

Méthodologies expérimentales pour identifier les cellules défailtantes dans les stacks PEM - Cas des fuites de réactifs.

Réunion CNRS systèmes PAC des 8 et 9 janvier 2009 – Thème diagnostic

**D.Candusso^{1,2}, S.Wasterlain^{1,3}, F.Harel^{1,2}, X.François^{1,4}, D.Hissel^{1,3}, MC.Péra^{1,3},
W.Charon^{1,5}, P.Lesage^{1,5}, G. Tian⁶, A.De Bernardinis⁷, G.Coquery⁷**

¹ FC LAB Systèmes pile à combustible,

² INRETS,

³ FEMTO-ST / ENISYS (UMR CNRS 6174), UFC

⁴ FC LAB, UTBM

⁵ M3M, UTBM

FC LAB, rue Thierry Mieg, 90010 BELFORT Cedex, FRANCE

⁶ State Key Laboratory of Automotive Safety and Energy

Department of Automotive Engineering,

Université de Tsinghua, PEKIN, 100084, R.P. de CHINE

⁷ INRETS LTN,

2 av. du Général Malleret - Joinville, 94114 ARCUEIL Cedex

- **Introduction. Problématiques.**
- **Tests de fuites sur stack**
- **Détection de cellules défailiantes**
 - Fuite anode / cathode
 - Fuite anode / circuit de refroidissement
- **En corolaire aux actions de diagnostic :**
 - Architectures à tolérance de panne
- **Conclusions**
- **Perspectives**
- **Biblio. Pour en savoir plus**
- **Test du créneau de débits de réactifs**
 - Analyse expérimentale par la modélisation

- **Introduction. Problématiques.**
- Tests de fuites sur stack
- Détection de cellules défailantes
 - Fuite anode / cathode
 - Fuite anode / circuit de refroidissement
- En corolaire aux actions de diagnostic :
 - Architectures à tolérance de panne
- Conclusions
- Perspectives
- Biblio. Pour en savoir plus
- Test du créneau de débits de réactifs
 - Analyse expérimentale par la modélisation

Introduction. Problématiques

Le cahier des charges transport :

- Durée de vie minimale de 5000h pour applications automobile.
- 20000h au moins pour les bus, davantage pour le ferroviaire.
- Haut niveau de disponibilité. Immobilisation du véhicule réduite. Diagnostic rapide.
- Fonctionnements possibles en modes dégradés.

Des phénomènes occasionnant des fuites de réactifs dans les PAC PEM :

Contraintes mécaniques, thermiques, chimiques (souvent couplées) :

- Stress mécanique :

Différentiels de pression anode / cathode → dégradation des AME et des joints.

Phases successives d'hydratation et d'assèchement des AME → gonflements et contractions des membranes.

Vibrations du véhicule → déplacements de joints et de composants de pile.

- Contraintes thermiques :

Sous-humidification des réactifs et / ou T de pile trop élevées → faibles charges en eau des membranes, points chauds (« hot spots »).

Températures négatives → Gel possible.

- Attaques chimiques :

Sous-stoechiométries des réactifs. Tensions cellules basses → Formation de H_2O_2 .

Introduction. Problématiques

A plus ou moins long terme : apparitions de fuites internes et / ou externes de réactifs dans les empilements

Porosité dans les membranes, perforations (« pin-holes »), déchirures (p-e plus particulièrement sur les bords des surfaces actives), joints abîmés ou déplacés.

Remarque : souvent, la ou les fuites sont localisées.

→ L'empilement complet est inutilisable.

Mélanges de réactifs (H_2 / O_2) possibles. Problèmes de sécurité ?

Solutions envisagées :

- **Amélioration intrinsèque des performances des AME** (et des joints). Durées de vie et fiabilité accrues. Mais : tendance à la diminution des épaisseurs de membranes pour réduire la résistance de l'électrolyte :

Nafion 115 → 127 μ m ; Nafion 112 → 51 μ m ; Nafion 211 ou Nafion 111 → 25 μ m

- **Optimisation du générateur PAC** au niveau du système (auxiliaires, pilotage) pour placer la pile dans un environnement favorable en termes de durée de vie

- Besoins d'**outils de diagnostic** pour la détermination de l'état de santé des PAC.

- Procédures effectives pour **localiser les cellules défailtantes** dans les PAC.

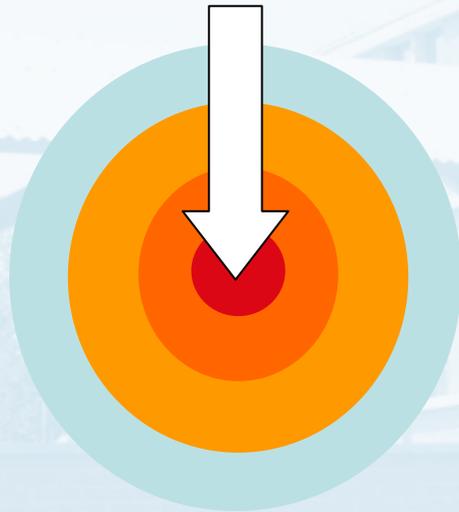
- **Protocoles de test sûrs** vis-à-vis de l'utilisation de l' H_2 .

- Dispositifs de fonctionnement en **modes dégradés** du générateur PAC.

Méthodologies de diagnostic Focus de la présentation

Développement de procédures expérimentales ad-hoc pour le diagnostic.

Instrumentation, métrologie, expériences. Définition et mise en place d'indicateurs de défaillance. Pour l'acquisition de données pertinentes et fiables.



+ Définition de dispositifs à tolérance de panne.

Electronique de puissance autorisant les fonctionnements en modes dégradés.

+ Traitement de l'information

Reconnaissance et classification des défauts. Automatisation des procédures en vue de l'application. Intégration sur des dispositifs embarqués. Contrôle-commande.

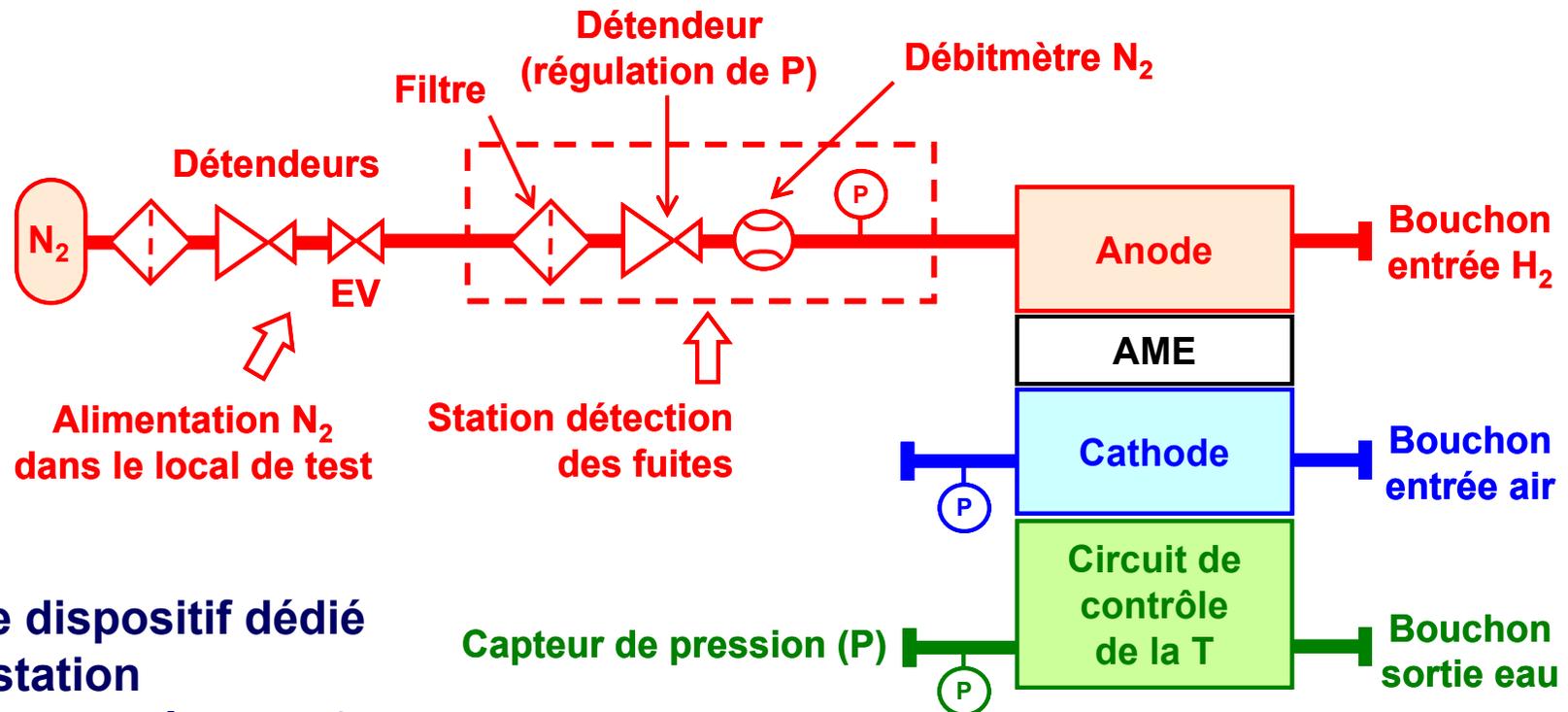
+ Compréhension et représentation des phénomènes.

Retour sur la conception du générateur PAC, sur l'optimisation des conditions de fonctionnements. Modèles de connaissance.

- Introduction. Problématiques.
- **Tests de fuites sur stack**
- Détection de cellules défailantes
 - Fuite anode / cathode
 - Fuite anode / circuit de refroidissement
- En corolaire aux actions de diagnostic :
 - Architectures à tolérance de panne
- Conclusions
- Perspectives
- Biblio. Pour en savoir plus
- Test du créneau de débits de réactifs
 - Analyse expérimentale par la modélisation

Tests de fuites sur stack

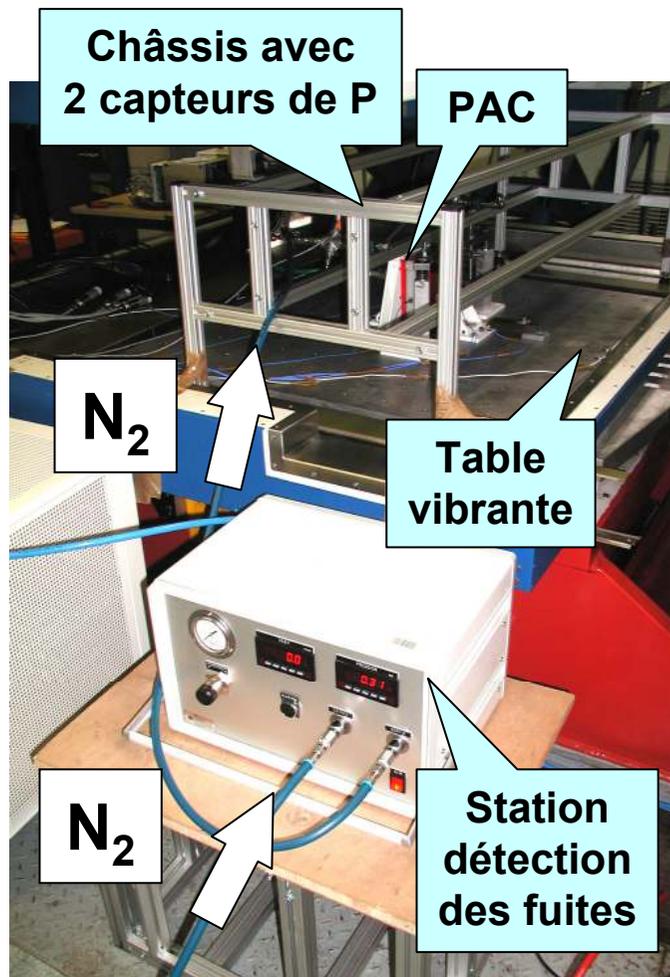
Solutions générales : Tests de fuite (à l'air ou N_2) pour mettre en évidence une fuite externe (de l'intérieur du stack vers l'extérieur) et / ou une fuite interne : entre compartiments (anode, cathode, contrôle de la T) → Différents protocoles de tests envisageables → Sur banc de test PAC ou avec matériel dédié → Transmetteurs de pression et débitmètres adaptés.



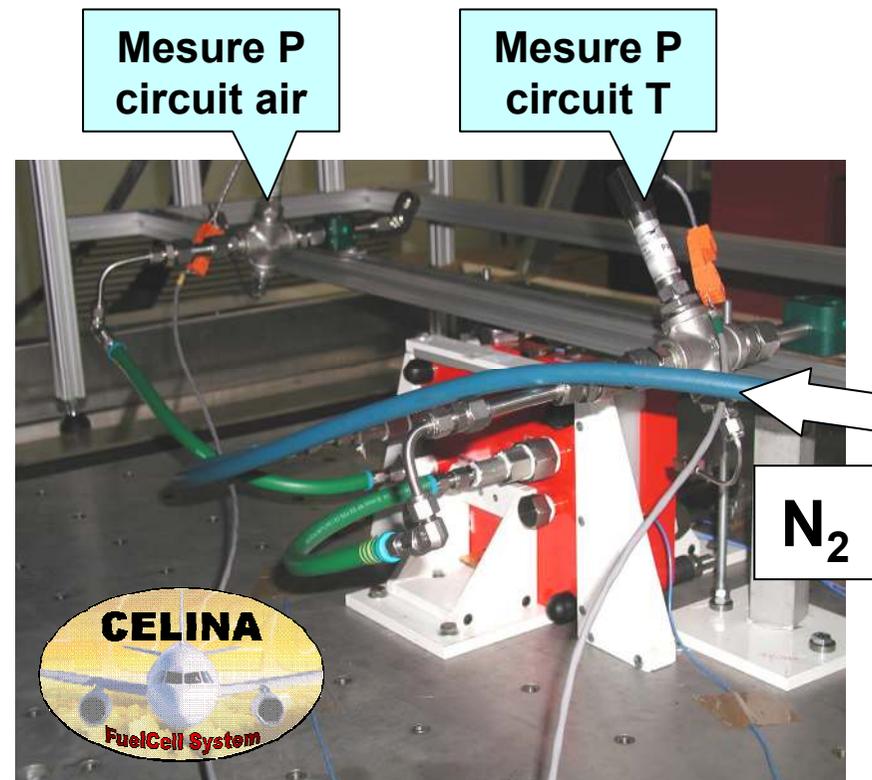
- Ex. de dispositif dédié avec station pour le contrôle des fuites

Tests de fuites sur stack

Ex : Projet CELINA. Surveillance des fuites avec PAC sollicitée en vibrations



Avec laboratoire M3M :
V. Rouss, P. Lesage, W. Charon



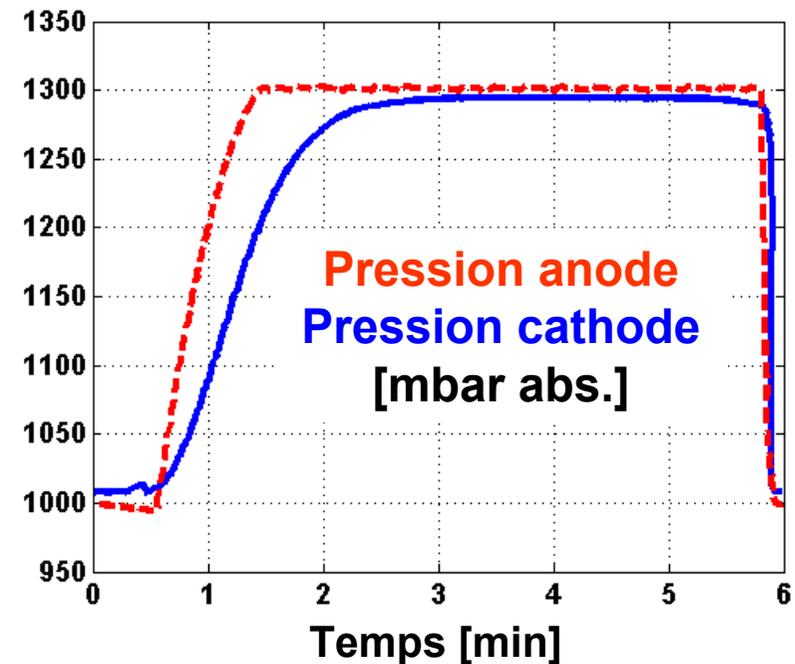
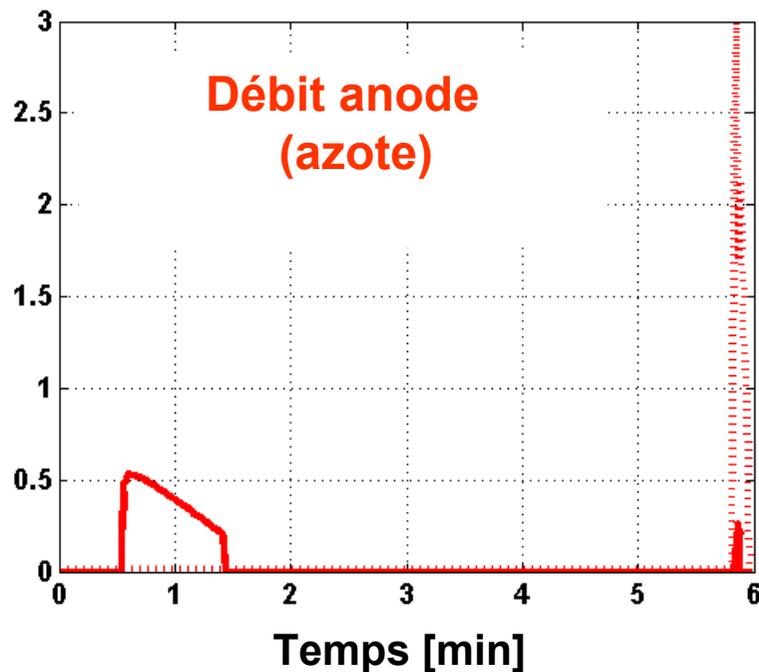
Tests de fuites sur stack Fuite anode / cathode

Ex de protocole de test réalisé sur une PAC PEM en défaut (fuite importante) :

- Cathode isolée à pression ambiante
- Anode pressurisée (à l'azote)
- Surveillance des 2 pressions

→ Equilibre des pressions observé : circulation de gaz entre compartiments!

Mais par où ??



- Ne permet pas la localisation des cellules défailiantes.

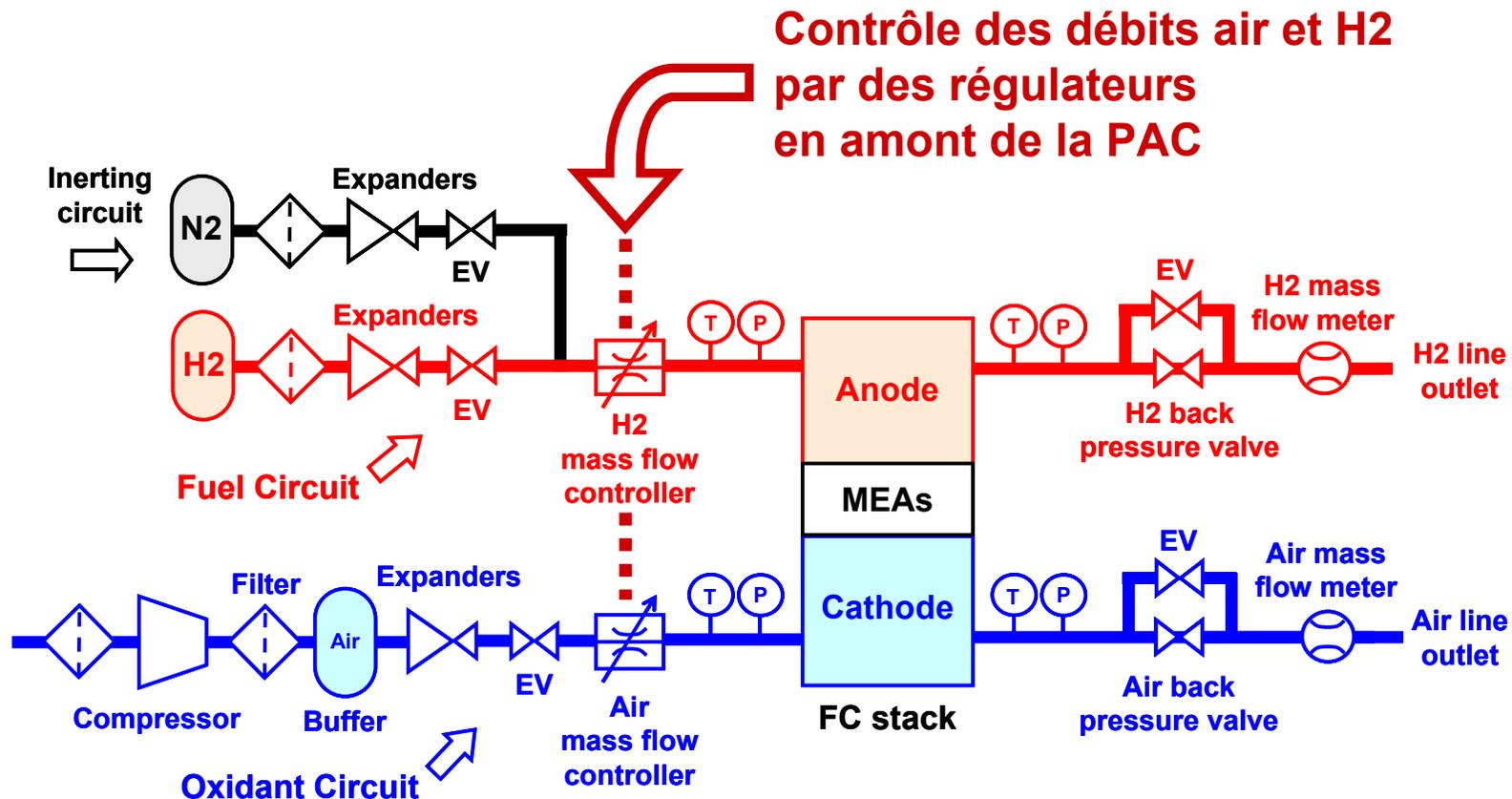
- Introduction. Problématiques.
- Tests de fuites sur stack
- **Détection de cellules défailantes**
 - Fuite anode / cathode
 - Fuite anode / circuit de refroidissement
- En corolaire aux actions de diagnostic :
 - Architectures à tolérance de panne
- Conclusions
- Perspectives
- Biblio. Pour en savoir plus
- Test du créneau de débits de réactifs
 - Analyse expérimentale par la modélisation

Détection de cellules défailiantes

Fuite anode / cathode

Procédure expérimentale de diagnostic définie initialement à partir d'un petit empilement PEM (3 cellules) de faible puissance ($\approx 100\text{W}$) et en (fort) mauvais état.

- Stack alimenté en H_2 / air durant 10 s. Débits de réactifs arrêtés promptement.
- Surveillance des tensions cellules à l'abandon (OCV).



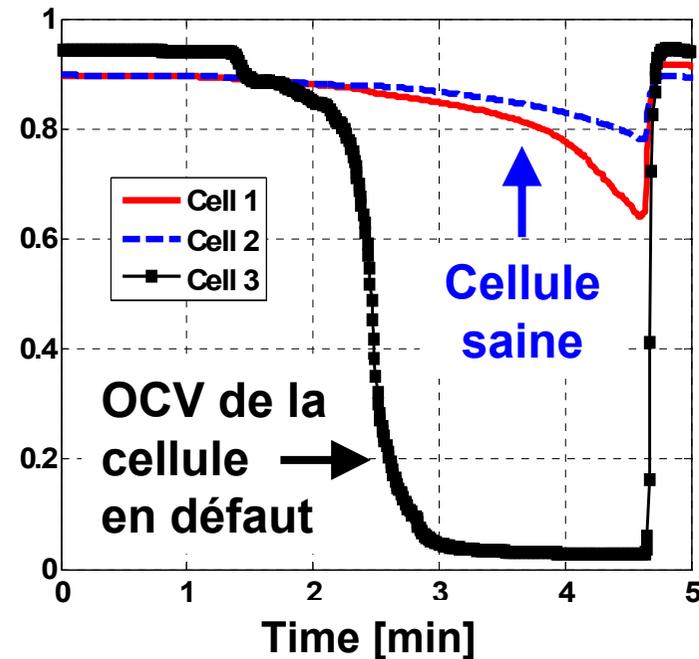
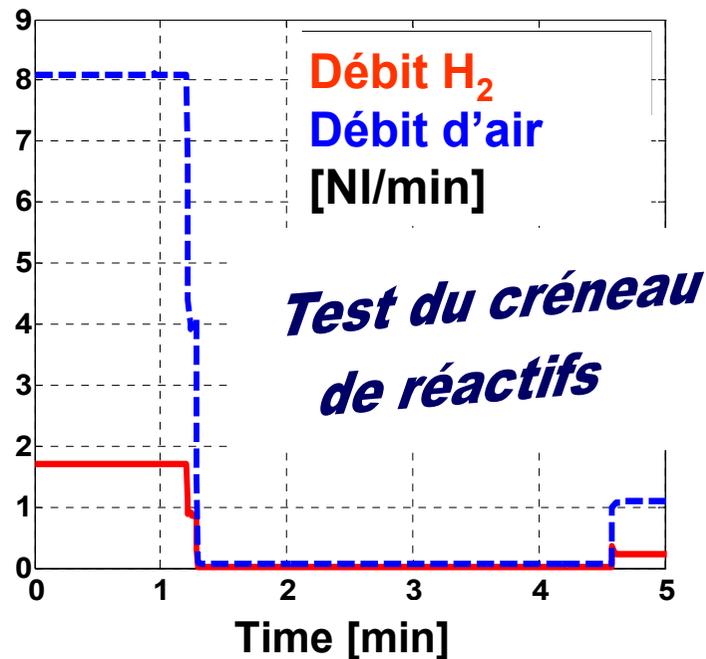
Détection de cellules défectueuses Fuite anode / cathode

Procédure expérimentale de diagnostic définie initialement à partir d'un petit empilement PEM (3 cellules) de faible puissance ($\approx 100\text{W}$) et en (fort) mauvais état.

- Stack alimenté en H_2 / air durant 10 s. Débits de réactifs arrêtés promptement.
- Surveillance des tensions cellules à l'abandon (OCV).

→ Chute rapide de la tension de cellule défectueuse après l'arrêt des débits.

Volumes tampons d' H_2 consommés plus rapidement dans la cellule en défaut du fait de la perméation / fuite de gaz réactif entre l'anode et la cathode.

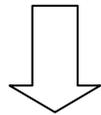


N° 14

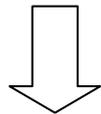
FC LAB

Systèmes pile à combustible

Influence du différentiel de pression anode / cathode sur le niveau de fuite ?

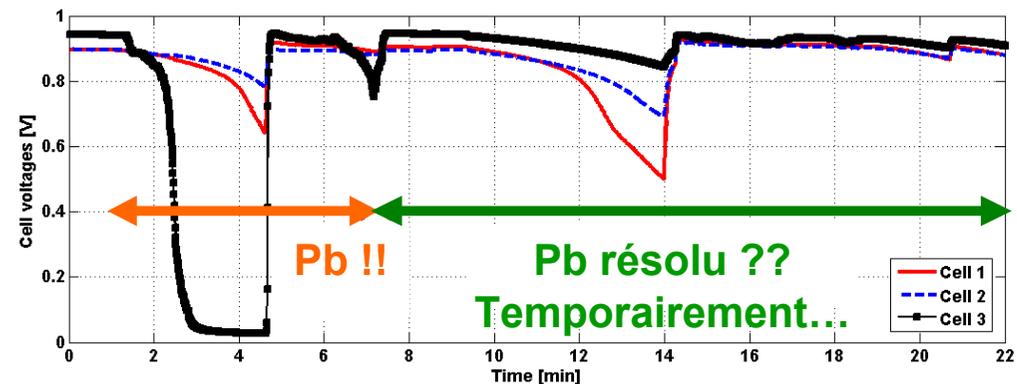
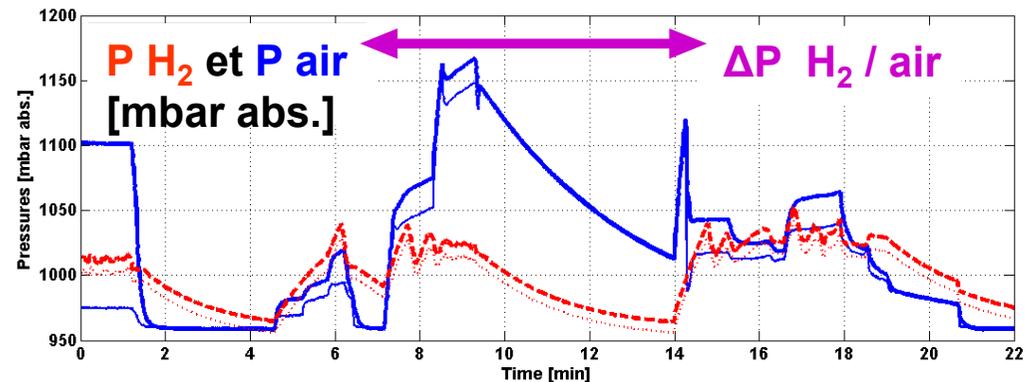
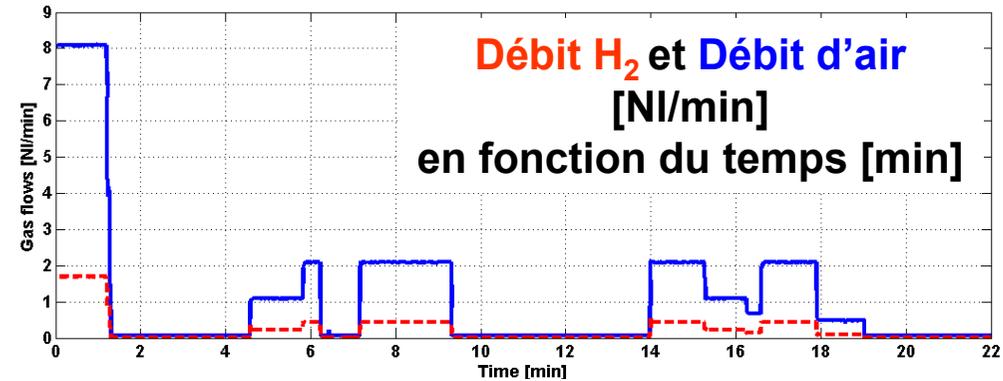


Répétition du test du créneau de réactifs en contrôlant le ΔP avec des vannes de contre-pressions



Fuite plus ou moins prononcée

Détection de cellules défailtantes Fuite anode / cathode



Détection de cellules défailtantes Fuite anode / cathode

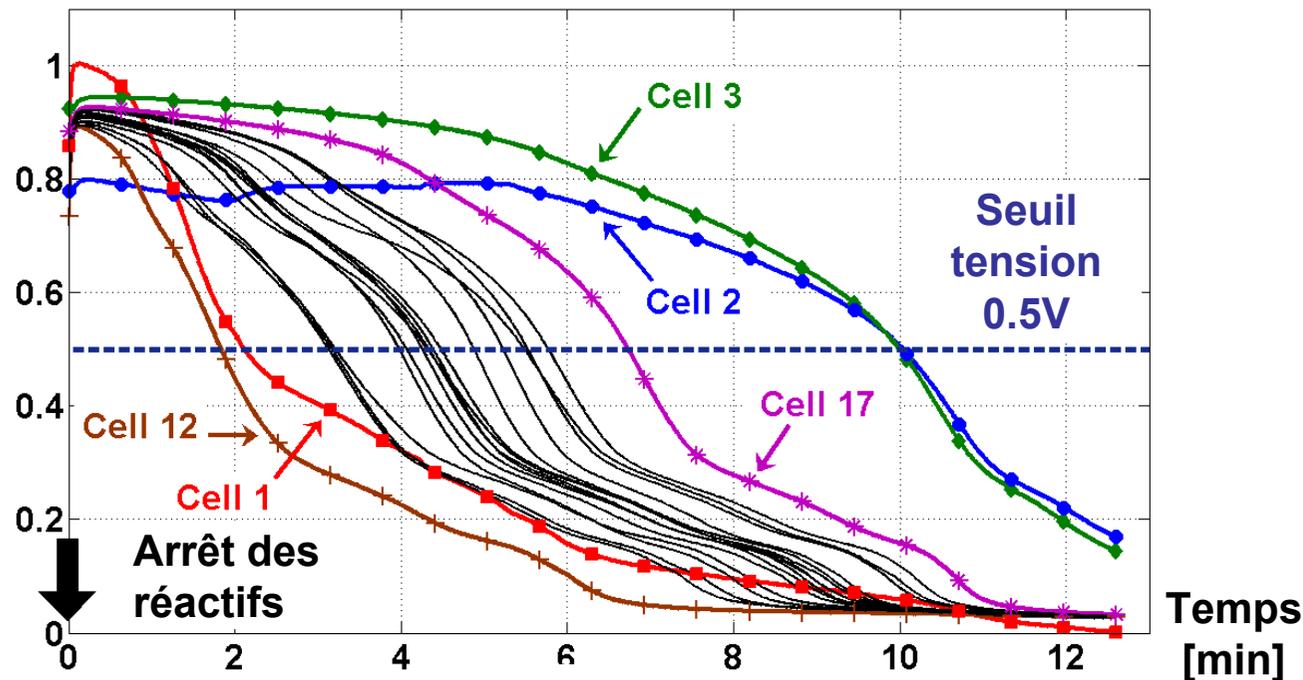
Procédure de diagnostic adaptée à une PAC 20 cellules. En moins mauvais état.

Les OCVs chutent plus ou moins rapidement suivant :

- la position des cellules dans le stack (influence de la disposition des entrées et sorties de gaz)
- de l'état de dégradation de la (ou les) membranes et / ou joints d'étanchéité.

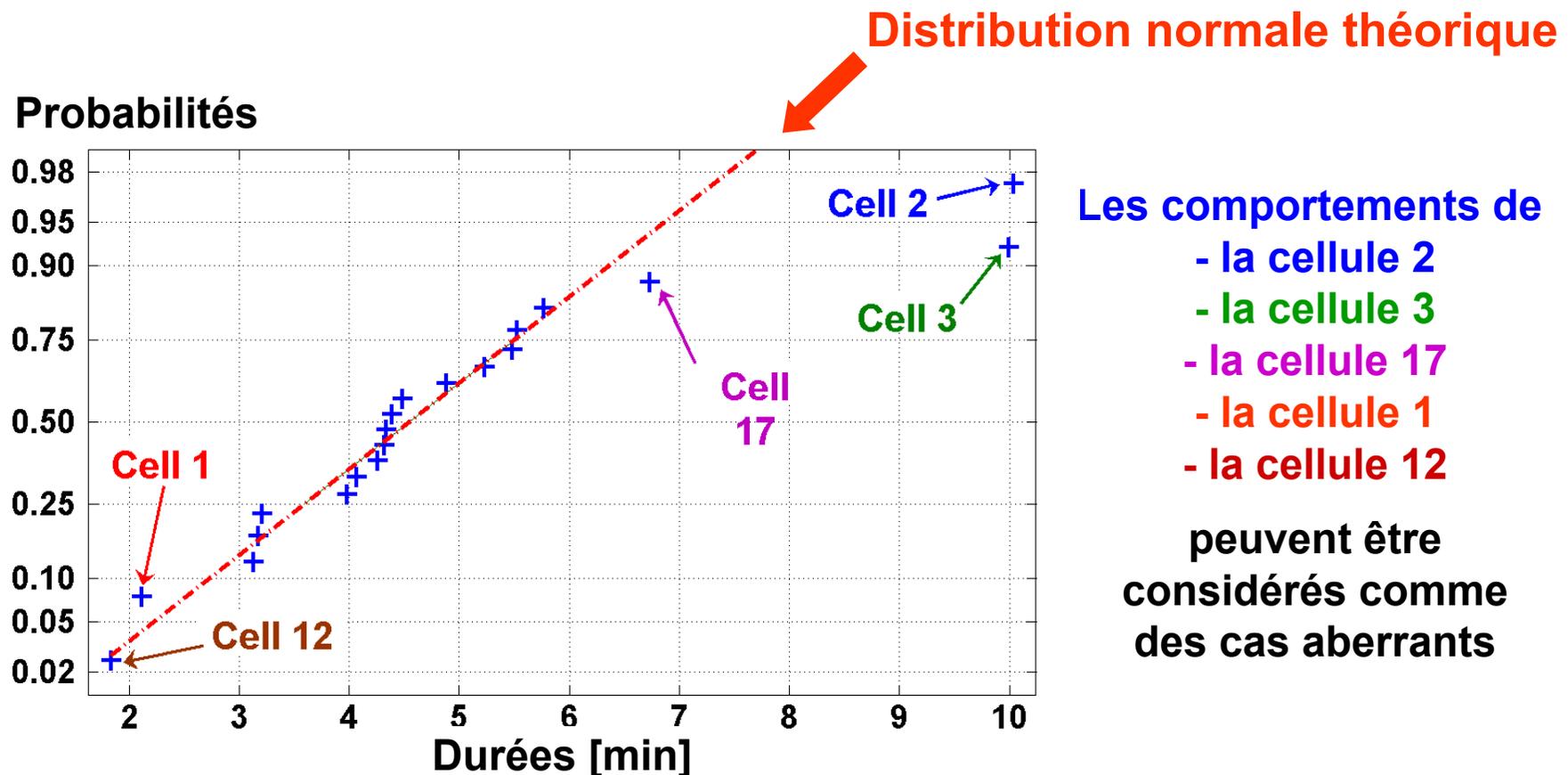
Les OCVs atteignent le seuil de 0.5V à différents instants.

→ La distribution statistique de ces durées peut être étudiée.



Détection de cellules défailtantes Fuite anode / cathode

Différentes méthodologies et outils peuvent être utilisés pour analyser les données.
Ici : observation de la signature électrique et détection basée signal des défauts
+ outil stat. : « normal probability plot » = graph. à échelle fonctionnelle normale
+ comparaison entre l'écart type et la moyenne arithmétique relatifs aux durées.

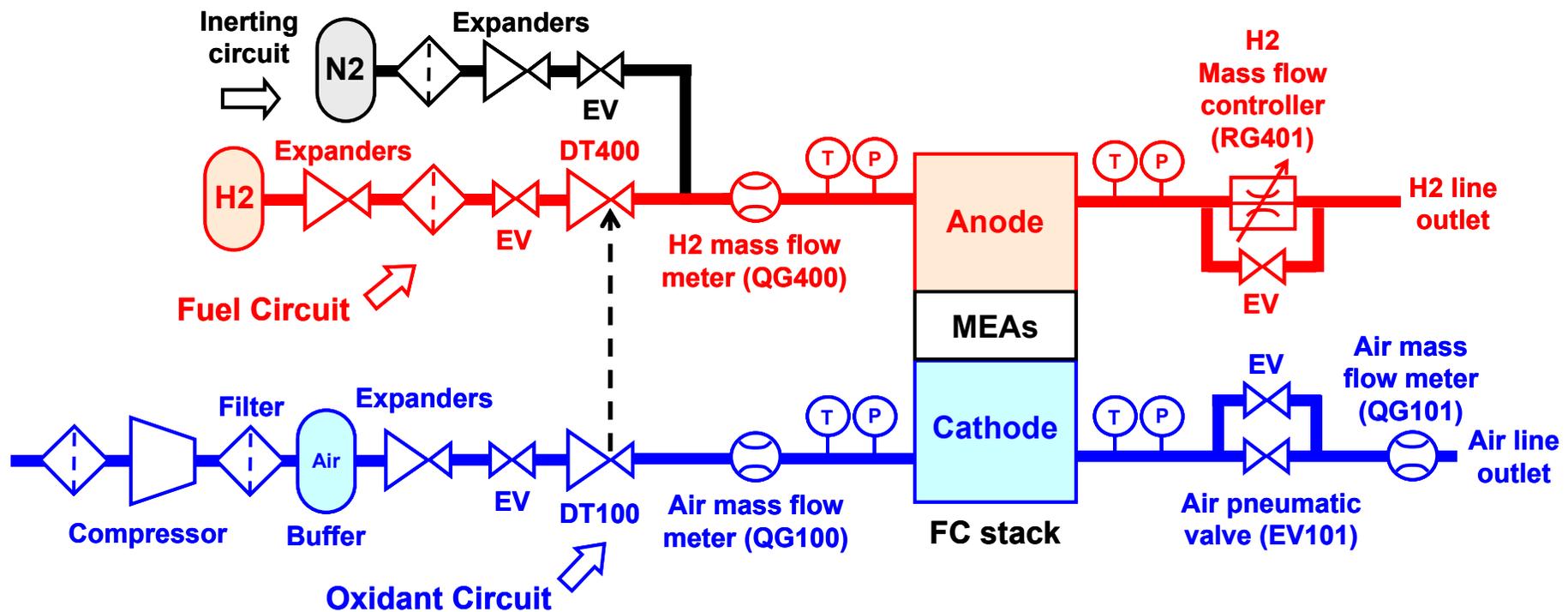


Détection de cellules défailtantes Fuite anode / cathode

Procédure expérimentale alternative pour le diagnostic de cellules défailtantes.

Exemple : stack 5kW - 42 cellules alimenté en H₂ et air.

Problème : pas de possibilité d'arrêter les débits de réactifs rapidement compte tenu de l'architecture fluïdique atypique du banc 10kW (configuration initiale Helion).



Test du créneau de réactifs impossible

Détection de cellules défaillantes Fuite anode / cathode

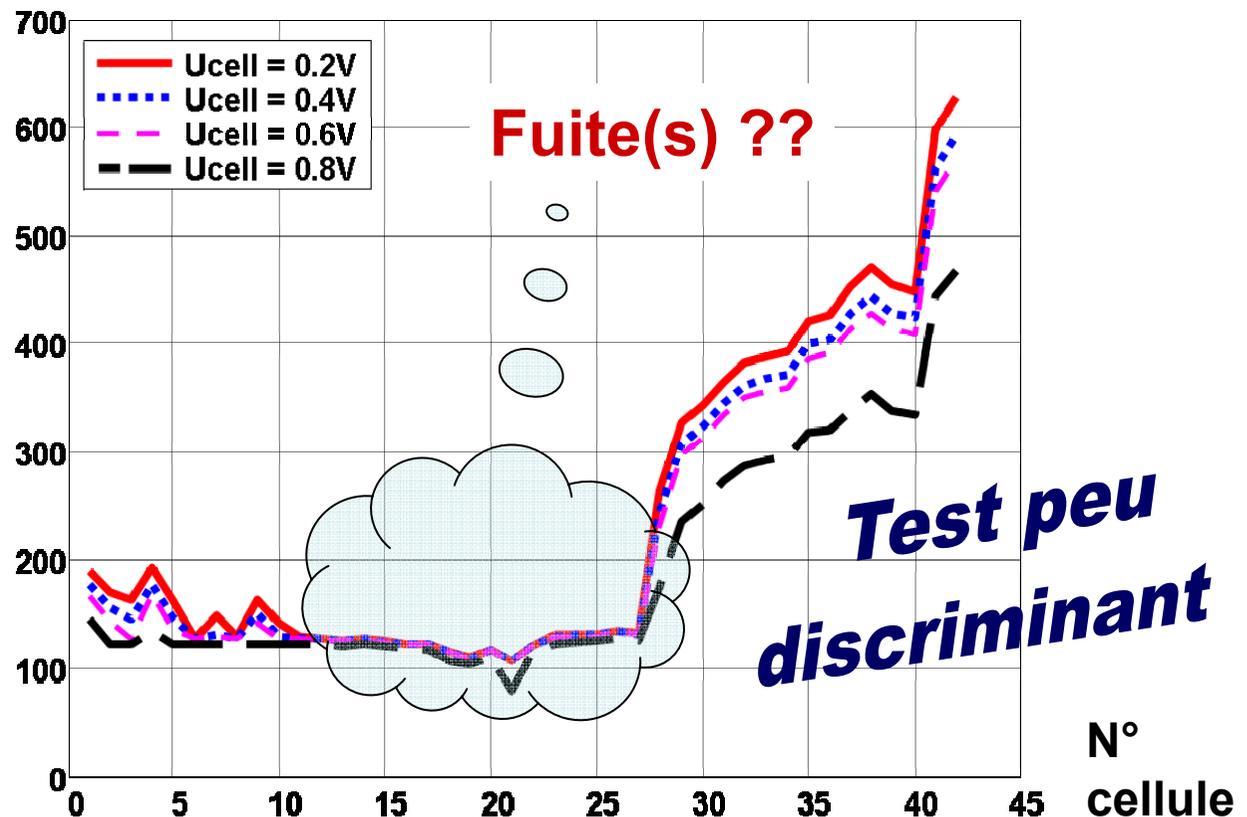
Procédure expérimentale alternative pour le diagnostic de cellules défaillantes.

Exemple : stack 5kW - 42 cellules alimenté en H₂ et air.

Problème : pas de possibilité d'arrêter les débits de réactifs rapidement compte tenu de l'architecture fluide atypique du banc 10kW (configuration initiale Helion).

**Durées [s]
nécessaires
pour atteindre
les différents
seuils
de tension**

+ à considérer :
impact dans le stack
de la position des
entrées – sorties des
réactifs, du dessin des
plaques bipolaires

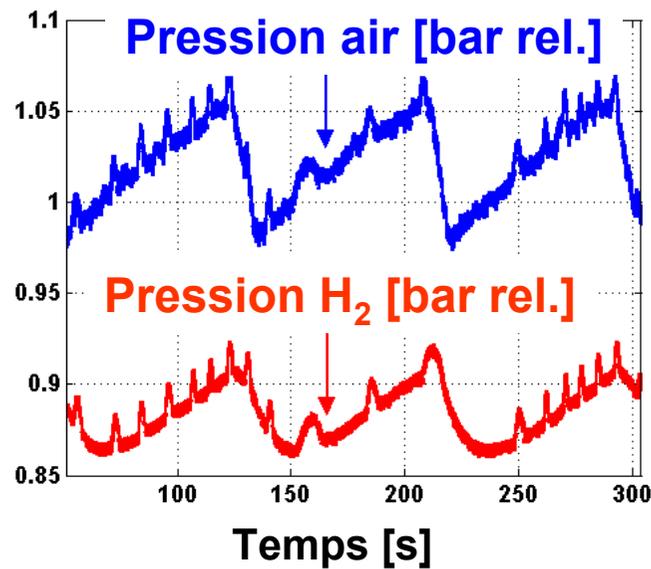


Détection de cellules défaillantes Fuite anode / cathode

Procédure expérimentale alternative pour le diagnostic de cellules défaillantes.

Exemple : stack 5kW - 42 cellules alimenté en H₂ et air.

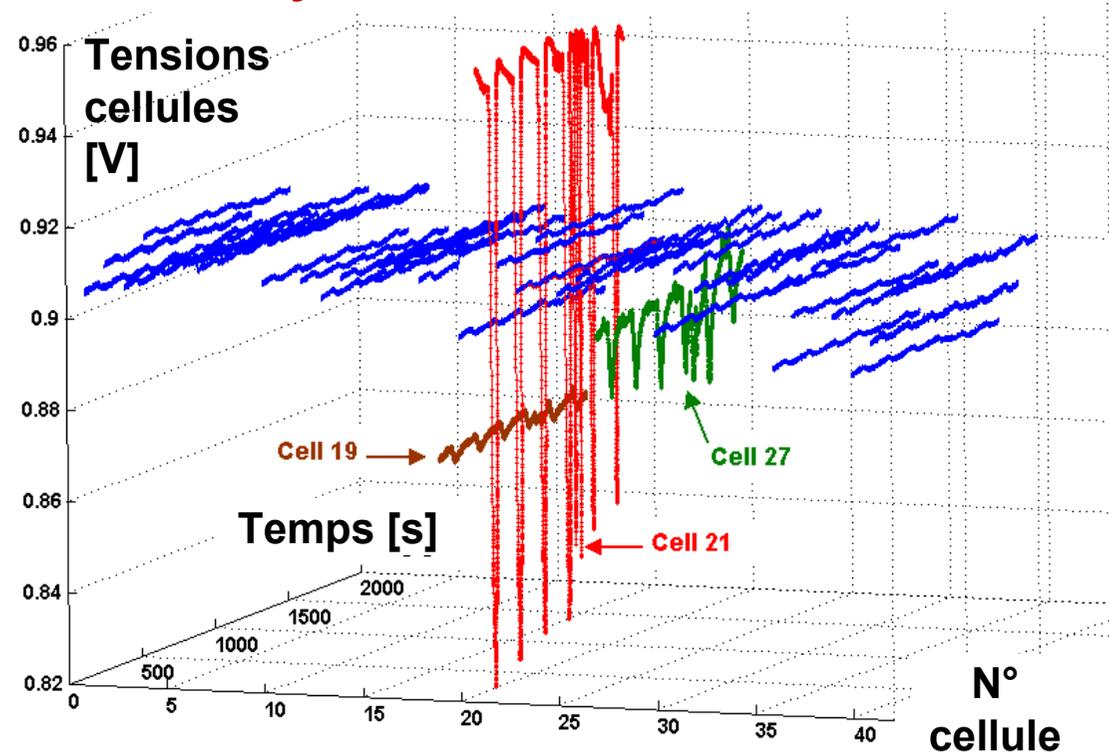
Etude de la sensibilité des OCVs aux variations dynamiques de P anode / cathode.



Profils de pressions **anode** et **cathode** appliquées aux entrées

OCVs des cellules
en fonction des profils de
pression appliqués

Fuite anode / cathode dans les cellules
→ OCV moyen faible et / ou fortes variations

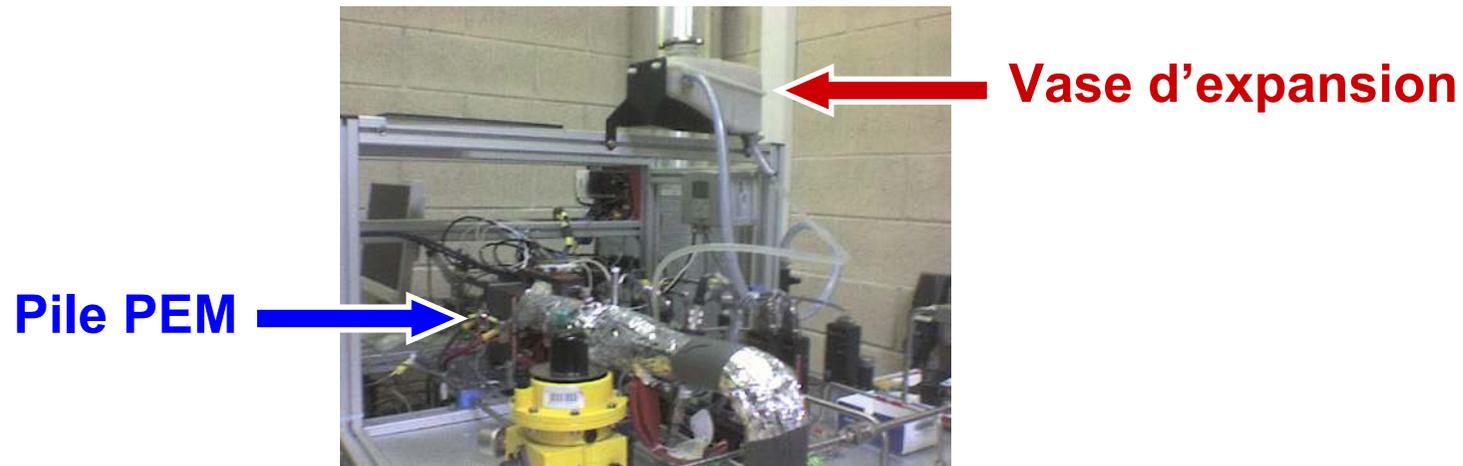


Détection de cellules défailtantes

Fuite anode / circuit de refroidissement

Déroulement de l'essai :

- Pile PEM 20 cellules en fonctionnement dans des conditions habituelles...
- Bulles de gaz observées dans le vase d'expansion du circuit de contrôle de la T...



- Pas de fuite entre le circuit de refroidissement et l'extérieur (air ambiant).
- Pas de traces d'eau sous les conduites du circuit de refroidissement...
- Des variations de débit d' H_2 ont été appliquées à l'anode → Légères élévations du niveau d'eau dans le vase d'expansion.

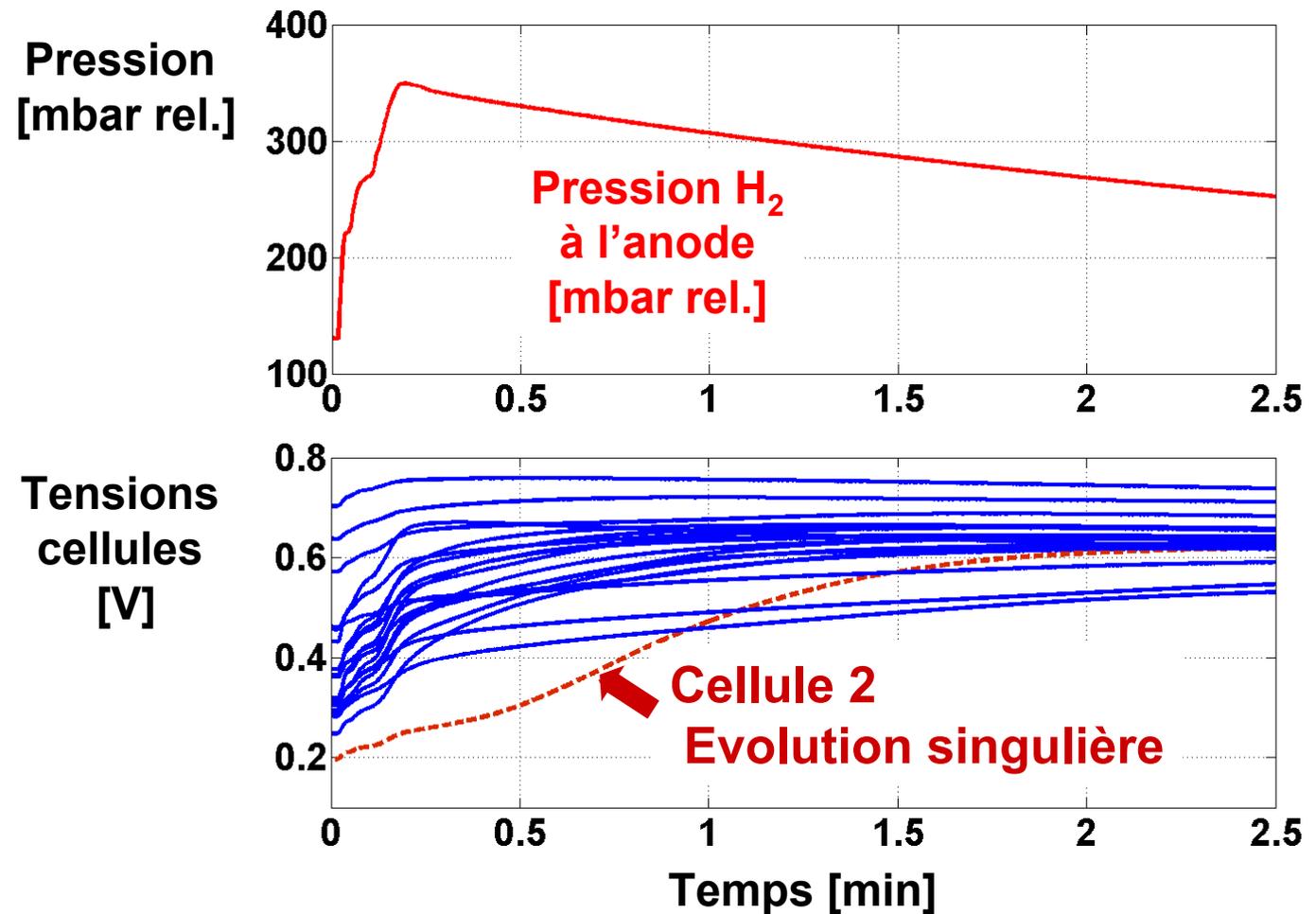
→ Fuite dans la pile, entre l'anode et le circuit de contrôle de la T !
→ Joint abîmé ou déplacé ?

Détection de cellules défailiantes Fuite anode / circuit de refroidissement

La possibilité d'une telle fuite a été suggérée

- par la surveillance des OCVs et par la réalisation de variations sur le débit H_2 :

**Localisation
de cellule(s)
en défaut**



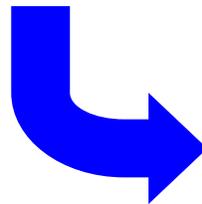
Détection de cellules défailiantes

Fuite anode / circuit de refroidissement

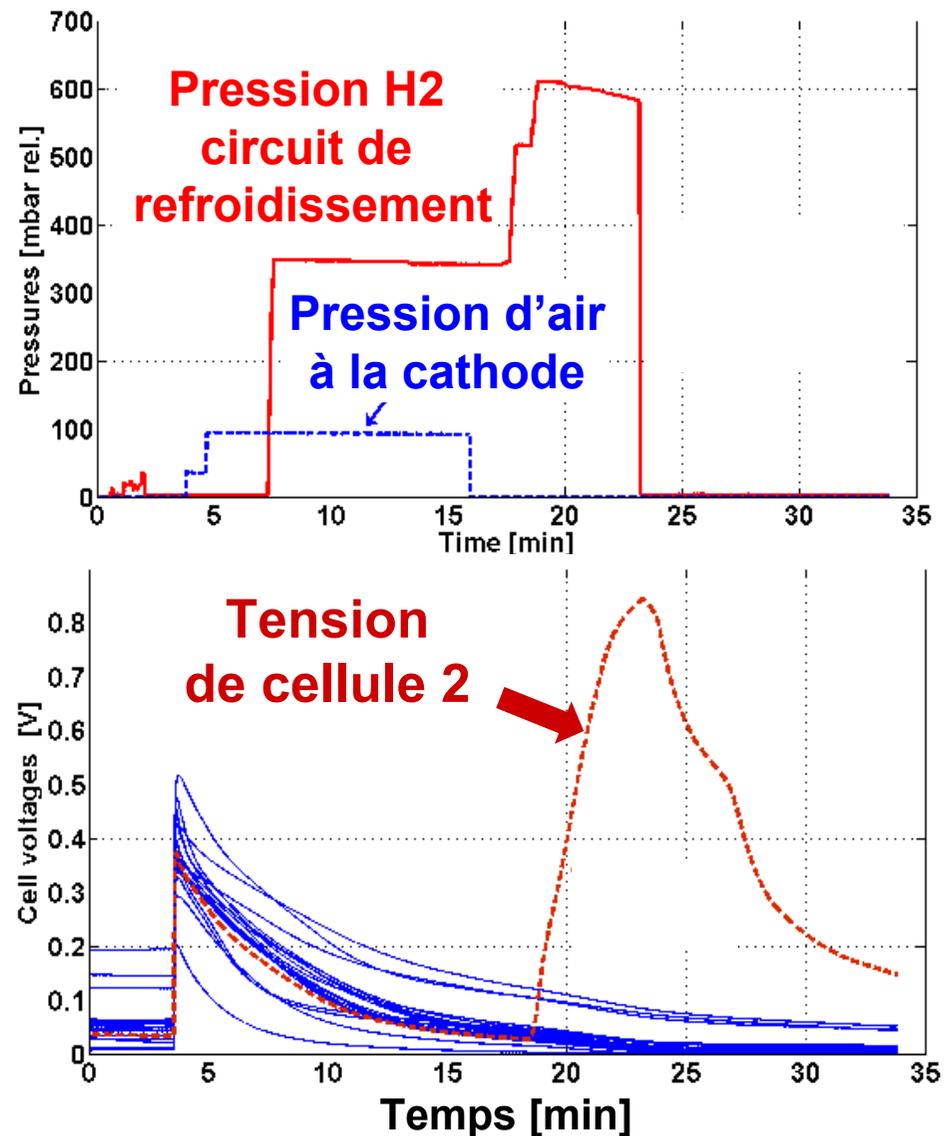
La possibilité d'une telle fuite a été confirmée

- en vidant l'eau du circuit de refroidissement et en réalisant des tests de fuite,
- en pressurant le circuit de refroidissement avec de l' H_2 .

**Localisation
de cellule(s)
en défaut**



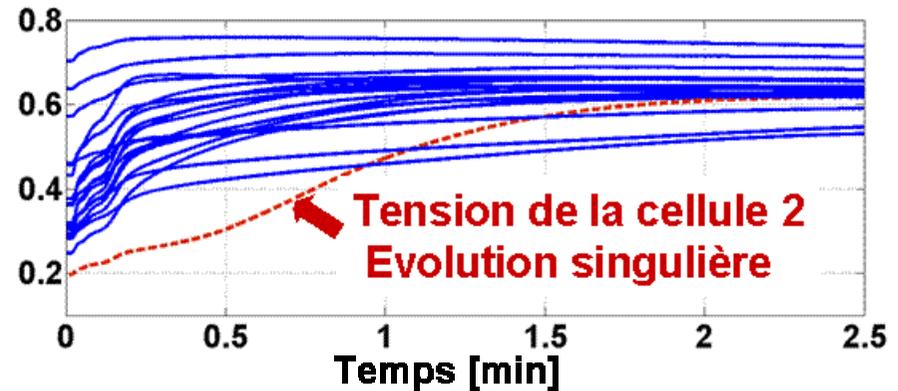
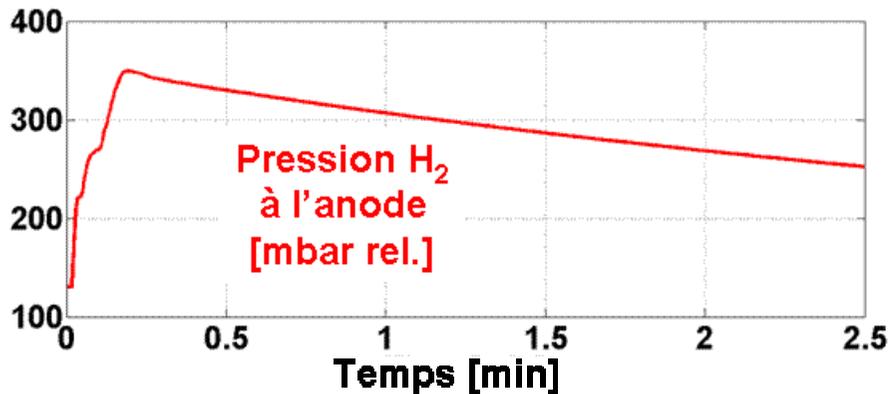
Problème :
**Test difficile à appliquer à bord
 d'un véhicule !**



Détection de cellules défailtantes

Fuite anode / circuit de refroidissement

Méthode de diagnostic pour les PAC embarquées :
surveillance des OCV couplée à des dynamiques sur les débits d'H₂
+ outils d'analyse des données (modèles boîtes noires et analyses statistiques).



Modèle pour les évolutions des tensions cellules (vs. temps et pression H₂)
+ « fitting » (ajustement aux moindres-quarrés) :

$$U_{\text{cell}} = a_1 + a_2 \cdot t + a_3 \cdot t^2 + a_4 \cdot t^3 + a_5 \cdot \text{PH}_2 + a_6 \cdot \text{PH}_2^2 + a_7 \cdot \text{PH}_2^3 \\ + a_8 \cdot t \times \text{PH}_2 + a_9 \cdot t \times \text{PH}_2^2 + a_{10} \cdot t^2 \times \text{PH}_2 + a_{11} \cdot \ln(\text{PH}_2) + a_{12} \cdot t \times \ln(\text{PH}_2)$$

Détection de cellules défailtantes

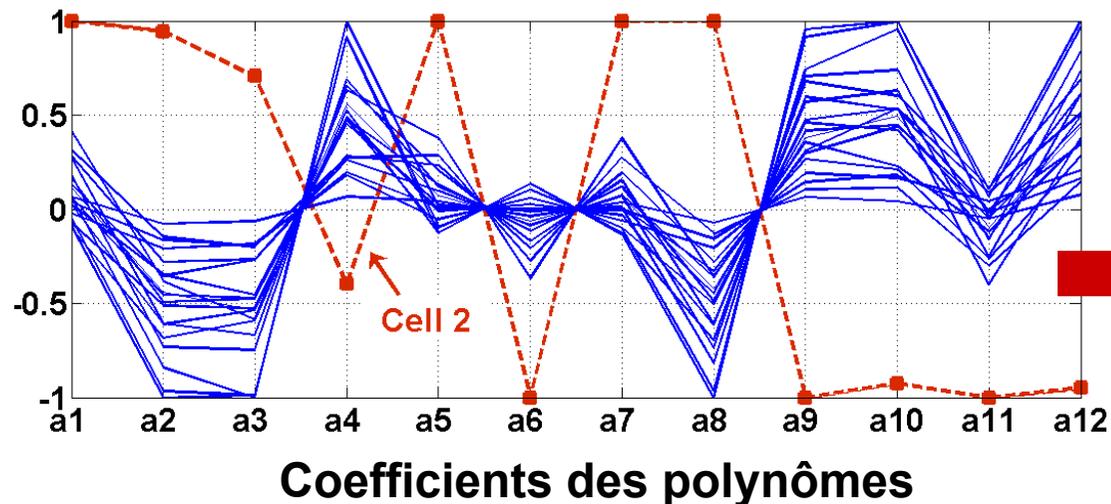
Fuite anode / circuit de refroidissement

Méthode de diagnostic pour les PAC embarquées :
 surveillance des OCVs couplée à des dynamiques sur les débits d'H₂
 + outils d'analyse des données (modèles boîtes noires et analyses statistiques).

$$U_{\text{cell}} = a_1 + a_2 \cdot t + a_3 \cdot t^2 + a_4 \cdot t^3 + a_5 \cdot \text{PH}_2 + a_6 \cdot \text{PH}_2^2 + a_7 \cdot \text{PH}_2^3$$

$$+ a_8 \cdot t \times \text{PH}_2 + a_9 \cdot t \times \text{PH}_2^2 + a_{10} \cdot t^2 \times \text{PH}_2 + a_{11} \cdot \ln(\text{PH}_2) + a_{12} \cdot t \times \ln(\text{PH}_2)$$

Coordonnées centrées réduites



On examine les coeff
du modèle.

Détection du cas
aberrant !

Comportement anormal
de la cellule 2

- Introduction. Problématiques.
- Tests de fuites sur stack
- Détection de cellules défailiantes
 - Fuite anode / cathode
 - Fuite anode / circuit de refroidissement
- **En corolaire aux actions de diagnostic :**
 - **Architectures à tolérance de panne**
- Conclusions
- Perspectives
- Biblio. Pour en savoir plus
- Test du créneau de débits de réactifs
 - Analyse expérimentale par la modélisation

**En corolaire aux actions de diagnostic :
Architectures à tolérance de panne**

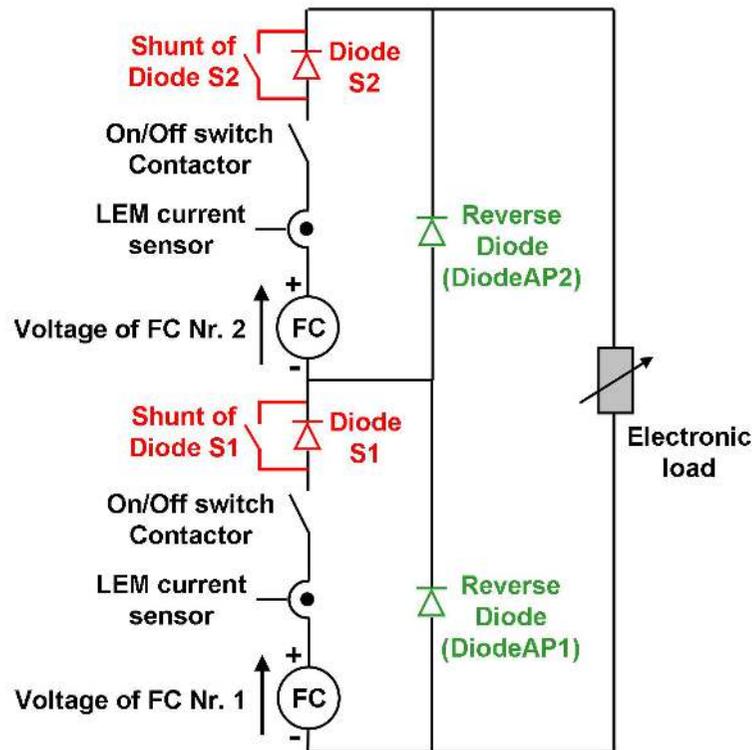
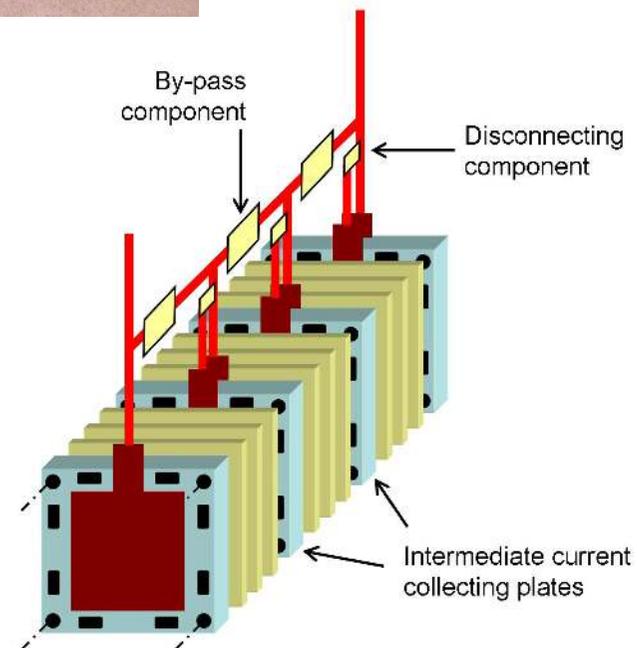


Photo Banc bi-piles



**Association multi-stacks
et / ou by-pass électriques et fluidiques
intégrés aux PAC ?**

- Introduction. Problématiques.
- Tests de fuites sur stack
- Détection de cellules défailiantes
 - Fuite anode / cathode
 - Fuite anode / circuit de refroidissement
- En corolaire aux actions de diagnostic :
 - Architectures à tolérance de panne
- **Conclusions**
- Perspectives
- Biblio. Pour en savoir plus
- Test du créneau de débits de réactifs
 - Analyse expérimentale par la modélisation

- **Méthodologies à finalités pratiques** et description de procédures expérimentales pour le diagnostic. Combinées à des méthodes de traitement et d'analyse des données basées sur des outils statistiques, elles permettent de détecter les cellules en défaut au sein des piles PEM sans ouvrir le stack et dans 2 cas :
 - Perméation (« crossover ») ou fuite de gaz anode / cathode
 - Fuite anode / circuit de refroidissement.
- Approches diagnostic intéressantes **pour les personnels expérimentant les PAC dans les laboratoires.**
- **Principes intéressants à terme pour le développement d'outils de diagnostic destinés aux générateur PAC embarqués.**

- Introduction. Problématiques.
- Tests de fuites sur stack
- Détection de cellules défailiantes
 - Fuite anode / cathode
 - Fuite anode / circuit de refroidissement
- En corolaire aux actions de diagnostic :
 - Architectures à tolérance de panne
- Conclusions
- **Perspectives**
- Biblio. Pour en savoir plus
- Test du créneau de débits de réactifs
 - Analyse expérimentale par la modélisation

- **Meilleure compréhension des phénomènes de perméation.**

Réaction possible entre l' H_2 et l' O_2 ? Dilution possible de l' H_2 dans l'air ?

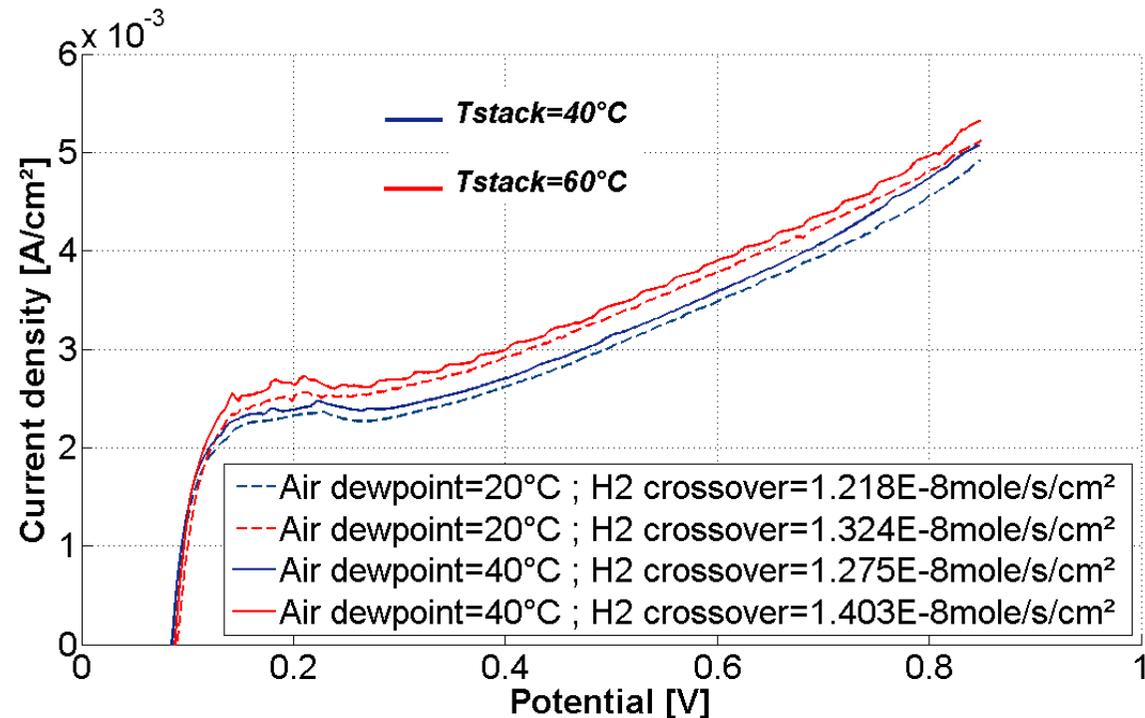
Impact du différentiel de pression anode / cathode : perméation d' H_2 et / ou d'air ?

Détermination possible des causes : membrane abîmée ou joint déplacé ou défectueux ? 1) Sans ouvrir le stack ! 2) Analyses post-mortem

**Voltamétrie linéaire
pour la détermination
du « crossover »**

- sur cellule
- sur stack (en cours)

Avec S. Wasterlain



Développement de stratégies de diagnostic (expérimentation et traitement de l'information).

- Action spécifique INRETS : DIAGPAC



- Introduction. Problématiques.
- Tests de fuites sur stack
- Détection de cellules défailiantes
 - Fuite anode / cathode
 - Fuite anode / circuit de refroidissement
- En corolaire aux actions de diagnostic :
 - Architectures à tolérance de panne
- Conclusions
- Perspectives
- **Biblio. Pour en savoir plus**
- Test du créneau de débits de réactifs
 - Analyse expérimentale par la modélisation

- G. Tian, S. Wasterlain, I. Endichi, D. Candusso, F. Harel, X. François, M-C. Péra, D. Hissel, J-M. Kauffmann (août 2008). *Diagnosis methods dedicated to the localisation of failed cells within PEMFC stacks*. **J. Power Sources**. Vol. 182, n°2, pp. 449-461. Ed. Elsevier.
- V. Rouss, P. Lesage, S. Bégot, D. Candusso, W. Charon, F. Harel, X. François, V. Selinger, C. Schilo, S. Yde-Andersen (novembre 2008). *Mechanical behaviour of a fuel cell stack under vibrating solicitations linked to aircraft applications. Part I: Experimental*. **Int. J. Hydrogen Energy**. Vol. 33, n°22, pp. 6755-6765. Ed. Elsevier.
- G. Tian, S. Wasterlain, D. Candusso, F. Harel, D. Hissel, X. François (3 - 4 août 2008). *Identification of failed cells inside PEMFC stacks in two cases: anode / cathode crossover and anode / cooling compartment leak*. **HyForum 2008**. Changsha, Chine, 5 pages.
- S. Wasterlain, D. Candusso, D. Hissel, F. Harel, P. Bergman, P. Menard, M. Anwar. *An experimental study of the temperature, relative humidity and flow rate effects on the performances of a single PEMFC*. **FDFC 2008**, 10 – 12 décembre 2008, Nancy.
- D. Candusso, A. De Bernardinis, M.C. Péra, F. Harel, X. François, D. Hissel, G. Coquery, J-M. Kauffmann (avril 2008). *Fuel cell operation under degraded working modes and study of a diode by-pass circuit dedicated to multi-stack association*, **Energy Conversion and Management**, Vol. 49, n°4, pp. 880-895. Ed. Elsevier.
- P. Coddet, M-C. Péra, D. Candusso, D. Hissel (4 – 7 juin 2007). *Study of Proton Exchange Membrane Fuel Cell safety procedures in case of emergency shutdown*. **IEEE International Symposium on Industrial Electronics (ISIE)**. Vigo, Espagne. pp. 725-730, ISBN 1-4244-0755-9.

- Introduction. Problématiques.
- Tests de fuites sur stack
- Détection de cellules défailiantes
 - Fuite anode / cathode
 - Fuite anode / circuit de refroidissement
- En corolaire aux actions de diagnostic :
 - Architectures à tolérance de panne
- Conclusions
- Perspectives
- Biblio. Pour en savoir plus
- **Test du créneau de débits de réactifs**
 - **Analyse expérimentale par la modélisation**

Test du créneau de débits de réactifs

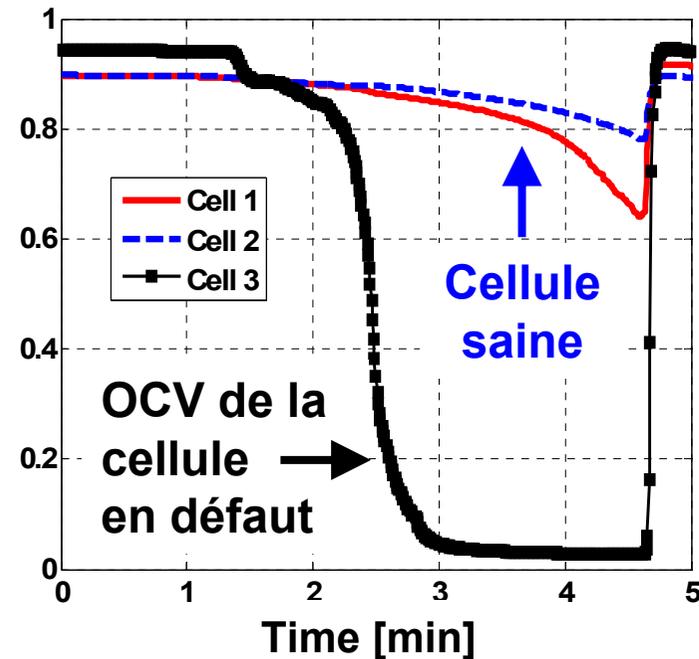
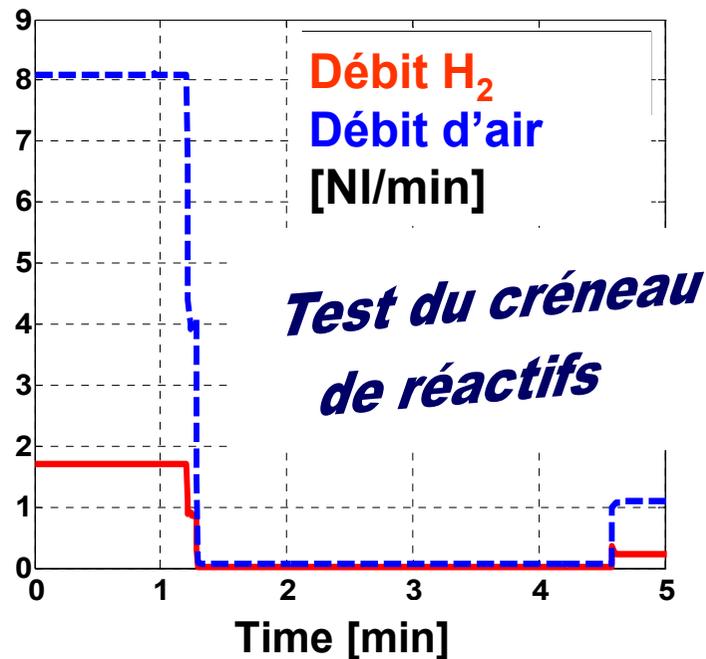
Analyse expérimentale par la modélisation

Procédure expérimentale de diagnostic définie initialement à partir d'un petit empilement PEM (3 cellules) de faible puissance ($\approx 100\text{W}$) et en (fort) mauvais état.

- Stack alimenté en H_2 / air durant 10 s. Débits de réactifs arrêtés promptement.
- Surveillance des tensions cellules à l'abandon (OCV).

→ Chute rapide de la tension de cellule défaillante après l'arrêt des débits.

Volumes tampons d' H_2 consommés plus rapidement dans la cellule en défaut du fait de la perméation / fuite de gaz réactif entre l'anode et la cathode.



Test du créneau de débits de réactifs

Analyse expérimentale par la modélisation

Objectif : explication qualitative des courbes observées

1) Calcul du potentiel à vide.

Selon Jianlu Zhang et al, *PEM fuel cell open circuit voltage (OCV) in the temperature range of 23 C to 120 C*, JPS, Vol 163 n°1, 7/12/2006, pp 532-537

$$E_{\text{Sim}}^{\text{OCV}} = E_{\text{Theor}}^{\text{OCV}} - \Delta E_{\text{O}_2\text{-Pt}}^{\text{OCV}} - \Delta E_{\text{H}_2\text{-xover}}^{\text{OCV}}$$

???

À voir...

Potentiel calculé pour la simulation

Potentiel réversible thermodynamique et potentiel de Nernst

Réaction entre la surface du platine et l'oxygène

Surtension liée au courant de « crossover »

Test du créneau de débits de réactifs

Analyse expérimentale par la modélisation

Objectif : explication qualitative des courbes observées

1) Calcul du potentiel à vide. Détails

$$E_{\text{Theor}}^{\text{OCV}} = E^0 + \frac{RT}{2F} \cdot \ln \left(\frac{P_{\text{H2 electrode}}}{1000} \cdot \sqrt{\frac{P_{\text{O2 electrode}}}{1000}} \right)$$

$$E^0 = 1.23 - 0.000846 \cdot (T - 298.15)$$

$$R = 8.314 \text{ [J.mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}\text{]}$$

$$F = 96485 \text{ [C]}$$

$\Delta E_{\text{O2-Pt}}^{\text{OCV}}$ Réaction entre la surface du Pt et l'O₂ (à 23°C et 1 atm → 0.182V)

$\Delta E_{\text{H2-xover}}^{\text{OCV}}$ Calculé avec : $I = i_0 \left(e^{(2\alpha T f \eta)} - e^{-(2(1-\alpha T) f \eta)} \right)$

I : densité de courant [A/cm²] et η : surtension [V]

i_0 : densité de courant d'échange apparente (à T=23°C, $i_0=1.22 \cdot 10^{-4}$ [A.cm⁻²])

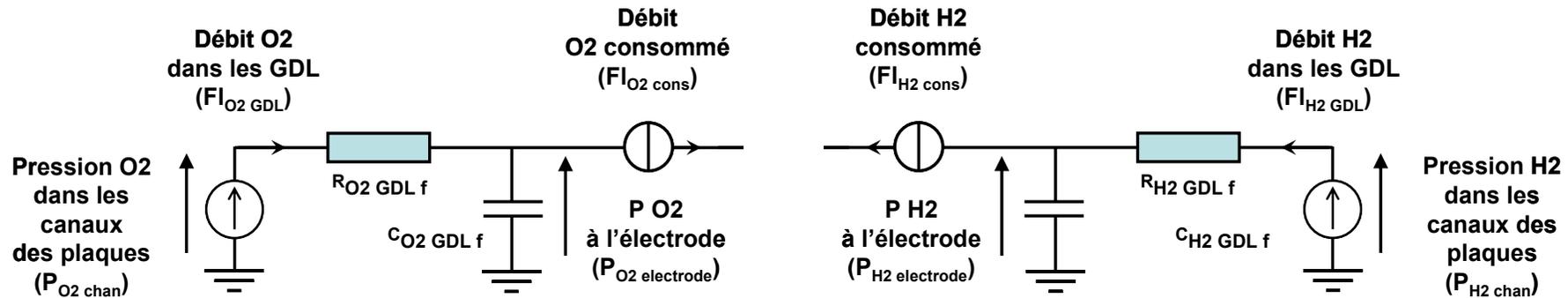
$T = 296.15\text{K}$ et $f = F / R / T$ et $\alpha = 0.00168 \text{ K}^{-1}$

Test du créneau de débits de réactifs Analyse expérimentale par la modélisation

Objectif : explication qualitative des courbes observées

2) Calcul des pressions partielles aux électrodes.

Modélisation par analogies électricité - fluide



Débits de gaz anode / cathode ???

Scénario 1

$$\begin{cases} F_{I_{H_2} \text{ CONS}} = \text{const} \\ F_{I_{O_2} \text{ CONS}} = 0 \end{cases}$$

Scénario 2

$$\begin{cases} F_{I_{H_2} \text{ CONS}} = I/(2F) \\ F_{I_{O_2} \text{ CONS}} = I/(4F) \end{cases}$$

Scénario 3A

$$\begin{cases} F_{I_{H_2} \text{ CONS}} = (P_{H_2 \text{ electrode}} - (P_{O_2 \text{ electrode}} / 0.21)) / R_{\text{membrane } f} = I/(2F) \\ F_{I_{O_2} \text{ CONS}} = I/(4F) \end{cases}$$

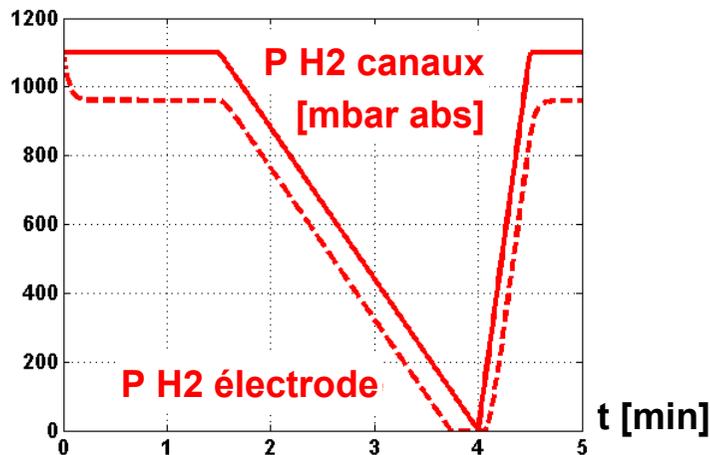
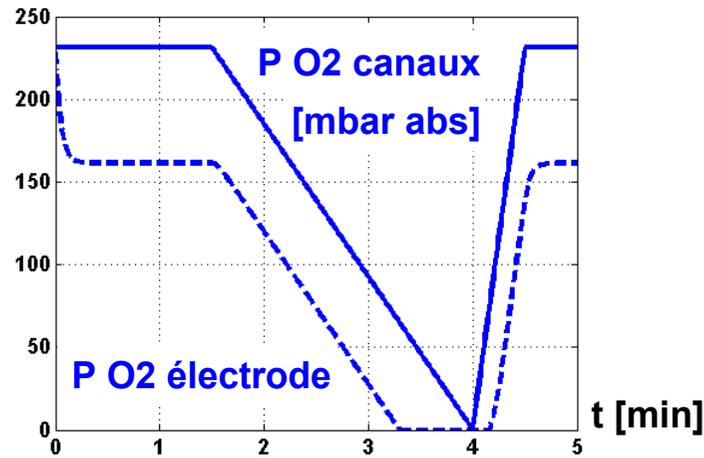
Scénario 3B

$$\begin{cases} F_{I_{O_2} \text{ CONS}} = 0.21 \cdot ((P_{O_2 \text{ electrode}} / 0.21) - P_{H_2 \text{ electrode}}) / R_{\text{membrane } f} = I/(4F) \\ F_{I_{H_2} \text{ CONS}} = I/(2F) \end{cases}$$

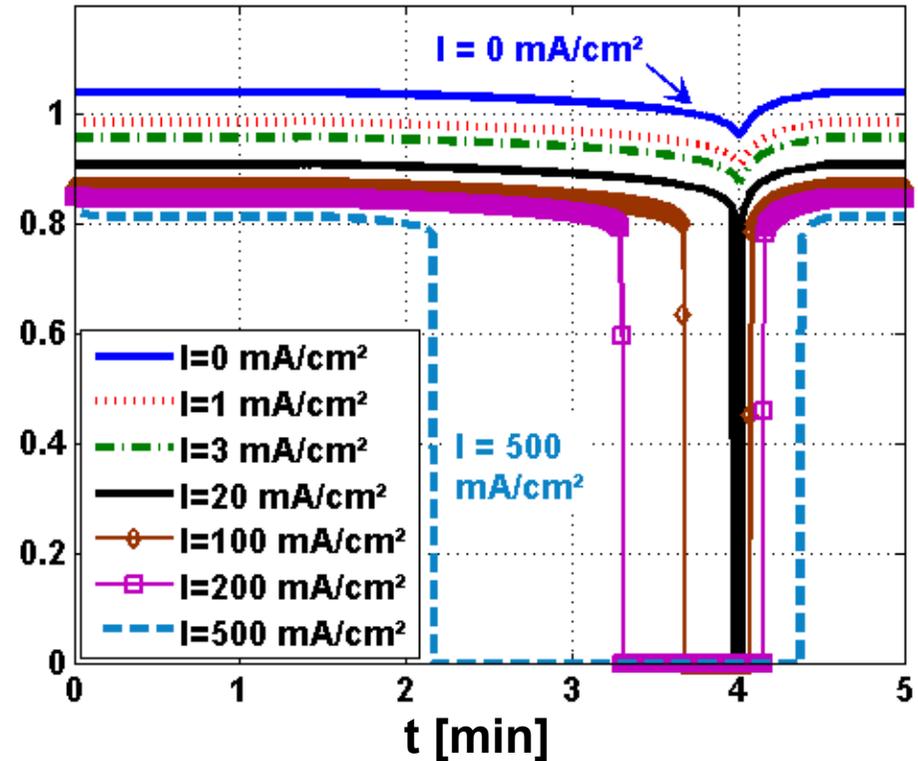
Test du créneau de débits de réactifs Analyse expérimentale par la modélisation

Objectif : explication qualitative des courbes observées

3) Profils de pression imposés dans les canaux (ex $I = 200 \text{ mA/cm}^2$). Simulation



Tension cellule [V]



Rque : $I \approx 3 \text{ mA} \cdot \text{cm}^{-2}$ dans une cellule saine