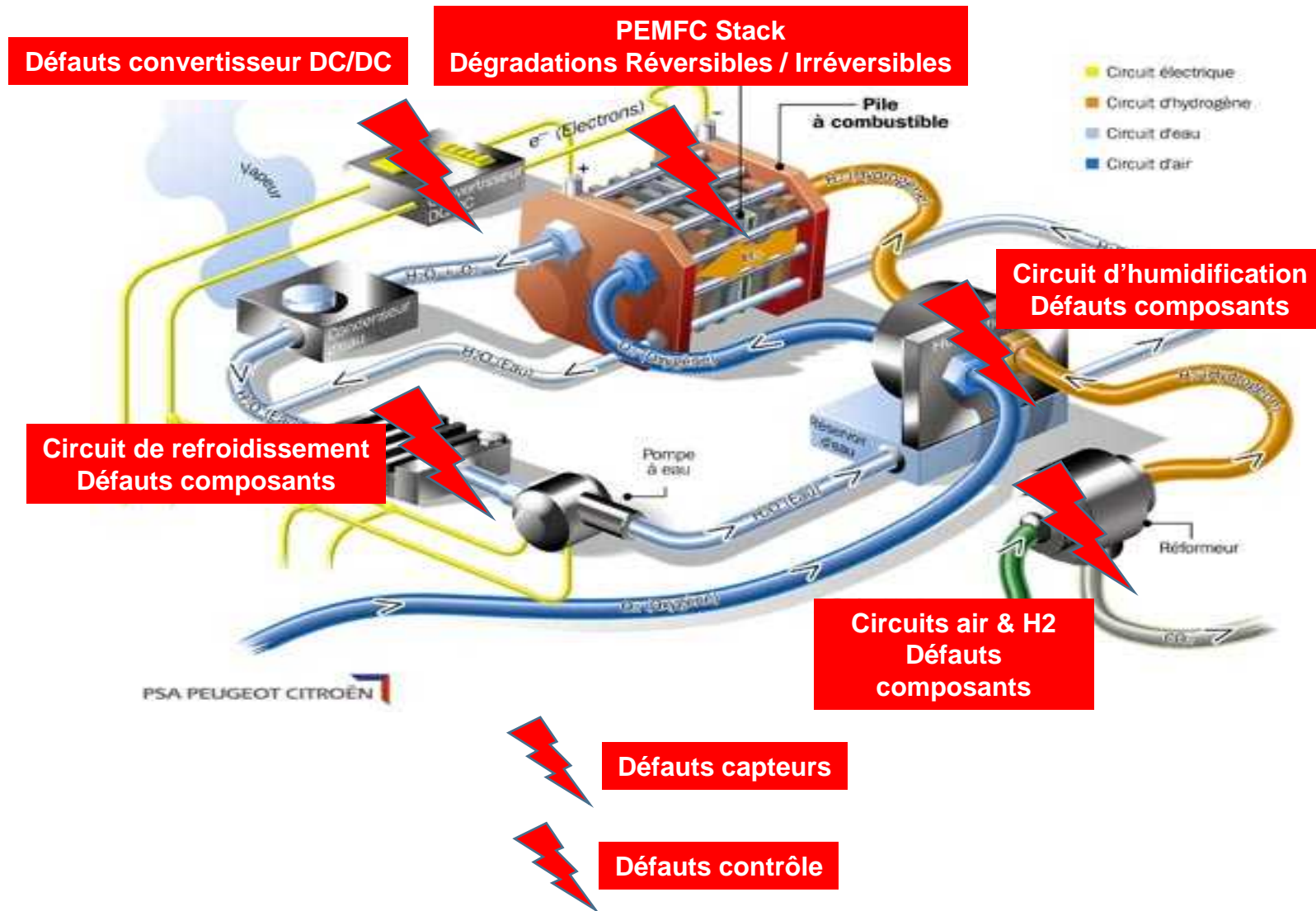


# Diagnostic – basé modèle



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   |
|--|--|--|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>• Tension stack</li> <li>• Courant stack</li> <li>• Température circuit refroidissement</li> <li>• Températures H2/air (entrées / sorties)</li> <li>• Vitesse du compresseur d'air</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Tensions cellules</li> <li>• Pressions air / H2 (entrées / sorties)</li> <li>• Températures internes stack</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Débits dans les canaux de distribution</li> <li>• Densités de courant locales</li> <li>• Hygrométrie air / H2</li> <li>• Teneur en eau de la membrane électrolytique</li> <li>• Spectre d'impédance en utilisant un spectromètre dédié</li> <li>• Compositions gaz entrées</li> <li>• Compositions gaz sorties</li> </ul> |

# Diagnostic – Exemple expérimental PEMFC

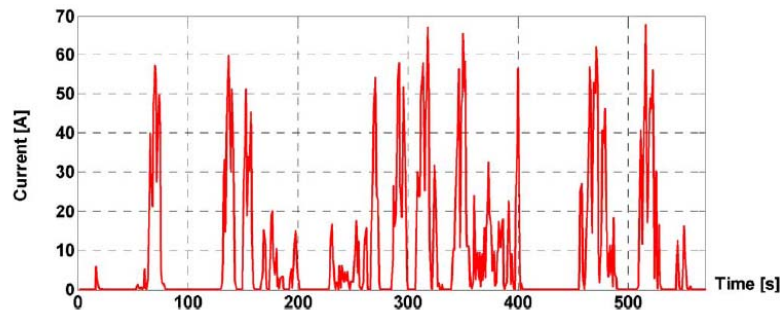
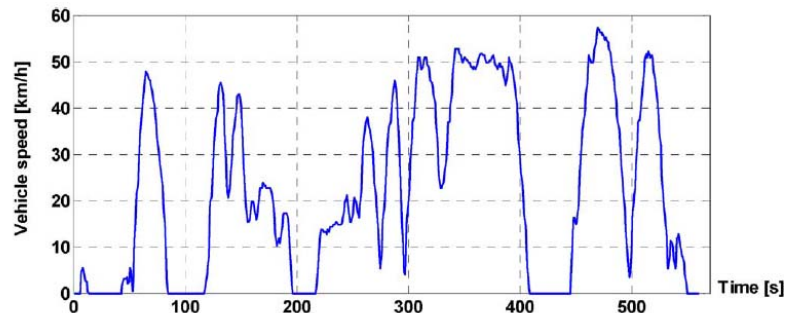
2 conditions de charge (durée du test = 1000h)



Stack 1 : courant constant 50 A



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



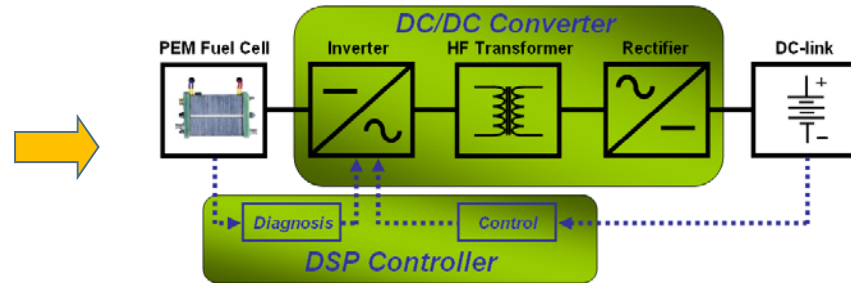
## TECHNICAL SPECIFICATIONS OF THE CONSIDERED PEFC STACKS

|   |                    |
|---|--------------------|
| Number of cells                               | 3                  |
| Nominal current                               | 50A                |
| Maximal power                                 | 100W               |
| Cell area                                     | 100cm <sup>2</sup> |
| 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   |



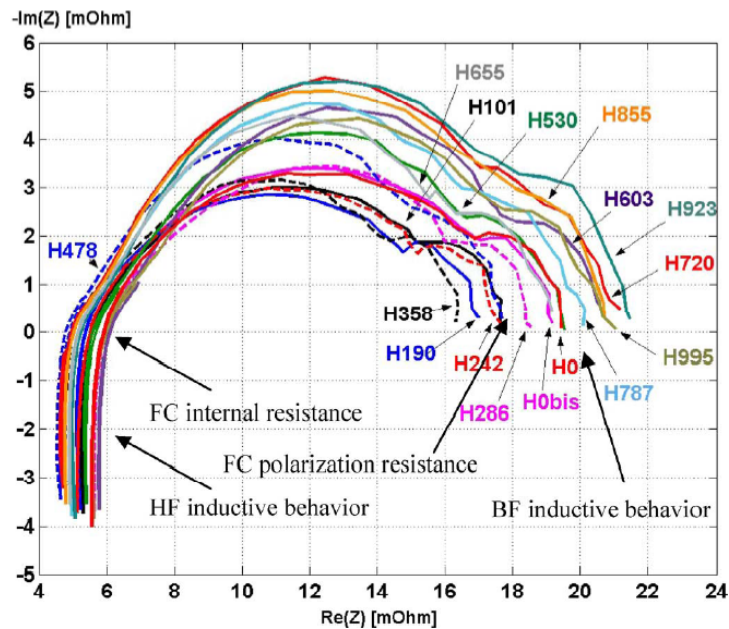
# Diagnostic – Exemple expérimental PEMFC

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

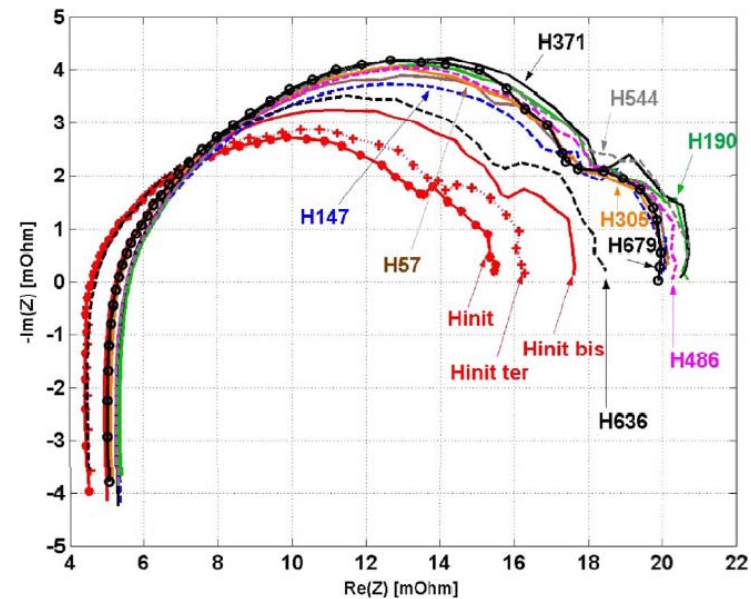


2 conditions de charge (1000h)

Stack 1 : courant constant



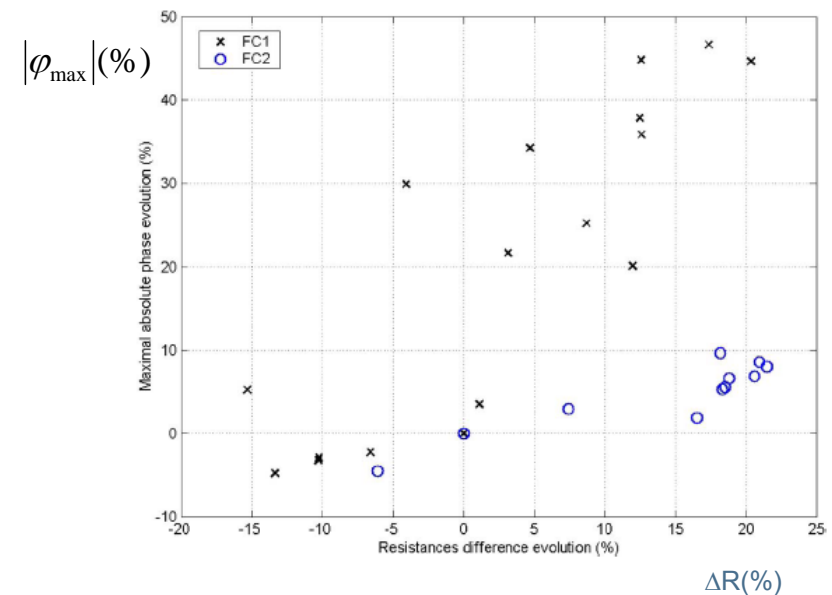
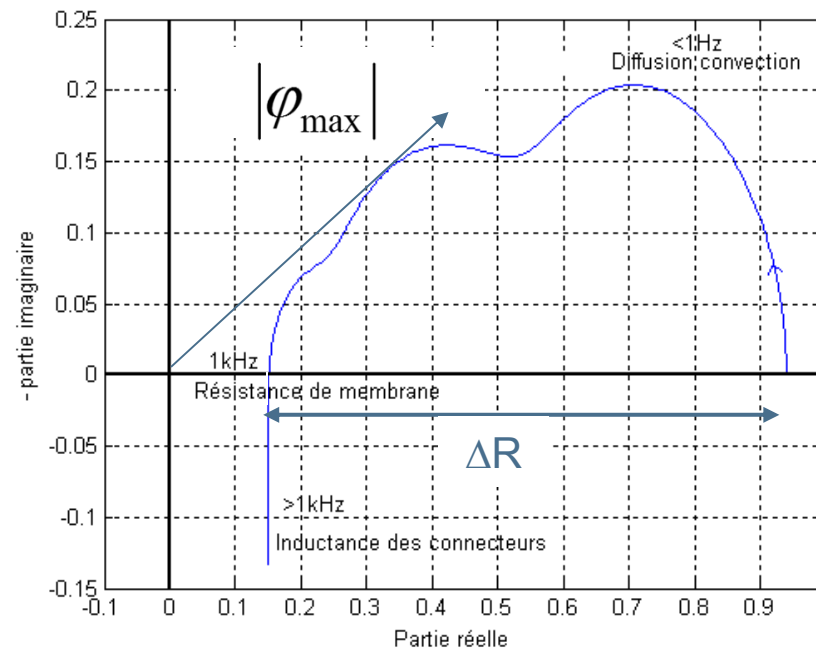
Stack 2 : profil dynamique de courant



# Diagnostic – Exemple expérimental PEMFC

## Traitement des données par clustering flou

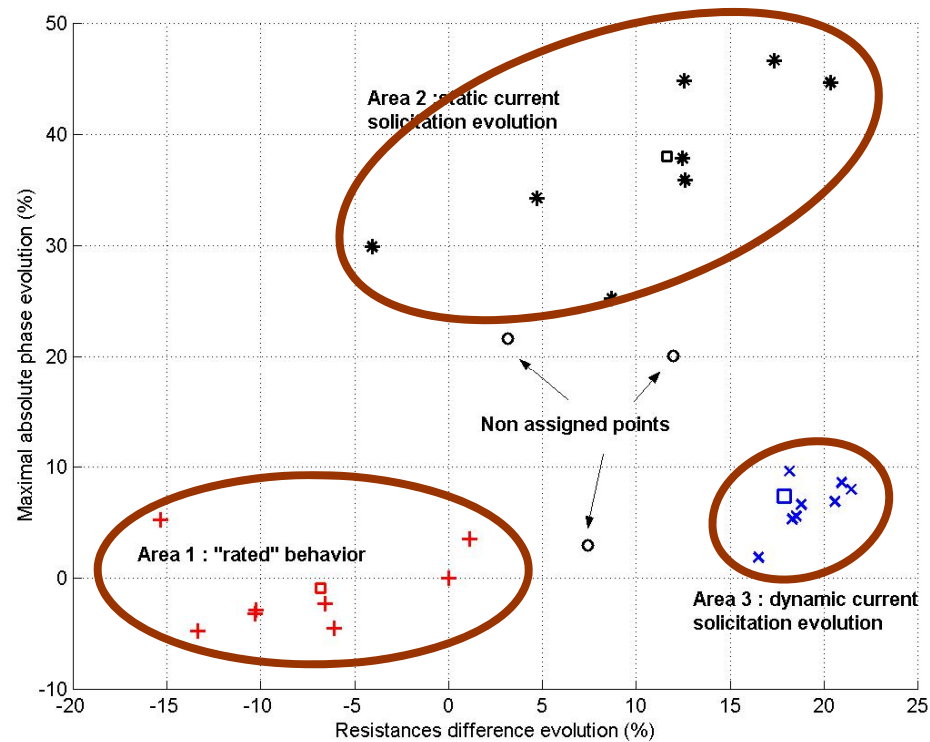
- Post traitement : recherche de 2 hyperparamètres pour chaque spectre d'impédance



# 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*

# FC LAB

FR CNRS 3539

## 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

[\(daniel.hissel@univ-fcomte.fr\)](mailto:daniel.hissel@univ-fcomte.fr)

Verrous technologiques et scientifiques

Axes de recherche au niveau système PAC

Focus sur le diagnostic de PAC

IRTES

femto-st  
sciences & technologies

LTE

LTN



ensmm



IFSTAR

UFC  
UNIVERSITÉ DE FRANCHE-COMTÉ

utbm  
université de technologie  
Belfort-Montbéliard