

INSTITUT FRANCAIS
DES SCIENCES
ET TECHNOLOGIES
DES TRANSPORTS,
DE L'AMENAGEMENT
ET DES RESEAUX

ENS de Cachan, 30/01/2013



Contribution à l'expérimentation de générateurs à pile à combustible (PAC) pour les systèmes de transports

Denis CANDUSSO - CR IFSTTAR LTN Versailles Satory

Localisé sur la plateforme systèmes PAC de Belfort

Garants : G. COQUERY, Z. KHATIR

Soutenance
d'Habilitation à Diriger des Recherches
par l'ENS de Cachan,
Ecole Doctorale Sciences Pratiques



IFSTTAR

Plan de la présentation

→ 1^{ère} partie : synthèse de l'activité de recherche

- CV, cadre de travail, démarche adoptée

→ 2^{ème} partie : plus de détails sur les travaux menés

- Restitution du contexte g^{al} recherches PAC & transports
- Qu'est-ce qu'un générateur à PAC ?
- **Caractérisation & analyse expérimentales de PAC**
 - Bancs d'essais, instruments & protocoles de mesure, plans d'expériences
- **Essais en conditions d'usage transport dupliquées en labo**
 - Profils de mission véhicule, essais climatiques et vibratoires
- **Aspects durée de vie, fiabilité, diagnostic**
 - Essais d'endurance, protocoles exp. spécifiques, traitement de l'info.
- **Intégration des PAC dans les Σ de transport**
 - Démonstrateurs, déploiements des techno. H₂, sûreté de fct^{ment}

→ 3^{ème} partie : conclusions & perspectives



Plan de la présentation

→ 1^{ère} partie : synthèse de l'activité de recherche

- CV, cadre de travail, démarche adoptée

→ 2^{ème} partie : plus de détails sur les travaux menés

- Restitution du contexte g^{al} recherches PAC & transports
- Qu'est-ce qu'un générateur à PAC ?
- Caractérisation & analyse expérimentales de PAC
 - Bancs d'essais, instruments & protocoles de mesure, plans d'expériences
- Essais en conditions d'usage transport dupliquées en labo
 - Profils de mission véhicule, essais climatiques et vibratoires
- Aspects durée de vie, fiabilité, diagnostic
 - Essais d'endurance, protocoles exp. spécifiques, traitement de l'info.
- Intégration des PAC dans les Σ de transport
 - Démonstrateurs, déploiements des techno. H₂, sûreté de fct^{ment}

→ 3^{ème} partie : conclusions & perspectives



CV, cadres de travail

- **Formation ingénieur** (ENSAIS → INSA Strasbourg - 1997)
& **docteur en Génie Electrique** (INPG - 2002)

Activité de recherche :

Thématique des générateurs à PAC pour les transports

- **Initiée en 1998 : en fin de stage de DEA** (INPG, LEG)
VE à source hybride batteries - supercondensateurs
- **Poursuivie en 1999 en thèse** (INPG, LEG, avec CEA, + ATER → 2003)
Hybridation du groupe électrogène à PAC pour l'alimentation d'un VE
Encadrement : E. Rullière, J-P. Yonnet
- **Puis à partir de 2003 : CR à l'INRETS LTN, localisé à Belfort**
Activités d'abord menées au sein du L2ES (LRE-T → 2004)
2006 : FC LAB labo commun (CEA - CNRS - INPL - INRETS - UFC - UTBM)
Depuis 2011 : CR à l'IFSTTAR LTN (EDSP = ED de référence)
2012 → FC LAB Research (FR CNRS) & Inéva FCellSYS (CEA - UTBM)
2012 → Rapprochement LTN - SATIE



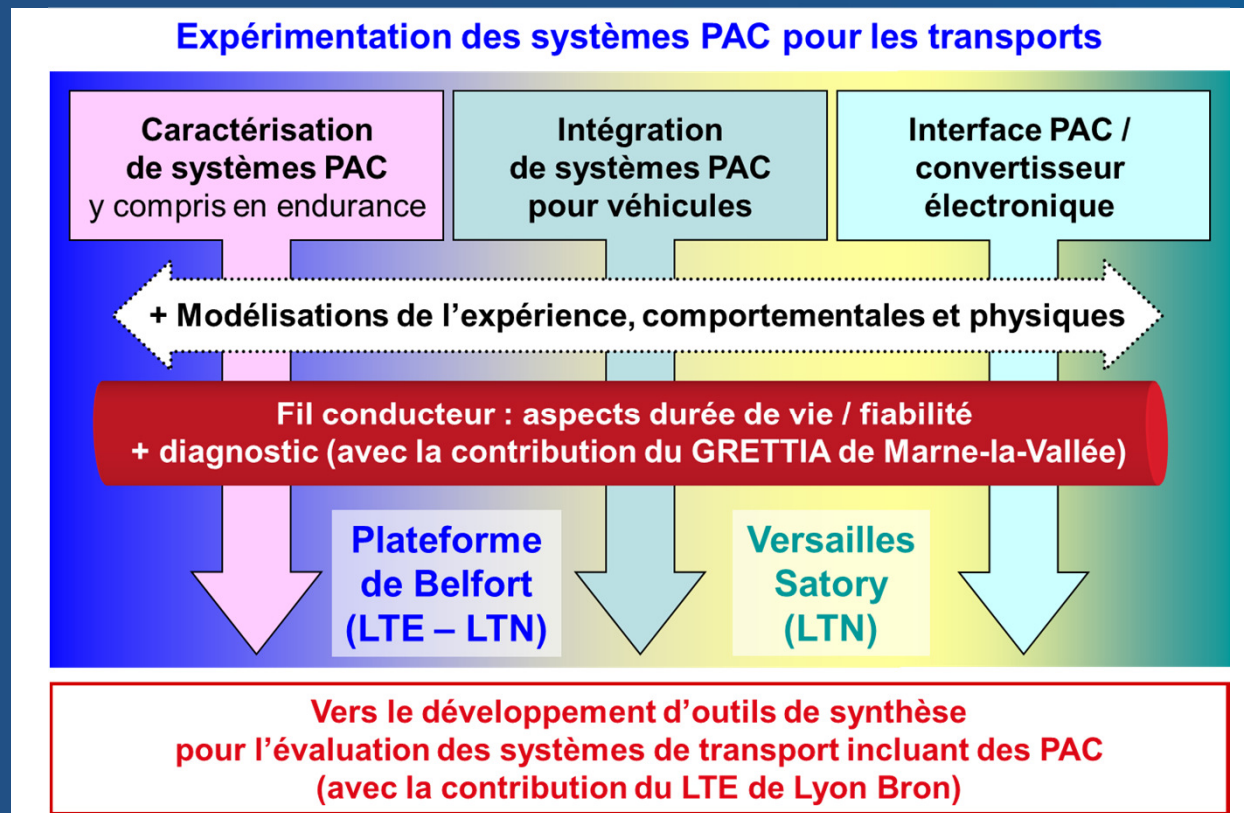
Démarche adoptée

Thématique de recherche :

Générateurs à PAC pour les applications transport

Recherche finalisée, orientée composant - brique / verrou techno.

→ Cadres INRETS / IFSTTAR et LTN (activités sur l'énergie et les VE)



→ 4 sites IFSTTAR en lien avec la thématique PAC



Démarche adoptée

Thématique de recherche :

Générateurs à PAC pour les applications transport

- Une recherche avec une forte composante expérimentale

justifiée par la nécessaire :

Caractérisation et analyse expérimentale des PAC

Expérimentation sous contraintes d'usage réel

Durée de vie, fiabilité, diagnostic

Intégration dans les systèmes de transport

→ Ces 4 points structureront la 2^{ème} partie de l'exposé.

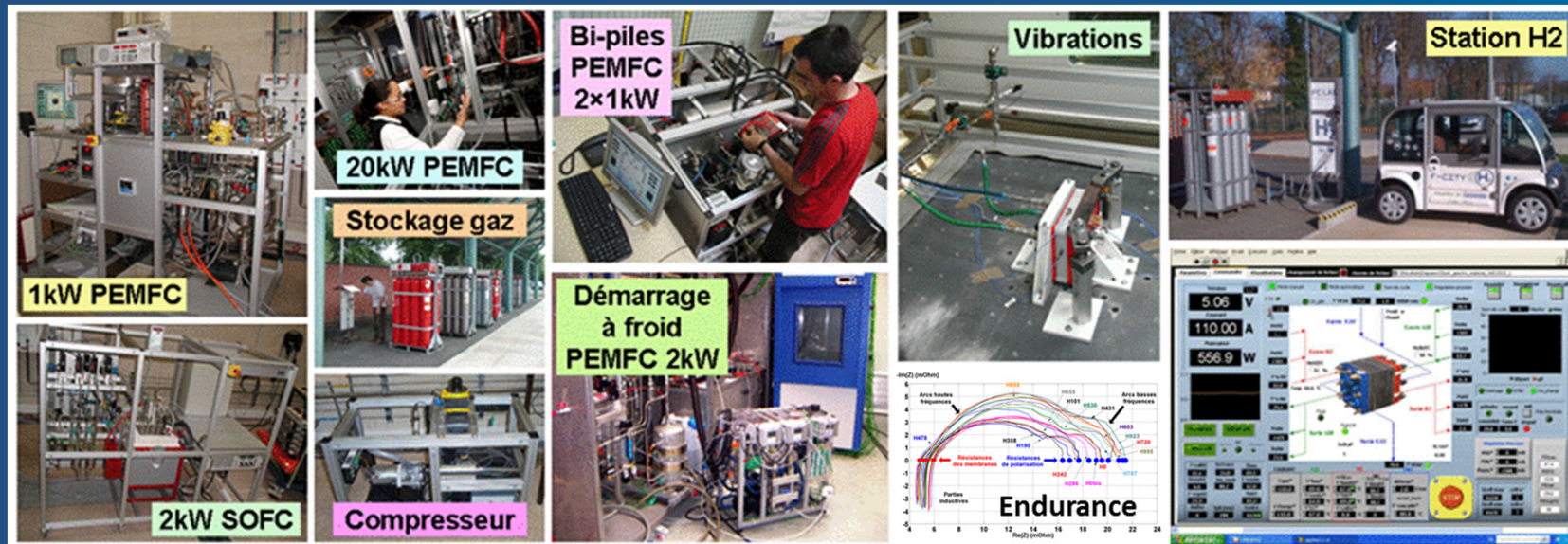


Démarche adoptée

Thématique de recherche :

Générateurs à PAC pour les applications transport

- Une recherche avec une forte composante expérimentale
→ avec une implication de l'IFSTTAR sur la plateforme de Belfort



motivée par le besoin :

- d'expérimenter des PAC aux puissances significatives,
- de dupliquer en labo. les conditions d'usage de l'environnement transport



Démarche adoptée

Thématique de recherche :

Générateurs à PAC pour les applications transport

- **Une recherche avec une forte composante expérimentale**
→ avec une implication de l'IFSTTAR sur la plateforme de Belfort
→ réalisée nécessairement dans un cadre contractuel (région FC, F, EU)
- **& des activités en termes de modélisation / simulation**
réalisées plus volontiers en partenariat avec des équipes universitaires
- **Une valorisation des travaux de recherche**
 - En particulier dans des revues scientifiques internationales (35) : Elsevier JPS, IJHE, ECM... Wiley FC IEEE TEC, VTT... ASME EPJAP
 - Chap. de livres (5), - Brevet (1), - Conf. int. & nat. - Rapports
- **Activités de relecture** (journaux et conf.) + **1 expertise ANR** (AAP JCJC)
- **Des activités de formation par & à la recherche**
 - Enseignements (INPG - UJF, UFC IUT et UFR STGI Belfort, UTBM)
 - Co-encadre^{ments} : doc. (4+1), post-doc. (1), DEA / M2R, PFE



Plan de la présentation

→ 1^{ère} partie : synthèse de l'activité de recherche

- CV, cadre de travail, démarche adoptée

→ 2^{ème} partie : plus de détails sur les travaux menés

- Restitution du contexte g^{al} recherches PAC & transports
- Qu'est-ce qu'un générateur à PAC ?
- **Caractérisation & analyse expérimentales de PAC**
 - Bancs d'essais, instruments & protocoles de mesure, plans d'expériences
- **Essais en conditions d'usage transport dupliquées en labo**
 - Profils de mission véhicule, essais climatiques et vibratoires
- **Aspects durée de vie, fiabilité, diagnostic**
 - Essais d'endurance, protocoles exp. spécifiques, traitement de l'info.
- **Intégration des PAC dans les Σ de transport**
 - Démonstrateurs, déploiements des techno. H₂, sûreté de fct^{ment}

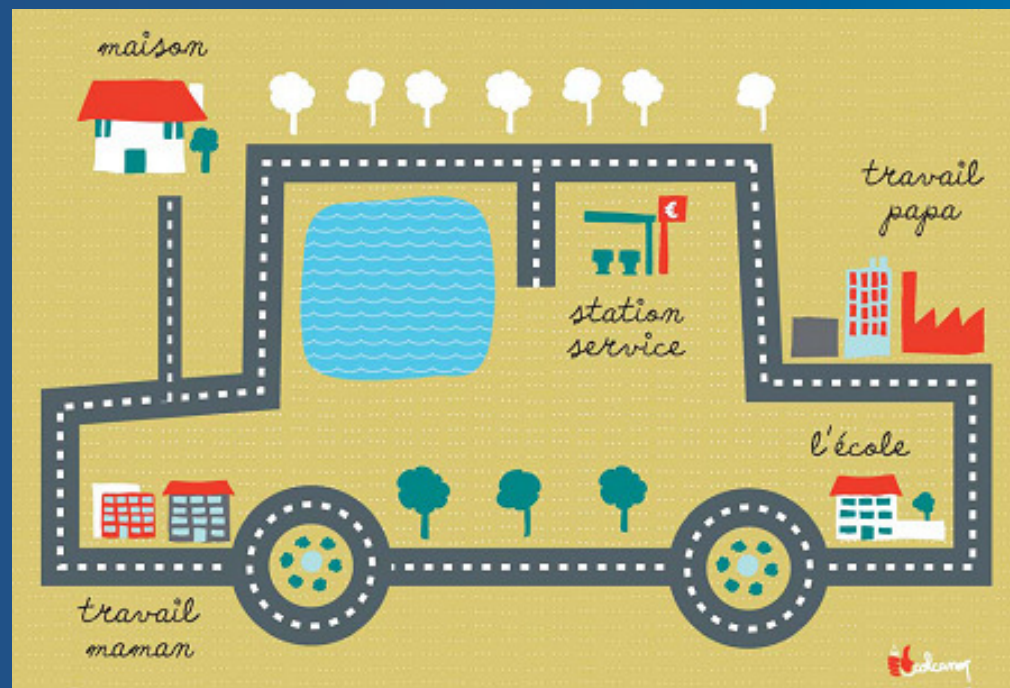
→ 3^{ème} partie : conclusions & perspectives



Contexte g^{al} recherches PAC & transports

- **Enjeux :**

- **environnementaux**
(véhicule propre / décarboné, réduction des GES, transition énergétique)
- **mais aussi politiques et économiques**
(indépendance & diversification énergétiques, préservation de l'emploi)



L'IFSTTAR doit apporter des réponses, notamment dans le champ de la technologie, en particulier par :



- l'évaluation du potentiel de développement des GE à PAC embarqués



- la contribution à des recherches sur ces Σ.



Contexte g^{al} recherches PAC & transports

- **MONDE. Leaders : Japon, Corée, RFA, USA, Canada.**

Nombreux démonstrateurs véhicules à PAC. Automobiles mais pas seulement :

→ Tous types de véhicules concernés, de la trottinette ... à l'avion de ligne

→ Vers le déploiement des techno PAC et H₂. Problématiques / à l'infrastructure H₂

Appli. la + emblématique :
Automobile. Ex : Hyundai,
Mercedes, Toyota, Honda

2012 : séries probatoires

Commercialisations de VP en 2015 ?

La promesse d'un véhicule électrique

- à l'autonomie de 400 - 700 km,
- dont on fait le « plein » en qqs min .



Top Fuel Cell Lift Truck Customers		
1	Sysco	700+ forklifts at 7 sites
2	Walmart	509 forklifts at 3 sites
3	P&G	340 forklifts at 4 sites
4	central grocers	234 forklifts at 1 site
5	BMW	230+ forklifts at 1 site
6	WinCo FOODS	200+ forklifts at 1 site
7	Kroger	161 forklifts at 1 site
8	LOWE'S	161 forklifts at 1 site
9	Wegmans	140+ forklifts at 1 site
10	Coca-Cola	96 forklifts at 2 sites

Chariots élévateurs

> 1100 unités en Amérique du N

Marché précurseur ?

Source : Fuel Cell 2000

Bus. Ex : projet CHIC

Ex : Car Postal à Brugg (CH)



APU. Ex : SFC (EFOY)

Caravaning, navigation de plaisance.

> 25000 produits vendus



Contexte g^{al} recherches PAC & transports

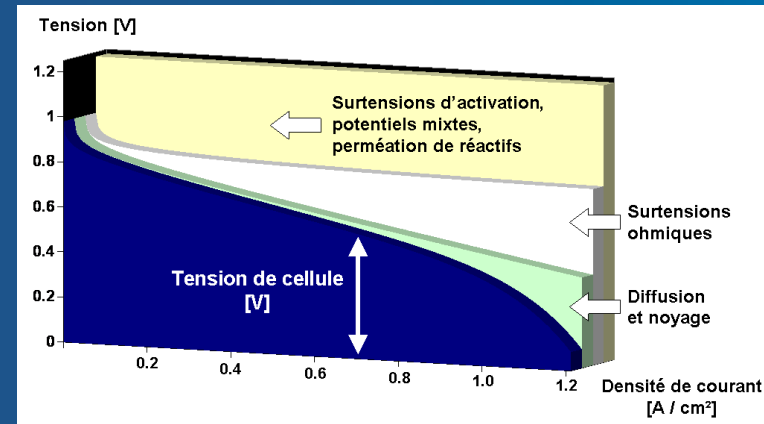
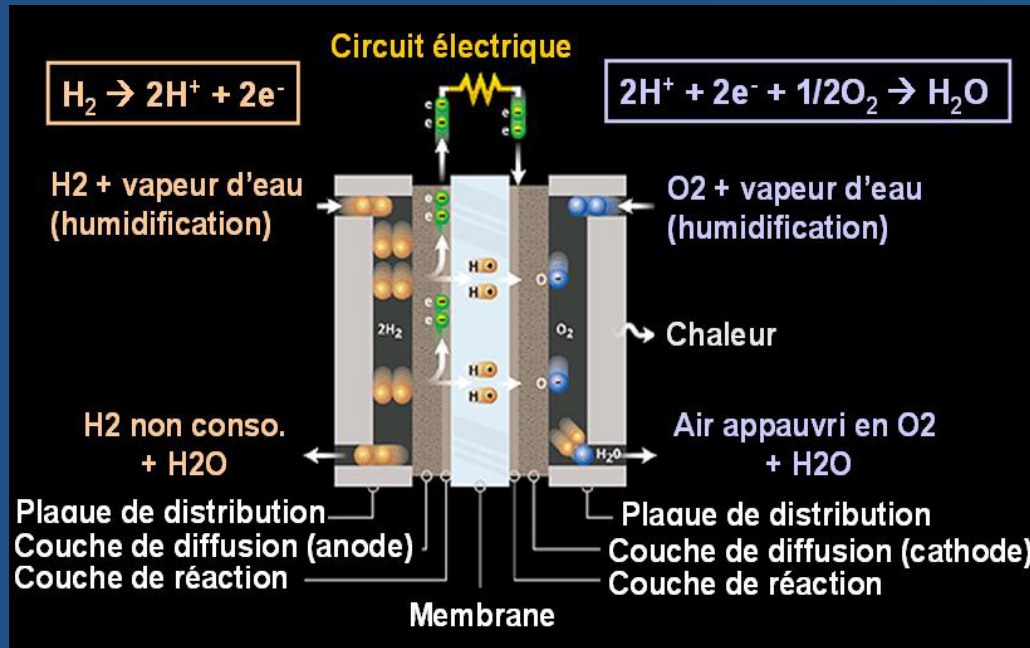
- **MONDE. Leaders : Japon, Corée, RFA, USA, Canada.**
Nombreux démonstrateurs véhicules à PAC. Automobiles mais pas seulement :
→ Tous types de véhicules concernés, de la trottinette ... à l'avion de ligne
→ Vers le déploiement des techno PAC et H₂. Problématiques / à l'infrastructure H₂
- **EU. Financements importants (PCRD), via la JTI FCH-JU**
- **FRANCE.** Fin AAP ANR dédiés PAC & H₂ : PAN'H & HPAC → PROGELEC
Le budget alloué est revenu à un niveau plus modeste
 - Depuis 2010, nouveau GDR PACS (PAC & Systèmes)
 - Mise en place de la plateforme nationale HyPaC → AFHYPACNouvel élan avec les AMI ADEME ? Vers + de démonstrateurs de recherche ?
 - Implications Régions (ex : FC & pôle VDF) sur la thématique H₂

∃ une filière industrielle française (→ des intégrateurs)
Air Liquide / Axane, CEA, PSA, Héliion, CETH, Michelin,
PRAGMA, Paxitech, MaHyTec ...



Qu'est-ce qu'un générateur à PAC ?

- Principe de fonctionnement d'une PAC de type PEM :
Comme une batterie. Principe ϕ de base simple ... en apparence !



La courbe de polarisation,
= image du η de tension cellule
→ Image très dépendante des
conditions opératoires (T, D, P ...)

- Complexité et problèmes liés à la gestion de l'eau, à l'hétérogénéité et à la particularité des matériaux
- Contrôle approprié de nombreuses grandeurs physiques pour utilisation optimale du stack (empilement de cellules)

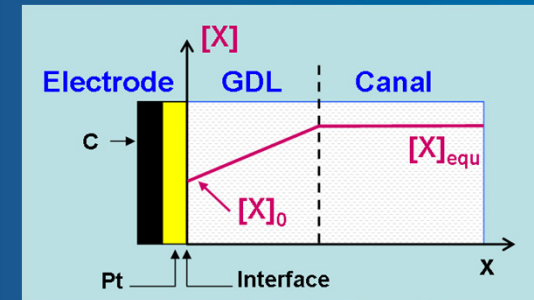


Qu'est-ce qu'un générateur à PAC ?

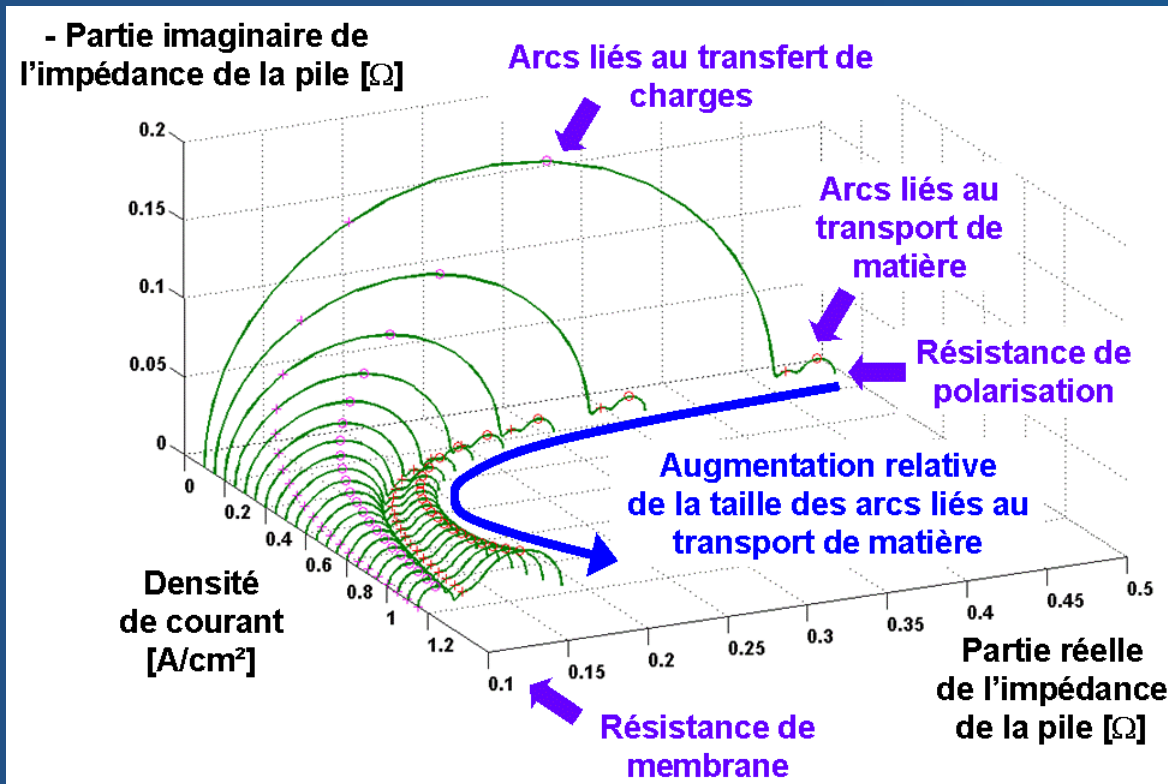
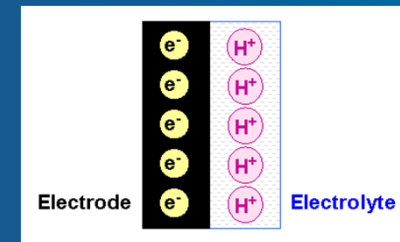
- Principe de fonctionnement d'une PAC de type PEM :

Des dynamiques électriques liées à différents phénomènes physiques :

- diffusions des gaz



- doubles couches



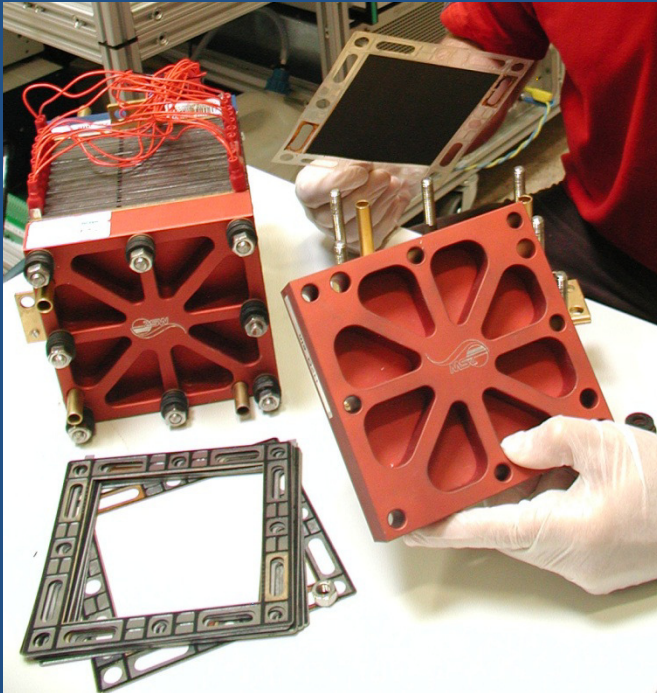
Ex. de simulation de spectres d'impédance (2002)



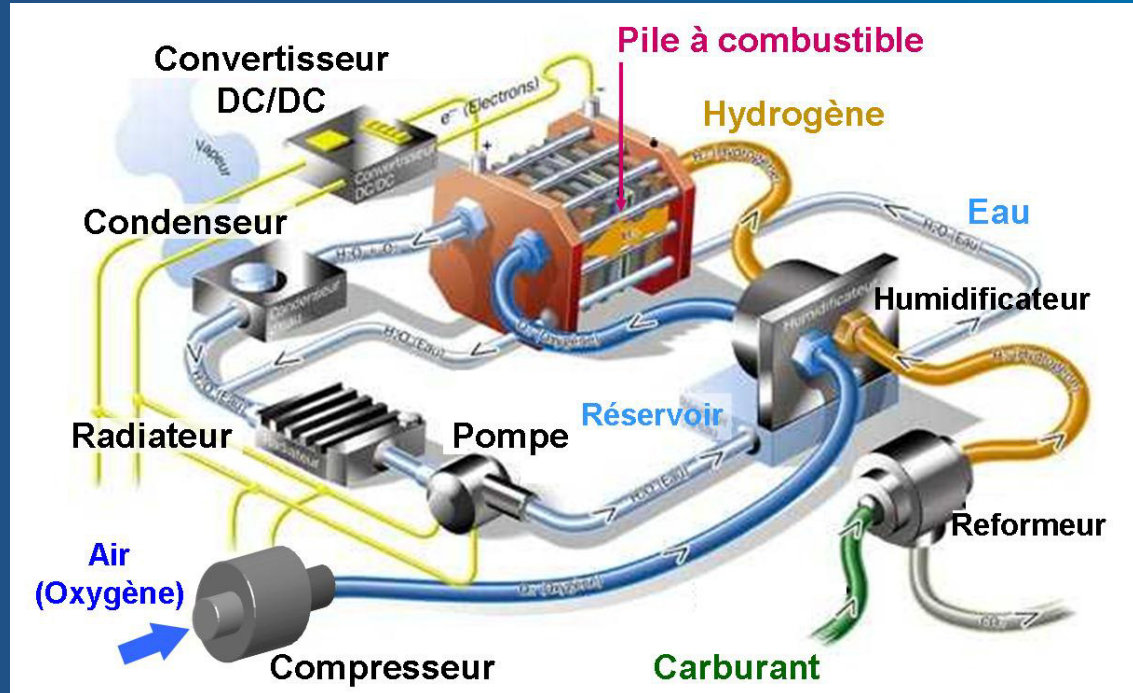
Qu'est-ce qu'un générateur à PAC ?

- Générateur PAC = pile + organes auxiliaires

PAC PEM (stack)



Générateur PAC

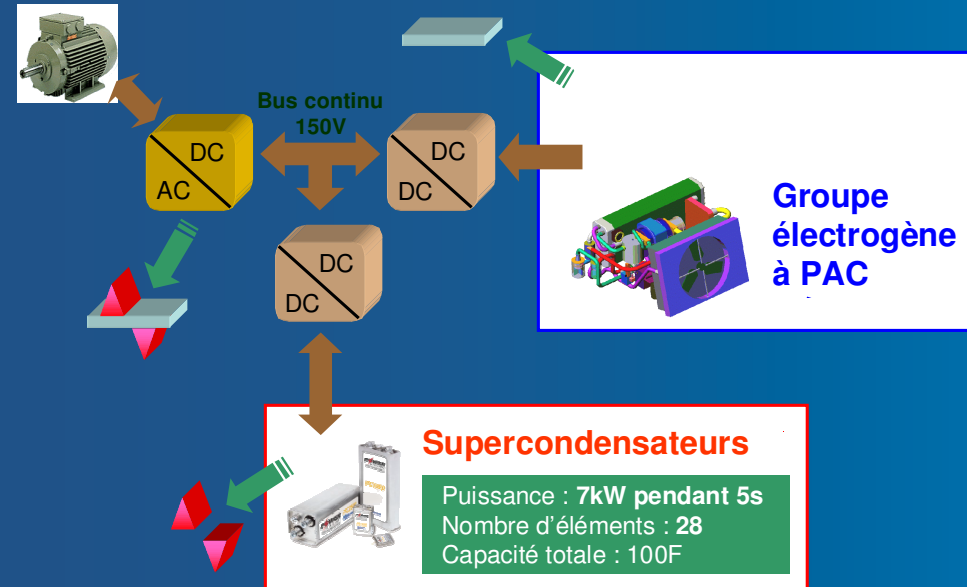
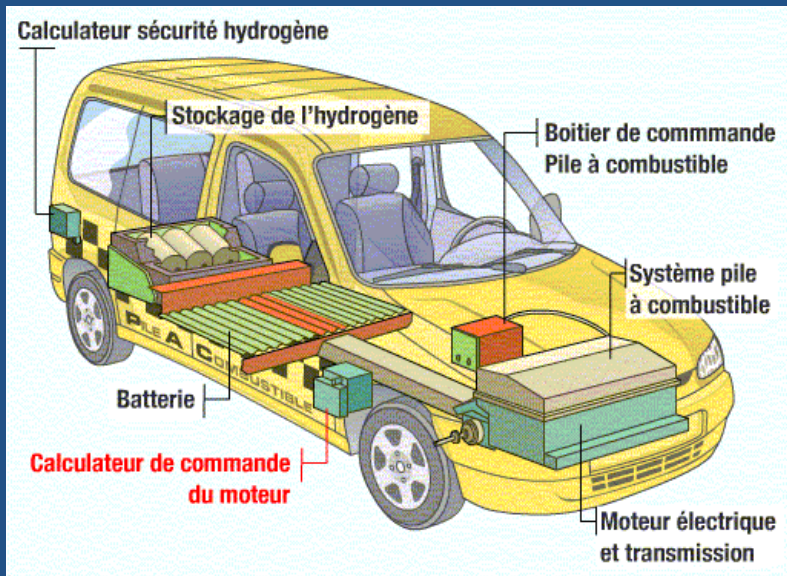


Nombreux échanges de matière, d'énergie, d'information.
Couplages forts entre les différents éléments. Relative complexité.
→ Travaux sur des systèmes multi-physiques, multi-échelles.
Sur les périphériques, la gestion des énergies et des fluides.



Qu'est-ce qu'un générateur à PAC ?

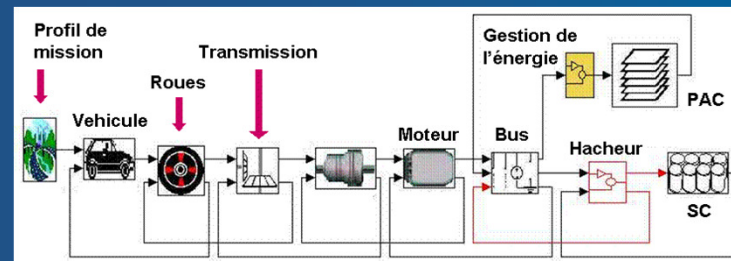
- Système PAC souvent hybridé par des batteries ou supercapacités



Nécessité d'établir une gestion de l'énergie entre le GMP et les sources pour minimiser certains critères comme la consommation d' H_2

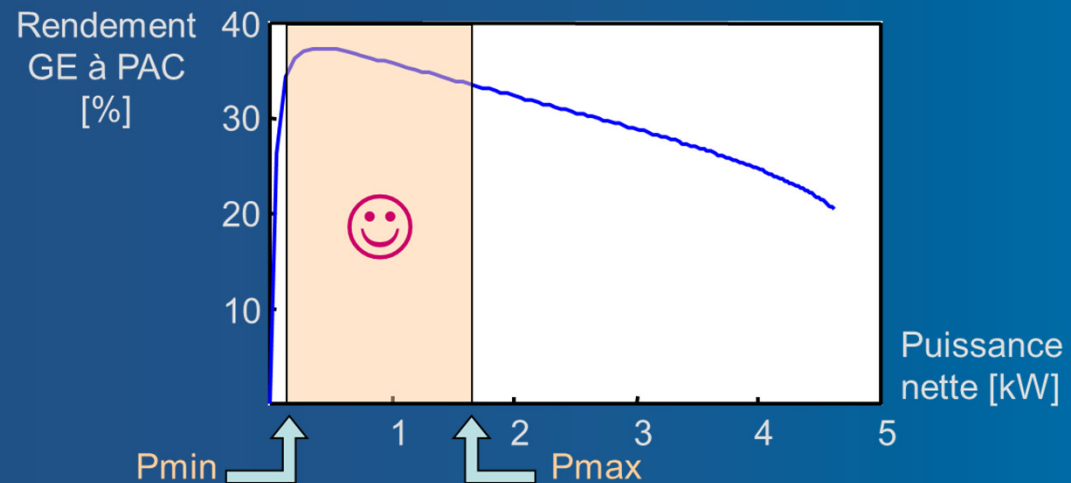
→ Thèse Candusso 2002

Travaux de modélisation & simulation de chaînes de traction de VE à PAC



Qu'est-ce qu'un générateur à PAC ?

- **Système PAC souvent hybridé par des batteries ou supercapacités**
 - ∃ ≠ stratégies de gestion de l'énergie. Une solution envisageable :
 - Faire fonctionner le + souvent possible le GE à PAC à charge partielle
 - Ajuster la puissance délivrée par le GE à PAC pour réguler l'état de charge des batteries / supercondensateurs à 75% par ex.



→ Thèse Candusso 2002.

- 2 gestions de l'énergie proposées
- Un démonstrateur Robot mobile CEA - LEG



Qu'est-ce qu'un générateur à PAC ?

- **Rappel des contraintes exercées par l'usage transport**

- Intégration : compacité, légèreté ($> 1 \text{ kW/l}$ et 1 kW/kg) → OK !

- Environnement climatique variable ($- 20^\circ\text{C}$, $+ 40^\circ\text{C}$)

 - Démarrages à froid.

 - Élévation de la T de fonctionnement ($> 120^\circ\text{C}$)

- Environnement vibratoire sévère

- Qualité de l'air ambiant (contaminants : CO , H_2S ...), de l' H_2 produit

 - Amélioration de l'immunité aux contaminants

- Durée de vie et fiabilité, sur cycles d'usage

 - Auto : $> 5000 \text{ h}$; 500 000 cycles traction-freinage

 - Bus : $> 30\,000 \text{ h}$; 1 million de cycles

 - Ferroviaire : $> 100\,000 \text{ h}$; 5 millions de cycles

- Sécurité et réglementation liée à l' H_2 . Acceptation par le public

- Production, distribution et stockage de l' H_2 (de masse)

→ **Triptyque perfo. - durée de vie / fiabilité - coûts**

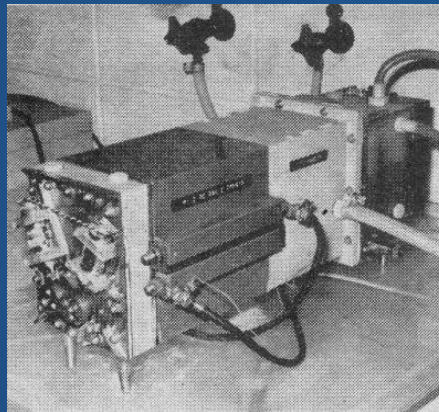
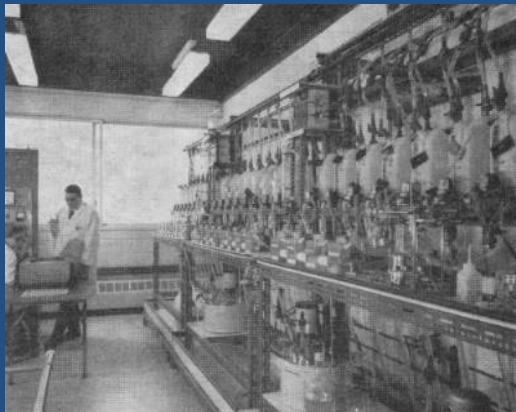
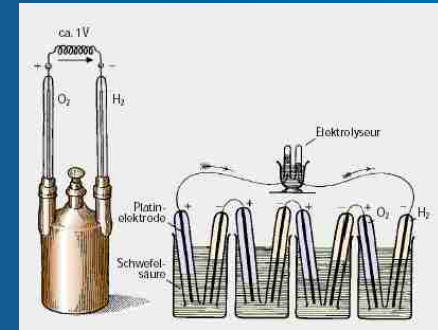


Qu'est-ce qu'un générateur à PAC ?

- **Historiques ... et progrès réalisés**

- 1838 - 1839 : C.F. Schönbein découvre l'effet PAC
- 1839 - 1845 : W.R. Grove réalise la 1^{ère} PAC
- Années 60 - 70 : Programmes Gemini, Apollo

En France, travaux de l'IFP, d'Alstom, de labos univ.



Laboratoire PAC
d'Alstom à Massy dans
les années 60

En 1978, puissance massique
des piles expérimentées par
l'IFP = 70 W/kg

- Années 80 et suivantes : Travaux des labos univ., du CEA
- Coûts des Σ PAC actuels (2009) \approx 5 - 10 k€/kW.
- 100 - 130 €/kW pour les Σ PAC automobile (100 000 unités/an) ?
- Durée de vie actuelle : 2000 - 3000 h ($\rightarrow \approx$ 100 000 km). Plus ?



Caractérisation de générateurs à PAC



Caractérisation et analyse expérimentale de PAC

Expérimentation sous contraintes d'usage réel

Durée de vie, fiabilité, diagnostic

Intégration dans les systèmes de transport



Caractérisation de générateurs à PAC

- **Contribution aux expérimentations & au développement des bancs**
Pb : la " chasse aux paramètres "
pour mieux comprendre et représenter le comportement des PAC

Modèles : - boîtes noires, empiriques
- semi-empiriques → boîtes grises,
- physiques, de connaissance (phénoménologie)

Difficultés :

- Complexité des modèles. Nombre élevé de paramètres physiques
- Grandeurs liées entre elles par des relations non linéaires,
- Couplages importants entre les phénomènes hydrauliques, thermiques et électrochimiques,
- Pb de standardisation : matériaux, métrologie, procédures de tests,
- Inhomogénéités à la fois dans les cellules de stack et vis-à-vis des composants / matériaux adoptés.



Caractérisation de générateurs à PAC

- Contribution aux expérimentations & au développement des bancs
Pb : la " chasse aux paramètres "
pour mieux comprendre et représenter le comportement des PAC

**Disposer des moyens d'essais et d'analyse
en vue de maîtriser la caractérisation
des composants et des Σ
pour générateurs PAC utilisés dans les transports**

**Maillon essentiel pour la détermination des performances Σ
dans un environnement transport
- PEMFC, - auxiliaires , - systèmes PAC**

Nécessaire maîtrise :

- de la conception des bancs d'essais
- de la conception et réalisation des essais (plans d'expériences)
- du traitement et de l'analyse des résultats d'essais

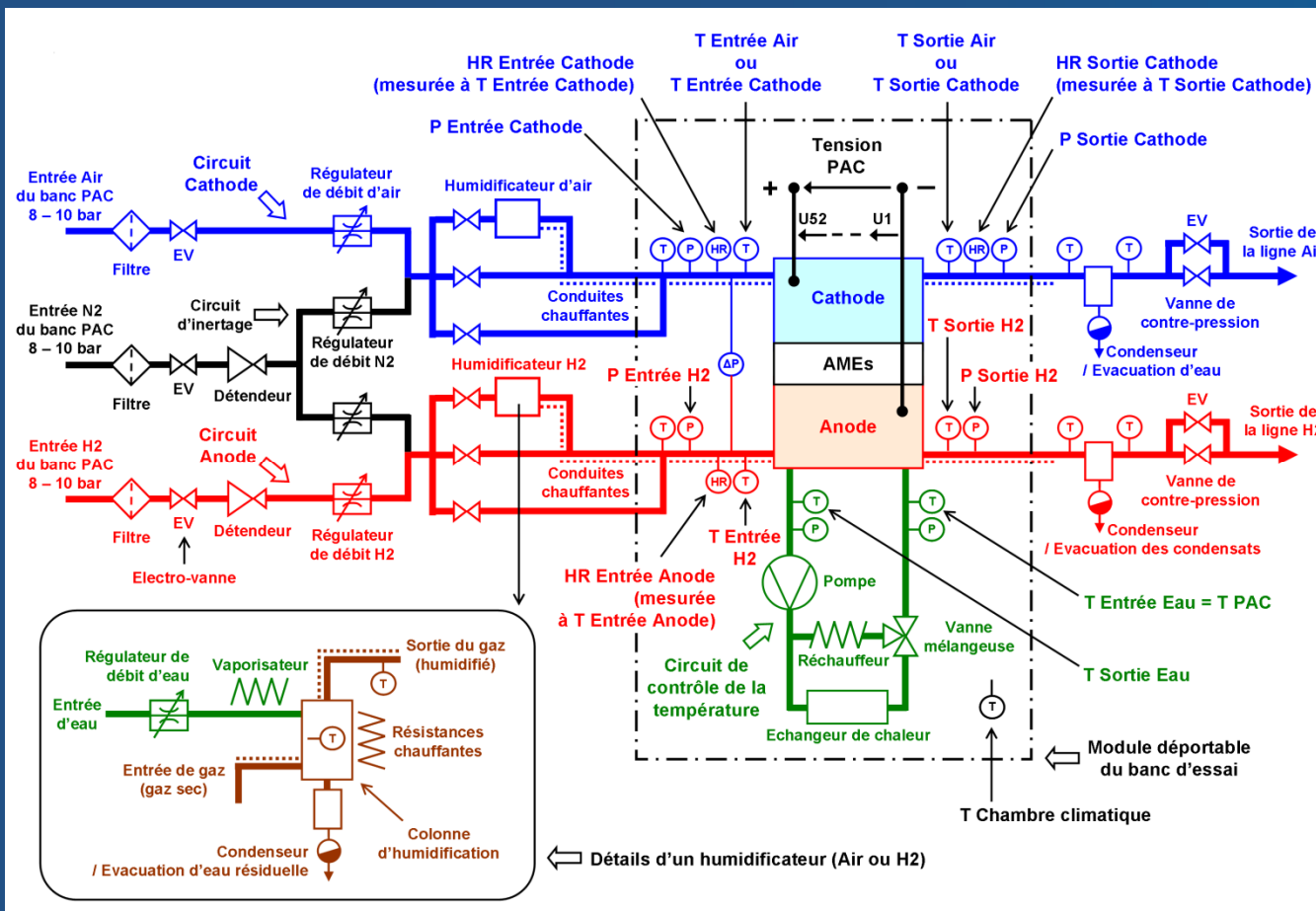
→ Occasionne des temps passés importants !



Caractérisation de générateurs à PAC

- Contribution aux expérimentations & au développement des bancs

Un ex. de banc d'essai (→ projet EU CELINA) ... très instrumenté.



Différentes sections :

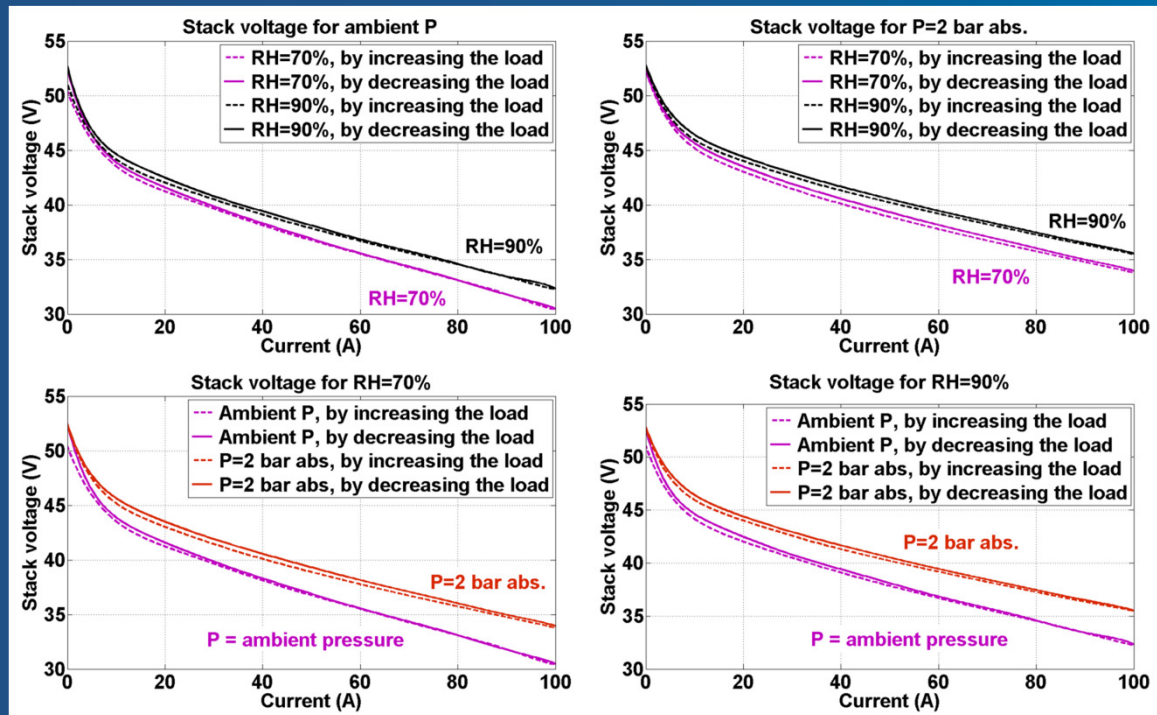
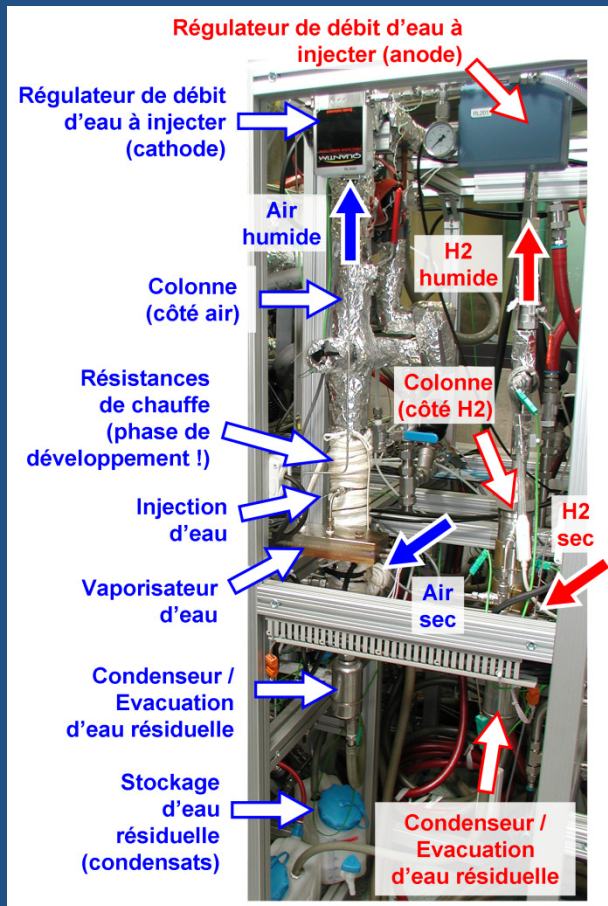
- Conditionnement des réactifs **Air & H2** (D, P, HR, T)
- Circuit d'inertage **N2**
- Contrôle de **T pile**
- Charge électrique
- Contrôle



Caractérisation de générateurs à PAC

- Contribution aux expérimentations & au développement des bancs

Un ex. de banc d'essai (→ projet EU CELINA) ... très instrumenté.



Impact de l'humidification, de la pression sur U pile (système à injection d'eau)

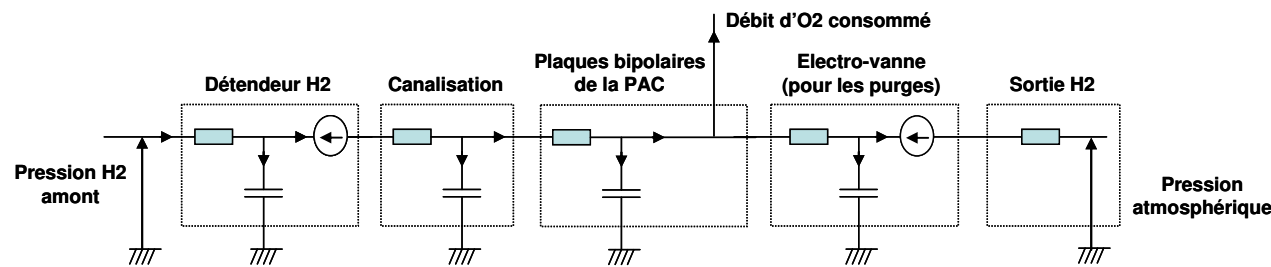


Caractérisation de générateurs à PAC

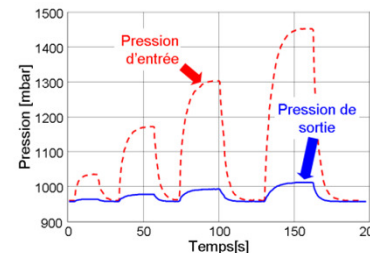
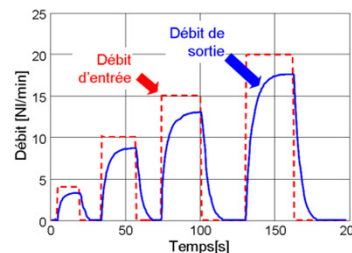
- **Contribution aux expérimentations & au développement des bancs**

La conception de bancs d'essais repose d'abord sur un savoir-faire en ingénierie. A Belfort : F. Harel, X. François, L. Girardot, S. Bégot, P. Lesage
Certains outils théoriques peuvent néanmoins être mis à contribution pour analyser voire améliorer les performances d'un banc, d'un Σ .

Ex. 1 : Examen de topologies fluidiques par des modélisations recourant à des analogies électrique - fluide



Un organe de la ligne air
= Un RC fluide



→ DEA UFC UTBM
Moussa CHNANI
2004

→ M2R UFC UTBM
Youssef BOUAYAD
2005

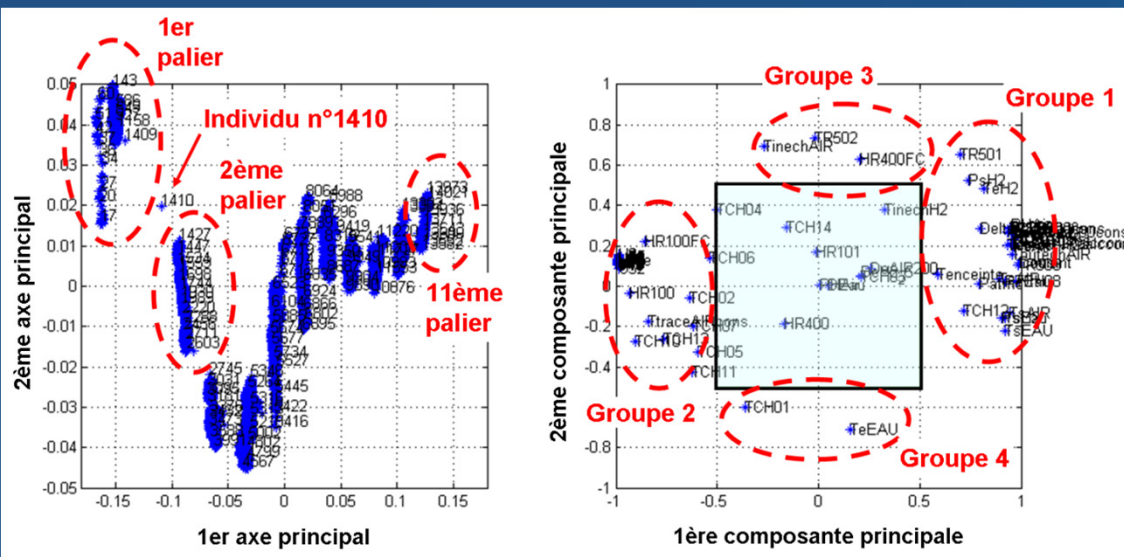


Caractérisation de générateurs à PAC

- **Contribution aux expérimentations & au développement des bancs**

La conception de bancs d'essais repose d'abord sur un savoir-faire en ingénierie. A Belfort : F. Harel, X. François, L. Girardot, S. Bégot, P. Lesage
Certains outils théoriques peuvent néanmoins être mis à contribution pour analyser voire améliorer les performances d'un banc.

Ex. 2 : Mise en œuvre d'Analyses en Composantes Principales (ACP) pour mettre en évidence l'effet de paramètres sur les performances de la PAC



→ Collaboration avec
L. PLACCA
Thèse CEA - UTBM

→ Possibles actions sur
le contrôle du banc,
la localisation
des capteurs.
But : ↗ robustesse



Caractérisation de générateurs à PAC

- **Développement d'instruments et protocoles de mesure**

Objectif : accéder à des paramètres physiques permettant de déterminer les performances, l'état de santé de PAC / générateurs PAC

- Si possible : techniques in-situ, non invasives.

Démarche : s'appropriier progressivement des techniques maîtrisées par les électrochimistes et les adapter à des PAC de puissance

- Si possible : mesures multi-cellules / sur les cellules au sein du stack

Techniques mise en œuvre à Belfort :

- Suivi de paramètres en ligne (I, U, D, P, T, HR ...)

- Courbes de polarisation

- Spectrométrie d'Impédance Electrochimique (SIE)

- Voltamétries linéaires et cycliques (VL et VC)

- Densités de courant locales (S++)



Caractérisation de générateurs à PAC

- Développement d'instruments et protocoles de mesure

- Ex. 1 : SIE sur stack et cellules au sein du stack

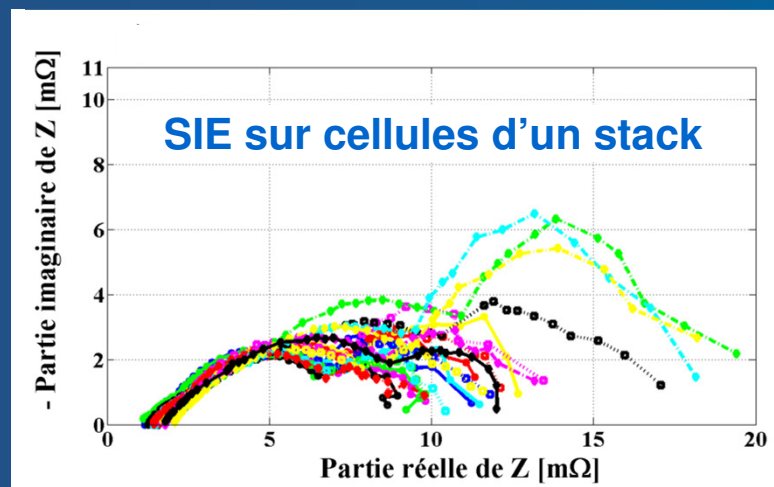
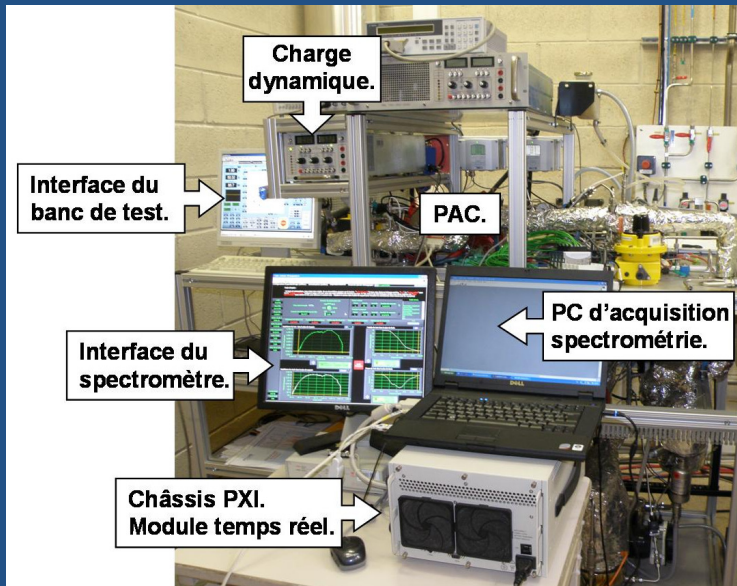
Besoin d'un instrument dédié stacks de puissance (450 A - 500 V)

→ Thèse S. WASTERLAIN
UFC - UTBM 2010

Mise en évidence comportements singuliers de cellules

Dispersion des spectres cellules liée à :

- l'état de santé ≠ des cellules
- la position des cellules dans le stack
- le design du stack

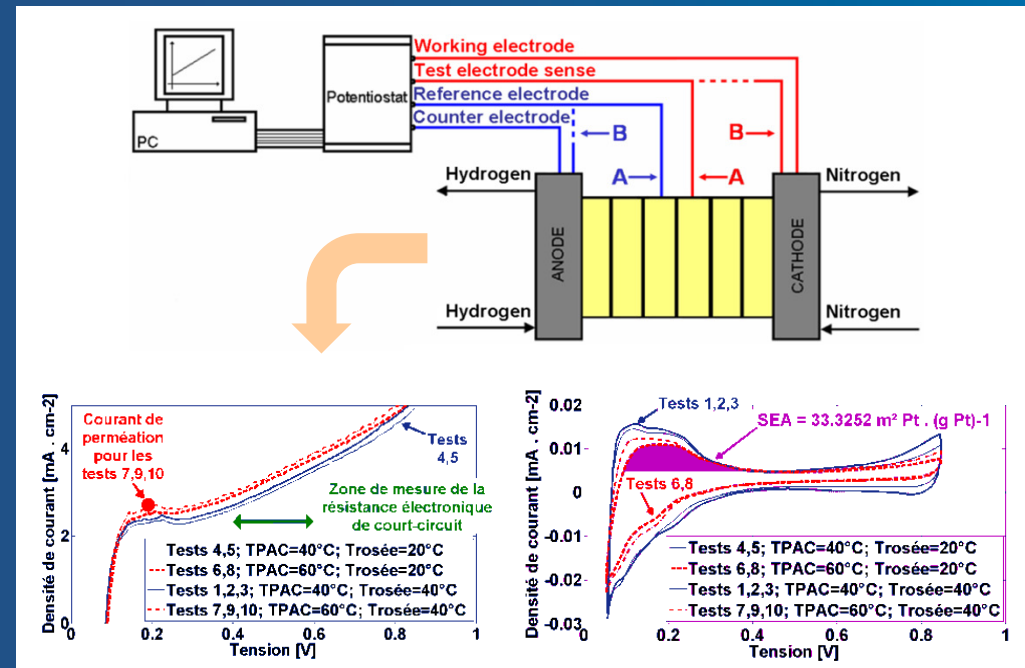


Caractérisation de générateurs à PAC

- Développement d'instruments et protocoles de mesure
 - Ex. 2 : Voltamétries sur stack et cellules au sein du stack

Principe :

- Utilisation d'un potentiostat
- Montage 4 électrodes
- Balayage en H_2 / N_2
1 NI/min pour cellule 100 cm^2
- Mode potentiostatique
- Contrôle linéaire de U, mesure de I
 $\approx 10 \text{ mV} < U < \approx 850 \text{ mV} / \text{cell.}$
- VBL (balayage linéaire)
 - $I_{\text{perméation}}$, R_{CC} électronique
 - 1 à 4 mV/s par cell.
- VC (cyclique)
 - surface active électrodes
 - 5 à 100 mV/s par cell. (10 mV/s)



→ Thèse
S. WASTERLAIN
UFC – UTBM
2010

→ Master 2 PIE
I. DIAW
ENS Cachan
2011



Caractérisation de générateurs à PAC

- **Conception et réalisation d'expériences → MPE**

Problématique : procédures d'essais à bien définir

- Complexité, disponibilité des moyens expérimentaux. Pb de la sécurité.
- Modélisation : paramètres nombreux et couplés, relations φ non-linéaires, Inhomogénéités dans les comportements de cellules

Objectifs de l'étude :

Mise en place d'outils permettant d'étudier, de caractériser et d'optimiser le fonctionnement de PAC de manière rationnelle.

→ Méthode des Plans d'Expérience (MPE) :

Un PE = une organisation raisonnée d'essais (ISO 3534-3).

N'étudier que certains points du domaine expérimental tout en réussissant à appréhender le phénomène sur l'ensemble du domaine considéré.



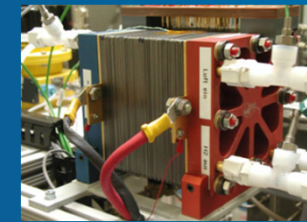
Caractérisation de générateurs à PAC

- Conception et réalisation d'expériences → MPE

Ex. de plan pour étudier l'influence des débits et pressions sur la puissance max. délivrée par une PAC.

→ Plan complet $2^4 = 16$ essais → Plan fractionnaire 8 essais par ex.

Test Nr.	PH ₂ -1 : 1.3 bar abs. +1 : 1.4 bar abs.	Pair -1 : 1.3 bar abs. +1 : 1.4 bar abs.	FH ₂ -1 : 5.5 NI/min +1 : 8.5 NI/min	Fair -1 : 26.3 NI/min +1 : 39.6 NI/min	PH ₂ * Pair * FH ₂ * Fair
1	-1	-1	-1	-1	+1
2	+1	-1	-1	-1	-1
3	-1	+1	-1	-1	-1
4	+1	+1	-1	-1	+1
5	-1	-1	+1	-1	-1
6	+1	-1	+1	-1	+1
7	-1	+1	+1	-1	+1
8	+1	+1	+1	-1	-1
9	-1	-1	-1	+1	-1
10	+1	-1	-1	+1	+1
11	-1	+1	-1	+1	+1
12	+1	+1	-1	+1	-1
13	-1	-1	+1	+1	+1
14	+1	-1	+1	+1	-1
15	-1	+1	+1	+1	-1
16	+1	+1	+1	+1	+1



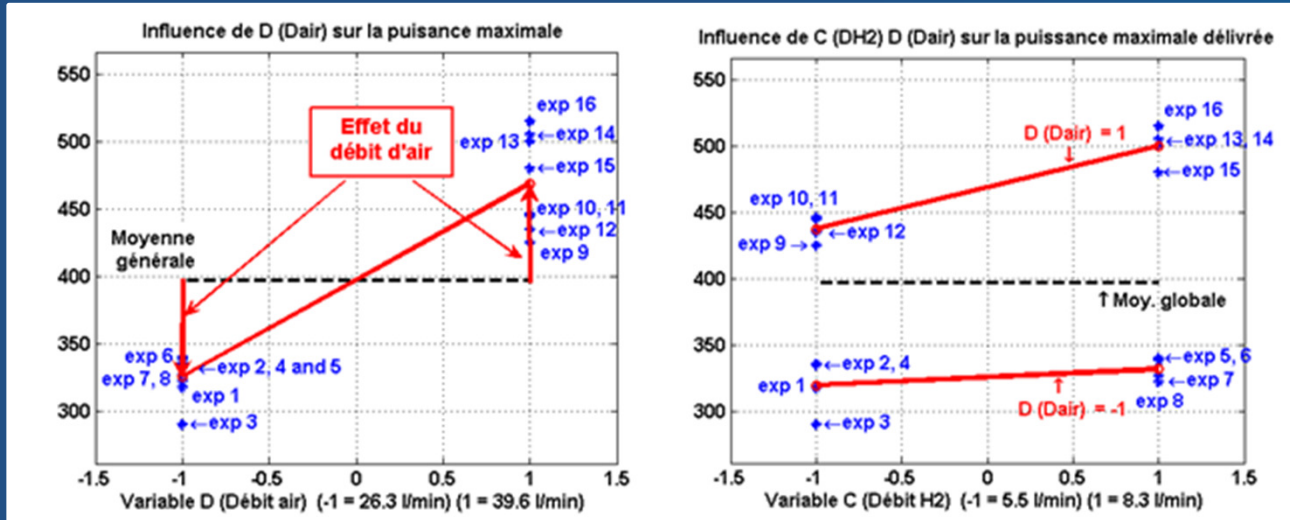
Tests sur banc
1 kW à Belfort

→ Thèse
B. WAHDAME
UFC - UTBM
2006



Caractérisation de générateurs à PAC

- Conception et réalisation d'expériences → MPE



Graphes des effets et des interactions

Ex. d'outils liés à la MPE

Source	Sum Sq.	%	d. f.	Mean Sq.	fs	p-value
PH2	247.5	0.52	1	247.5	0.48	0.538
Pair	52.5	0.11	1	52.5	0.1	0.770
FH2	2397.8	5	1	2397.8	4.64	0.120
Fair	42997.8	91	1	42997.8	83.26	0.003

ANOVA

→ Thèse
B. WAHDAME
UFC - UTBM
2006

$$\hat{P}_{\text{elec max}} = 397.28 + [-6.84 \quad 6.84][\text{PH2}] + [3.531 \quad -3.531][\text{Pair}] + [-18.6 \quad 18.6][\text{DH2}] + [-71.6 \quad 71.6][\text{Dair}] + [\text{DH2}]^t \begin{bmatrix} 11.545 & -13.53 \\ -11.545 & 13.53 \end{bmatrix} [\text{Dair}]$$

Modèles matriciels



Caractérisation de générateurs à PAC

- Conception et réalisation d'expériences → MPE

Applications de la MPE	Plans, techniques et outils
1^{ère} caractérisation de PAC (matériaux, composant, cellule, stack, système). Détermination des effets des paramètres et interactions possibles. Analyse statistique, de sensibilité.	Plan de criblage (de préférence : plan fractionnaire avec qq essais en + pour éviter le plan complet).
	Graphes des effets, interactions.
	ANOVAs, « Normal plots ».
Caractérisation de PAC avec focus sur un nbre restreint de paramètres. Modélisation stat, comportementale.	Méthode des Surfaces de Réponse (MSR). Modèles MSR.
	Modélisation combinant PE - RNN
Vérifier la reproductibilité, la qualité des essais.	Plans avec répétitions. Plans produits. Plans croisés.
	Rapports Signal-Bruit (SNR).
Qualité et robustesse. Variabilité des perfo. au cours du vieillissement. Diagnostic.	Plans croisés. Surfaces de réponse duale (DRS).

Typologie de la MPE appliquée aux PAC
 → Thèse B. WAHDAME UFC - UTBM 2006

→ A étudier / vieillissement : plans anti-dérive, « blocking », ...

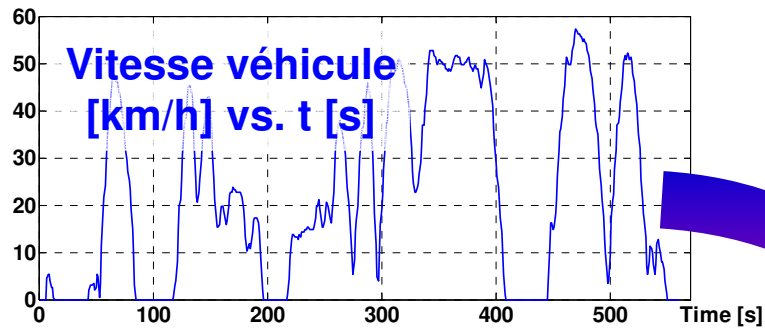


Essais en conditions d'usage transport



Essais en conditions d'usage transport

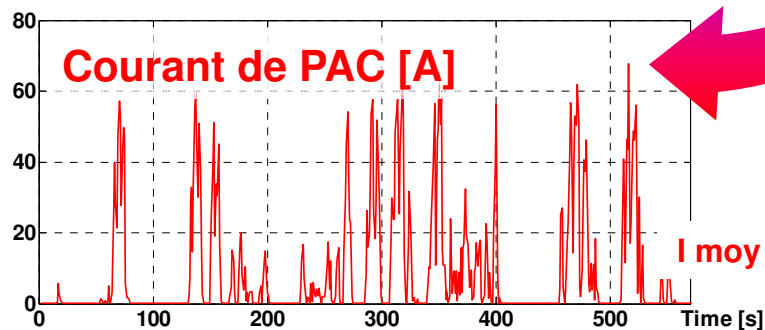
- Profils de mission véhicule (temps - vitesse → cycles temps - courant)



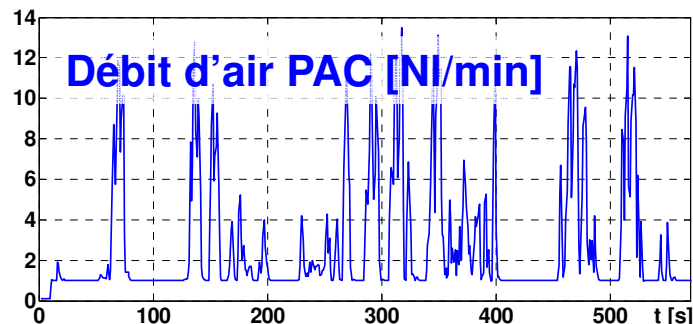
**Accélérations,
freinage**



**VEHLIB
logiciel
IFSTTAR
LTE**



**Dynamiques
de courant**



**Ex: gestion
des fluides
à prévoir**

**Gestions
des énergies,
des réactifs
(D, P, HR...)
en dynamique !**

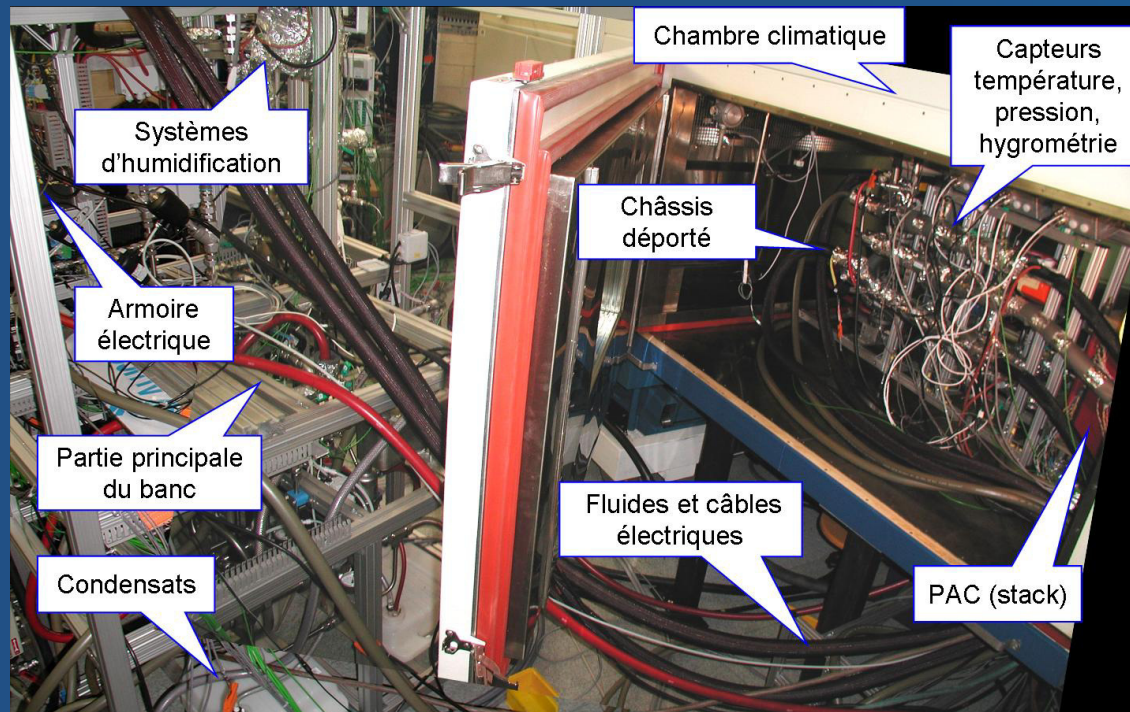
**Profils suivis ?
Consos ?
Impact / fiabilité ?**

**→ Pb de choix
d'architectures,
de techno. de
composants
systèmes**



Essais en conditions d'usage transport

- **Essais climatiques (projet EU CELINA 2005 - 2009)**
Objectif : évaluation du comportement d'une PEMFC en ambiance froide en vue d'applications aéronautiques.
→ **Problème du gel de l'eau dans la PAC et/ou dans le système -**
Moyens d'essais complexes. Procédures de séchage, de ré-humidification.



Essais climatiques CELINA.

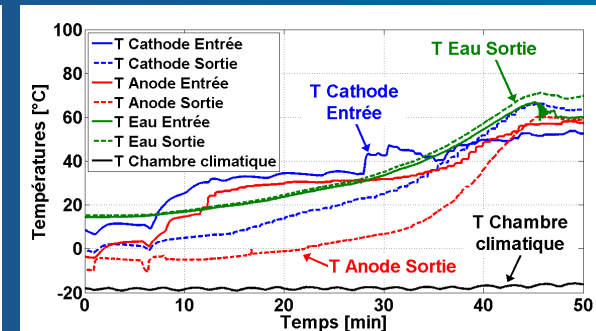
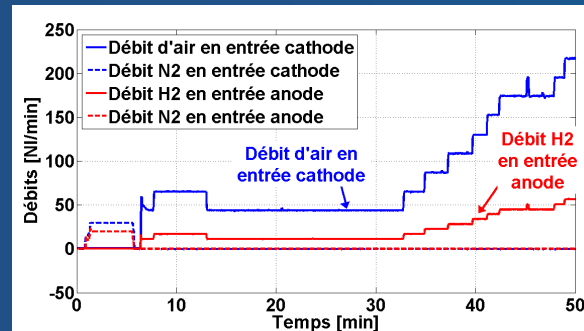
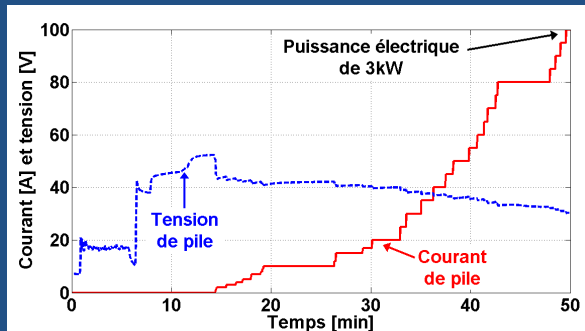
Le banc principal est situé sur la gauche de la photographie.

Le châssis déporté supportant la pile est placé dans l'enceinte (nov. 2006)



Essais en conditions d'usage transport

- Essais climatiques (projet EU CELINA 2005 - 2009)
Différents scénarios d'usage examinés [Bégot ECM 2010] :
 - Démarrage à $T_{\text{ambiante}}=20^{\circ}\text{C}$ → PAC progressivement placée dans le froid
 - Stockage à $T_{\text{ambiante}}<0^{\circ}\text{C}$, chauffage externe → 15°C , démarrage (Fig)
 - Démarrage à froid (qqs tests)

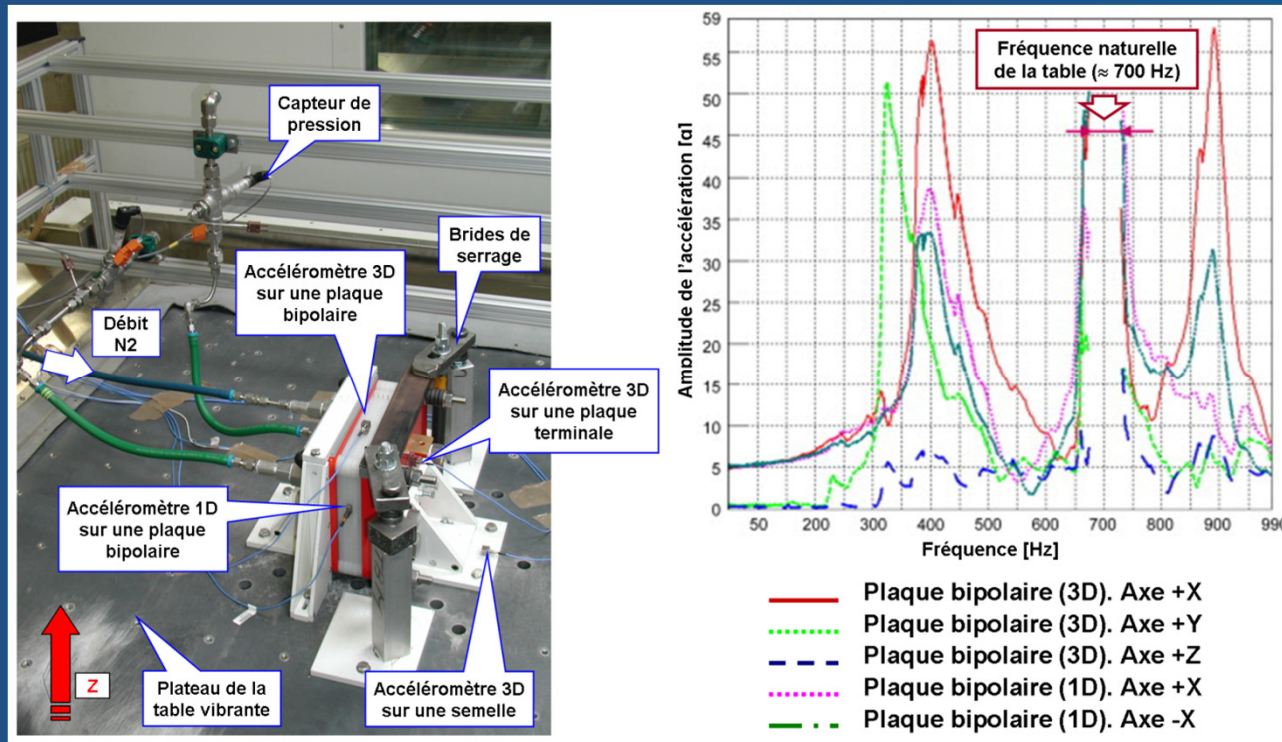


- Vers une meilleure compréhension des ϕ [Harel EPJAP 2011]
Etude de la gestion de l'eau dans la PEMFC lors des démarrages à froid.
 - Incidences du niveau de courant initial, du design et des matériaux, des procédures de conditionnement... Fiabilité / durée de vie ?
 - Intérêt des techniques de caractérisation (SIE, CV, LSV). Visu ?



Essais en conditions d'usage transport

- Essais vibratoires (projet EU CELINA 2005 - 2009) avec UTBM M3M
Objectif : caractérisation mécanique d'une PEMFC
→ Incidence des vibrations sur la PAC (hors fonctionnement)



PAC & table vibrante.

Ex de spectre
fréquence -
accélération
(solicitation sinus)

→ Comportement
mécanique non rigide,
de type multi-corps,
3D et non linéaire.

- Modélisation du comportement méca. par RN [Rouss IJHE 2008]
- Futures études avec couplage ϕ mécaniques - électriques ?



Durée de vie, fiabilité, diagnostic

Caractérisation et analyse expérimentale de PAC

Expérimentation sous contraintes d'usage réel



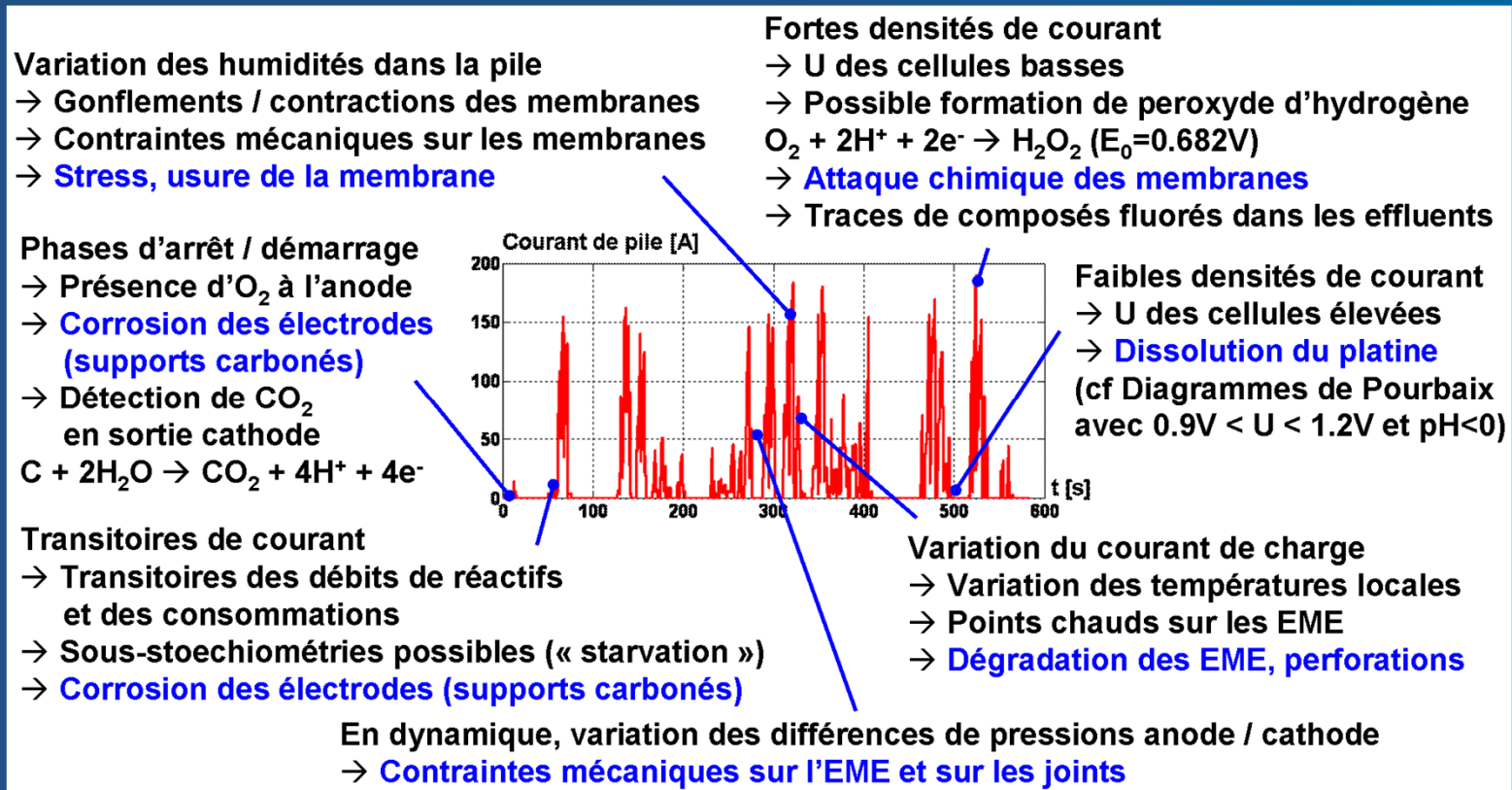
Durée de vie, fiabilité, diagnostic

Intégration dans les systèmes de transport



Durée de vie, fiabilité, diagnostic

Mécanismes ϕ de dégradation, modes de défaillance PAC PEM



Ex. de dégradations possibles dans une PAC PEM soumise à un cycle de courant issu d'un profil de mission transport.

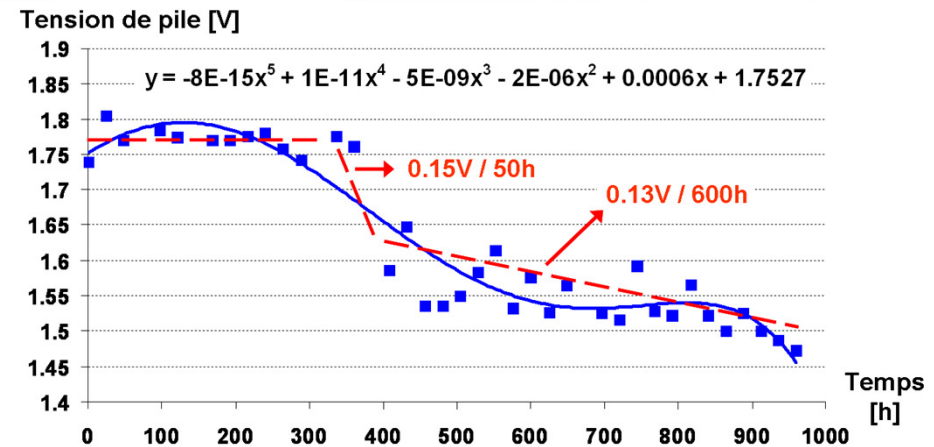
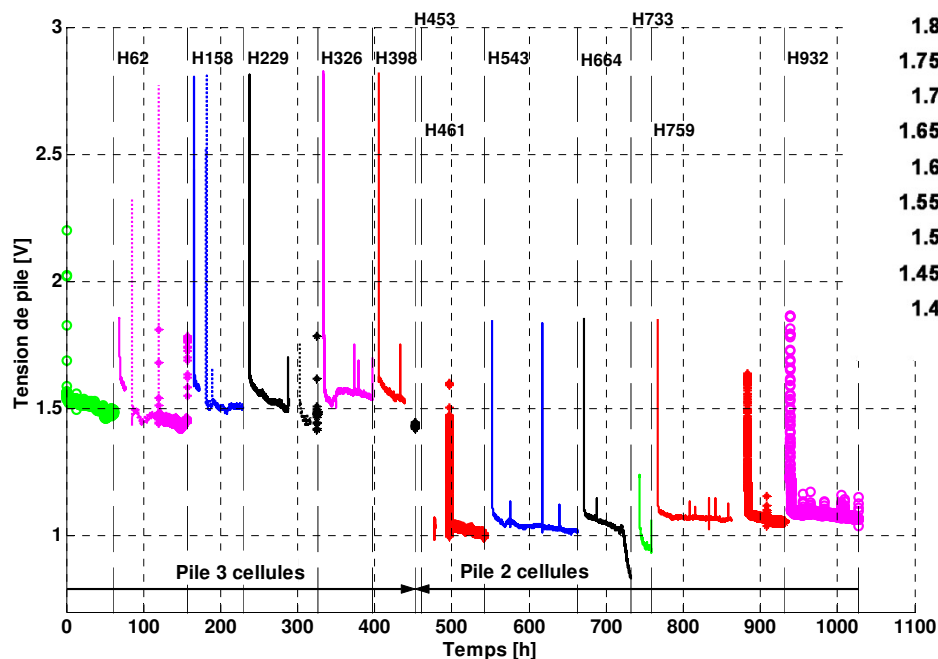
+ Dégradations, défauts liés au système et aux organes auxiliaires !



Durée de vie, fiabilité, diagnostic

- Tests 1000 h : sur 3 & 5 cellules PEM, projets DRIRE FC, SPACT80
 - Essai aux conditions nominales (PAC ZSW-UBZM et Hélion)
 - Essai sous sollicitations dynamiques profils de mission transport
 - Essai avec une température de pile $> T_{\text{nominale}}$
 - Essai avec composante alternative HF (5 kHz)

→ Projet DRIRE FC 2004



Ex. d'évolutions de tensions de pile (3 cellules) au cours des 1000 h

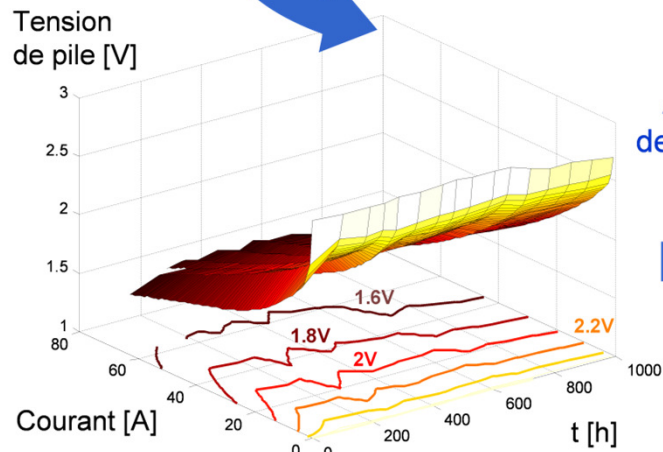
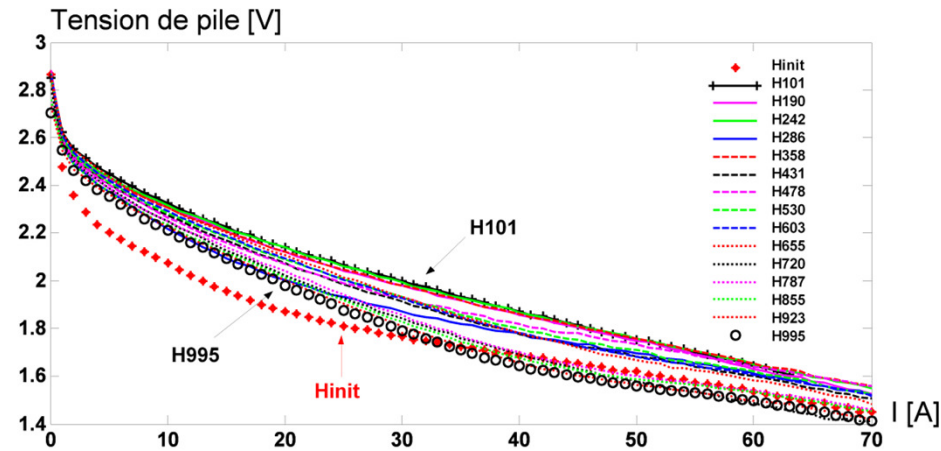


Durée de vie, fiabilité, diagnostic

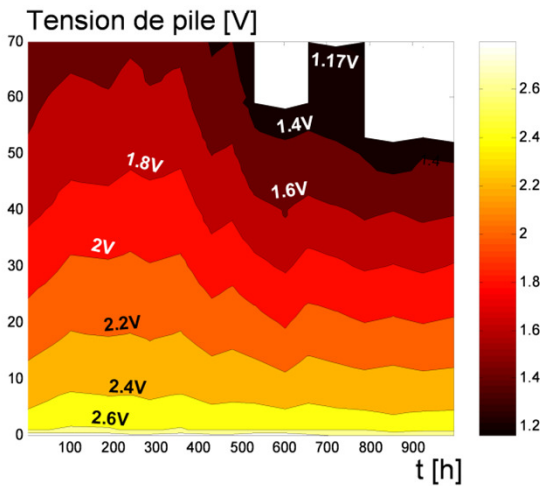
- Tests 1000 h : caractérisations régulières au cours du vieillissement

Caractérisations par courbes de polarisation au cours de l'essai d'endurance

Affichage de l'évolution des performances sous formes de nappes 3D et 2D



Affichage des lignes de niveaux



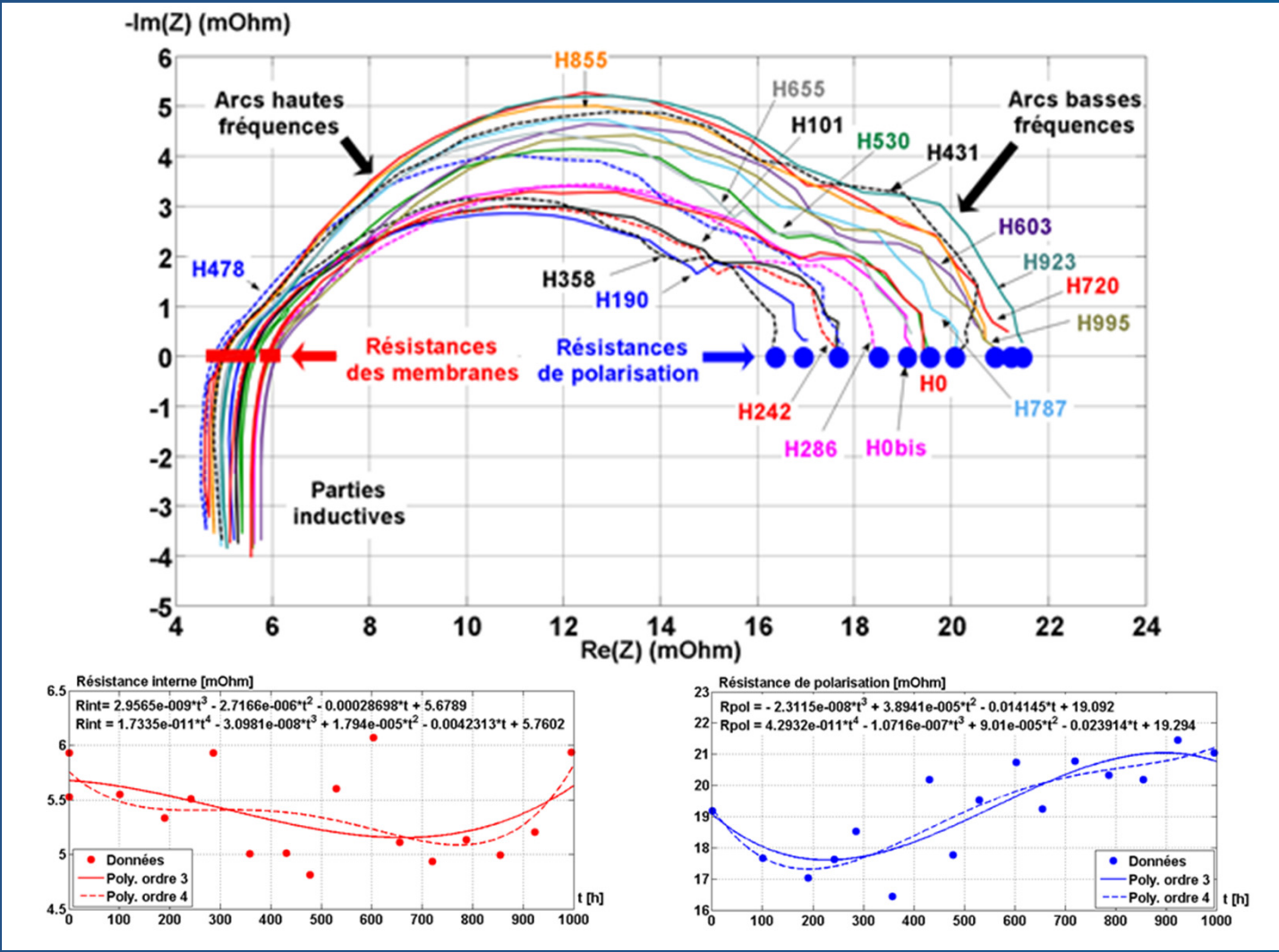
→ Etudes par la MPE (Surfaces de réponse)

2004



Durée de vie, fiabilité, diagnostic

- Tests 1000 h : caractérisations régulières au cours du vieillissement



Ex. de SIE et suivis de points particuliers dans le plan de Nyquist



Durée de vie, fiabilité, diagnostic

- **Des stratégies de diagnostic pour :**
 - **un gain de sécurité** en détectant des anomalies afin d'éviter les incidents,
 - **un gain de productivité** en réduisant le temps d'indisponibilité et en limitant les arrêts inutiles et les maintenances → Baisser le coût d'exploitation,
 - **une augmentation de la durée de vie**, par l'accroissement de la fiabilité.

De l'examen de la situation à l'établissement d'une conclusion,
≠ phases distinctes dans l'action du diagnostic :

- l'instrumentation, la mesure et la collecte de données expérimentales,
- la détection de la présence éventuelle d'un ou de plusieurs défaut(s),
 - puis l'identification de la cause du ou des dysfonctionnement(s)
(classification des types de défauts),
- la localisation des problèmes.

La définition de méthodes de diagnostic doivent déboucher à terme :

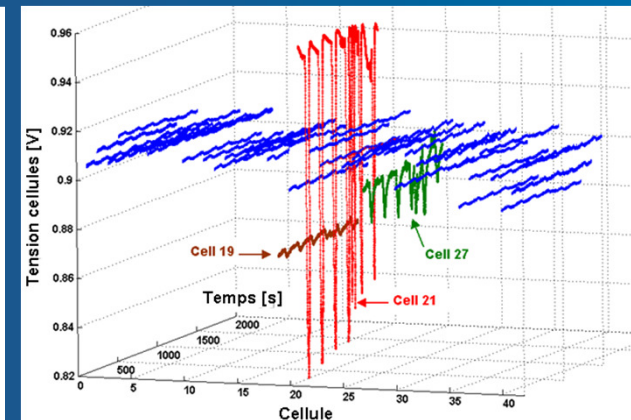
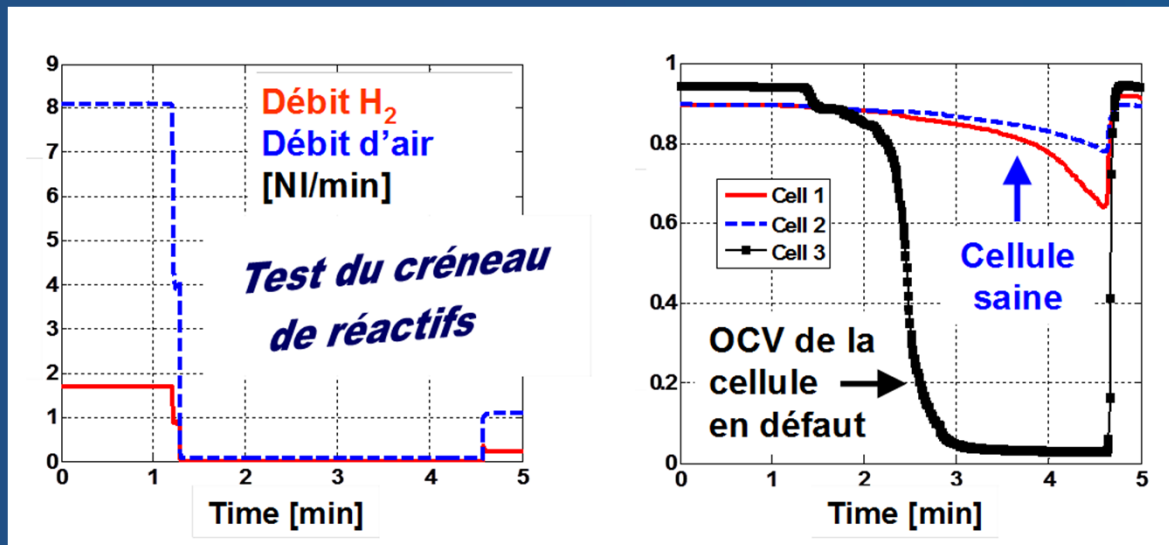
- sur des estimations de durée vie résiduelle
- Thèse UFC - IFSTTAR, R. ONANENA, 2012
- sur des procédures de maintenance préventive / prédictive,
 - des actions de correction automatiques.



Durée de vie, fiabilité, diagnostic

- Développement de protocoles de mesure spécifiques pour le diag
 - Suivi de paramètres en ligne. Ex : Procédure de diagnostic de cellules défaillantes par surveillance des tensions à vide (OCV) à l'abandon

Débits de réactifs H₂ / air arrêtés promptement. → Chute rapide de U cellule défaillante.
Volumes tampons d'H₂ consommés + rapidement dans la cellule en défaut
→ Perméation / fuite de réactif entre anode et cathode.



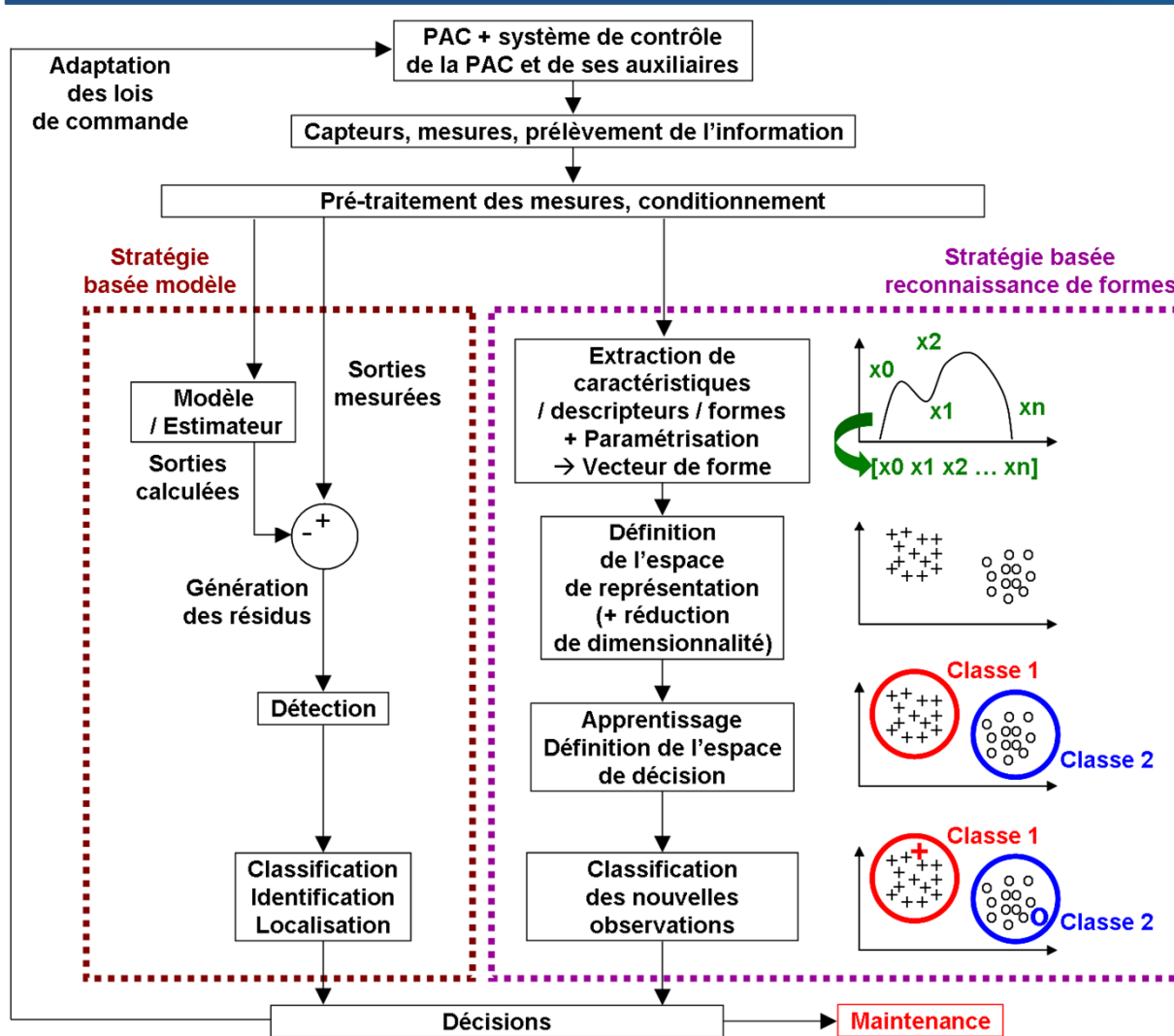
Autre méthode :
signature /
oscillations de
pression



- Post-doc UFC - UTBM, G. TIAN 2005 (expériences)
- Master 2 PROTEE, I. ENDICHI 2007 (modélisation)

Durée de vie, fiabilité, diagnostic

- Diagnostic. Différentes approches / méthodes globales.



- Redondance analytique
 → Thèse UFC
 N. STEINER 2009
 Ex : détections noyages, assèchements par mdl RN

- Reconnaissance de forme
 → Thèse UFC - UTBM
 S. WASTERLAIN 2010
 → Thèse UFC
 N. STEINER 2009
 → Thèse UFC - IFSTTAR
 R. ONANENA 2012



Durée de vie, fiabilité, diagnostic

- **Du diag. à la continuité de fonctionnement**

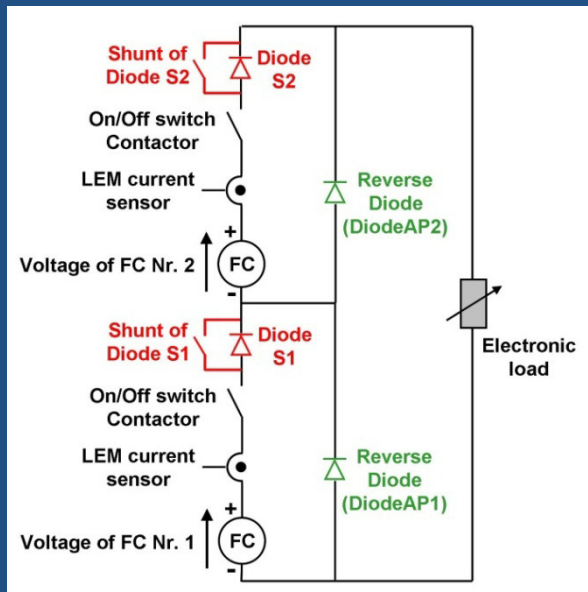
Etude et évaluation de solutions techniques, techno. :

- Stratégies de gestions électrique et fluïdique (ex : procédure d'arrêt stack → **DEA P. CODDET 2006**).
- Topologies électriques (ex : multi-stack → redondance)
- By-pass élec. passifs (diodes), actifs (transistors).

Considérer la ϕ de la PAC (Ex : rôle de Z stack dans la conduction des diodes)



Système Arcola Energy
(5 générateurs PEMFC)
Projet EU MOBYPOST



Mise en évidence avantages, inconvénients des solutions, en termes de :

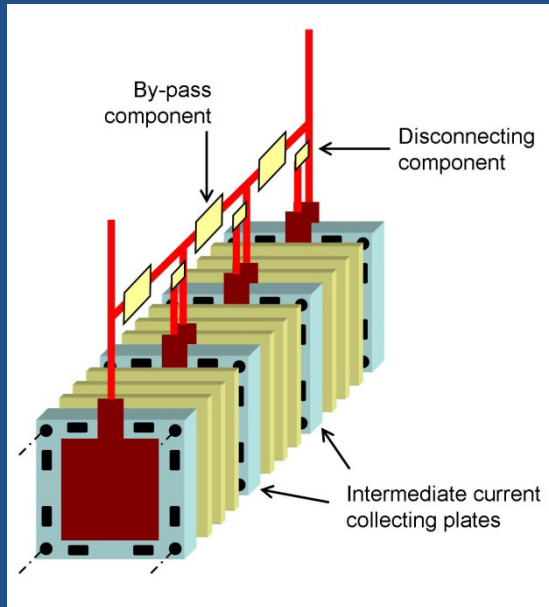
- sécurité, intégrité des matériels (ex : effet interaction PAC - EP sur fiabilité de la PAC),
- perfo. (ex : pertes composants électroniques),
- tolérance à la panne du générateur multi-stack,
- aptitude à permettre la montée en puissance,
- complexité, coûts...

Travaux avec A. De Bernardinis et F. Harel
ECM 2008, ECM 2010



Durée de vie, fiabilité, diagnostic

- Du diagnostic à la continuité de fonctionnement



Pile Schunk
et ex. de
topologie avec
by-pass
électroniques

Avec A. De Bernardinis et F. Harel
- Architecture électronique
→ Contexte Thèse E. FRAPPE
LGEF - IFSTTAR 2012
- Analyse fiabilité
→ Thèse N. NOGUER
UTBM - IFSTTAR en cours

Corollaire : Meilleure compréhension
des φ , des modes de dégradation.
Procédures de diag. valides.

→ Développement d'une PAC « électronique, intelligente »

Par l'intégration de dispositifs électroniques de by-pass au plus près du stack

- Pour une continuité de fonctionnement même en cas de cellule(s) défaillante(s)

- Pour améliorer la fiabilité / durée de vie de la pile

par un pilotage plus local de variables φ liées au stack

+ mise en place de by-pass fluidiques ? Mini-actionneurs avec M3M ?



Durée de vie, fiabilité, diagnostic

Caractérisation et analyse expérimentale de PAC

Expérimentation sous contraintes d'usage réel

Durée de vie, fiabilité, diagnostic

Intégration dans les systèmes de transport



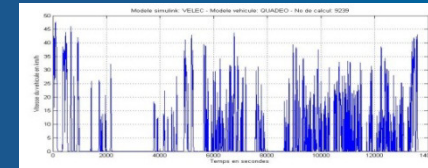
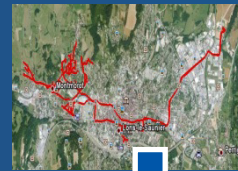
Intégration des PAC dans les Σ de transport

- **Mobypost** (Projet EU JTI FCH-JU) en cours
(IPV, La Poste, MaHyTec, UTBM IFSTTAR, Ducati, H2Nitidor, Eifer, MES, Steinbeis)
But : Equiper 2 plateformes de distribution du courrier La Poste en FC avec 10 VE à PAC \rightarrow H₂ par électrolyse avec E solaire

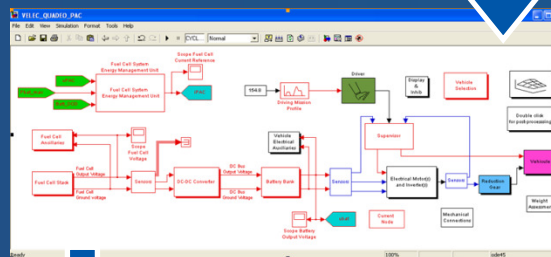


\rightarrow Contribution IFSTTAR : Travaux sur la « source » d'énergie PAC - batteries

1) Relevés de profils de mission
(vitesse, position GPS, altitude, vs. t)



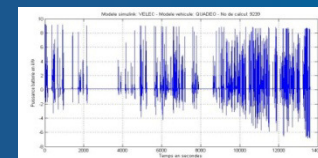
2) Modélisation de la chaîne de traction
Source : PAC + batteries
Logiciel VEHLIB (LTE)



+ Focus actuel :
couplage hydrures - PEMFC
 \rightarrow Stockage H₂ basse pression
 \rightarrow Pb échanges thermiques

3) Gestion de l'énergie sur profils de mission

4) Evolution variables sur cycles : - P, I, conso H₂ ...



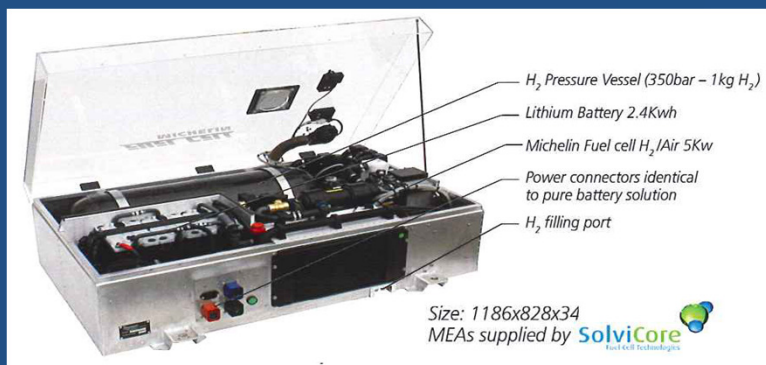
Intégration des PAC dans les Σ de transport

- **F-City H2** (Canton Fribourg, Région collectivités FC, OSEO, FEDER) en cours Michelin, FAM, EVE System, FC LAB - FCellSYS (M3M - INEVA - IFSTTAR), IPV
But : Substituer un « module énergie » de type Σ PAC hybridé à un pack de batteries NiMH (équipant le véhicule FAM commercialisé).
 - Densité d'énergie (Wh/kg) $\times 3.6$ - Remplissage H₂ en 3 min \rightarrow 1ère homologation d'un véhicule H₂ en France suivant la norme CE 79/2009

\rightarrow Contribution de l'IFSTTAR à une démarche analyse sûreté de fct^{ment} :
Expertises techniques sur lots du « module énergie » : PAC , batterie, contrôle ...

Quelques outils, méthodes mis en pratique par le M3M (logiciel TDC) :

- Analyse fonctionnelle du Σ - APR (Analyse Préliminaire des Risques)
- AMDEC (Analyse des Modes de Défaillance, de leurs Effets et de leur Criticité)



Module énergie
& Station H₂
Belfort



Plan de la présentation

- **1^{ère} partie : synthèse de l'activité de recherche**
 - CV, cadre de travail, démarche adoptée
- **2^{ème} partie : plus de détails sur les travaux menés**
 - Restitution du contexte g^{al} recherches PAC & transports
 - Qu'est-ce qu'un générateur à PAC ?
 - **Caractérisation & analyse expérimentales de PAC**
 - Bancs d'essais, instruments & protocoles de mesure, plans d'expériences
 - **Essais en conditions d'usage transport dupliquées en labo**
 - Profils de mission véhicule, essais climatiques et vibratoires
 - **Aspects durée de vie, fiabilité, diagnostic**
 - Essais d'endurance, protocoles exp. spécifiques, traitement de l'info.
 - **Intégration des PAC dans les Σ de transport**
 - Démonstrateurs, déploiements des techno. H₂, sûreté de fct^{ment}
- **3^{ème} partie : conclusions & perspectives**



Conclusion & perspectives

- **Commercialisation de véhicules automobiles à l'horizon 2013 ??**

Annonces Hyundai, Toyota, Daimler

Hyundai ix35 FCE V : 1000 en 2013, en 2014, 15000 en 2015 ??

→ **La promesse d'un véhicule électrique** - à l'autonomie de 400 - 700 km,
- dont on fait le « plein » en qqs min .

- **Conditions de diffusion à grande échelle des véhicules liées au tryptique perfo., durée de vie / fiabilité, coûts déjà OK ??**

« Juste » le pb de l'infrastructure H₂ à régler ??

- Par leurs perfo. supérieures (efficacité énergétique élevée, faibles émissions de polluants et de gaz à effets de serre)

- par leurs applications potentielles tellement multiples,

les PAC sont des technologies de l'H₂ prometteuses, capables d'apporter des réponses pertinentes à différents niveaux dans le domaine de l'E.

Les PAC : un maillon essentiel permettant d'entrevoir une :



- optimisation du η de certaines chaînes énergétiques,
- meilleure prise en compte d'aspects logistiques (stockage de l'E)
qui freinent le développement de certaines filières.

→ **L'IFSTTAR doit apporter un regard sur la thématique PAC et H₂**



Conclusion & perspectives

- **Démarche :**

Continuer à mêler étroitement expérimentation, analyse des phénomènes, modélisation de l'expérience, modélisations physique et comportementale.

→ Partir de pb concrets, techno. et trouver des approches scientifiques adaptées

Nouveaux outils de caractérisation & de diagnostic

Caractérisation et analyse expérimentale de PAC

Outils « embarquables » ?

Interface avec analyses matériaux

Expérimentation sous contraintes d'usage réel

Compréhension des φ

Durée de vie, fiabilité, diagnostic

Mdl de fiabilité ?
Vieillessement accéléré ?

Lien PAC - stockage H₂

Intégration dans les systèmes de transport

Sûreté de fct^{ment}

Filière H₂

→ **Etendre la démarche à d'autres types de PAC (HT PEMFC, SOFC)**

Nouveau contexte IFSTTAR :

→ **Vers une approche systémique**

de l'intégration énergétique véhicules - habitats - réseaux

Recharge des VE par des PAC stationnaires ?



INSTITUT FRANCAIS
DES SCIENCES
ET TECHNOLOGIES
DES TRANSPORTS,
DE L'AMENAGEMENT
ET DES RESEAUX

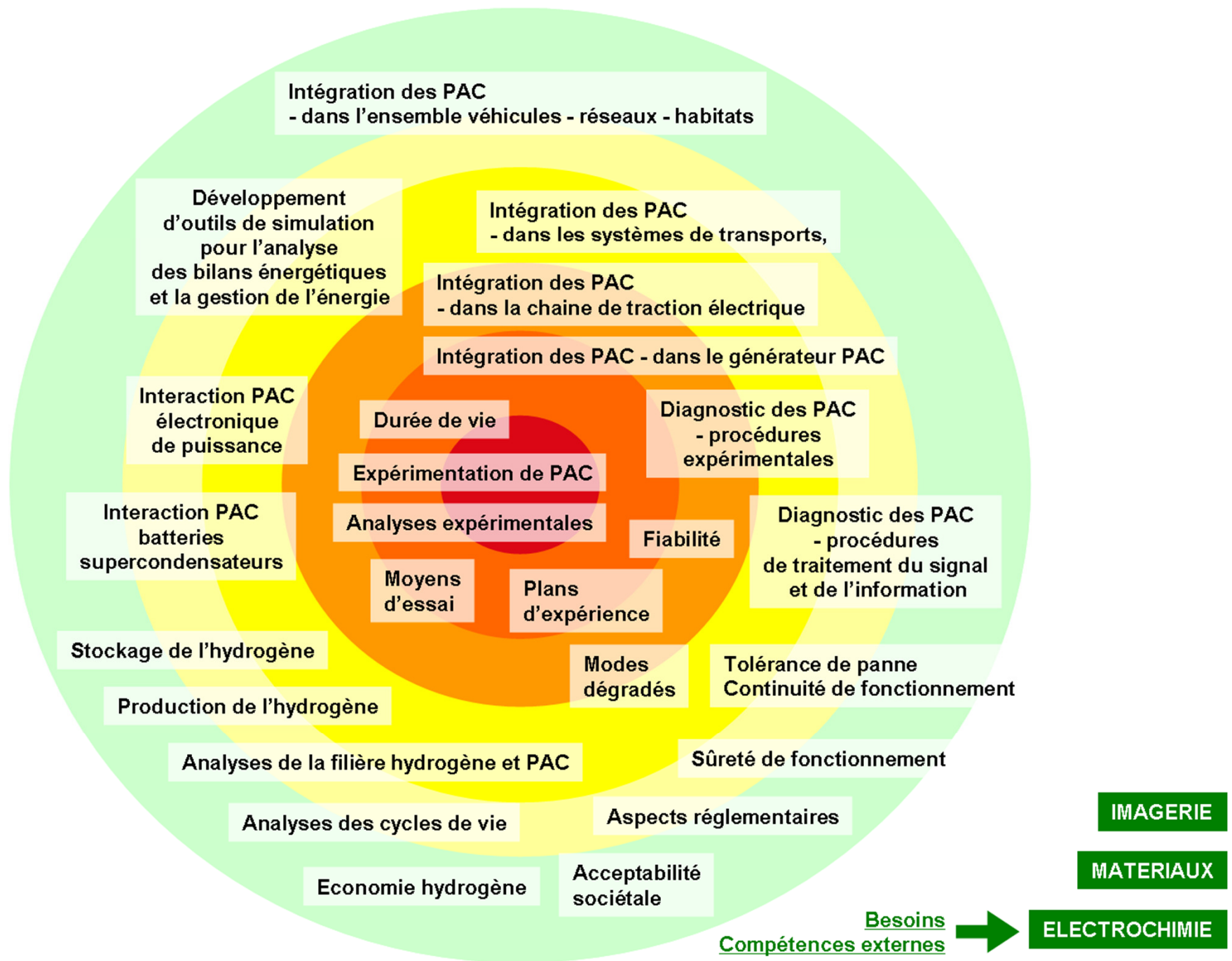
Merci de votre attention

denis.candusso@ifsttar.fr



IFSTTAR

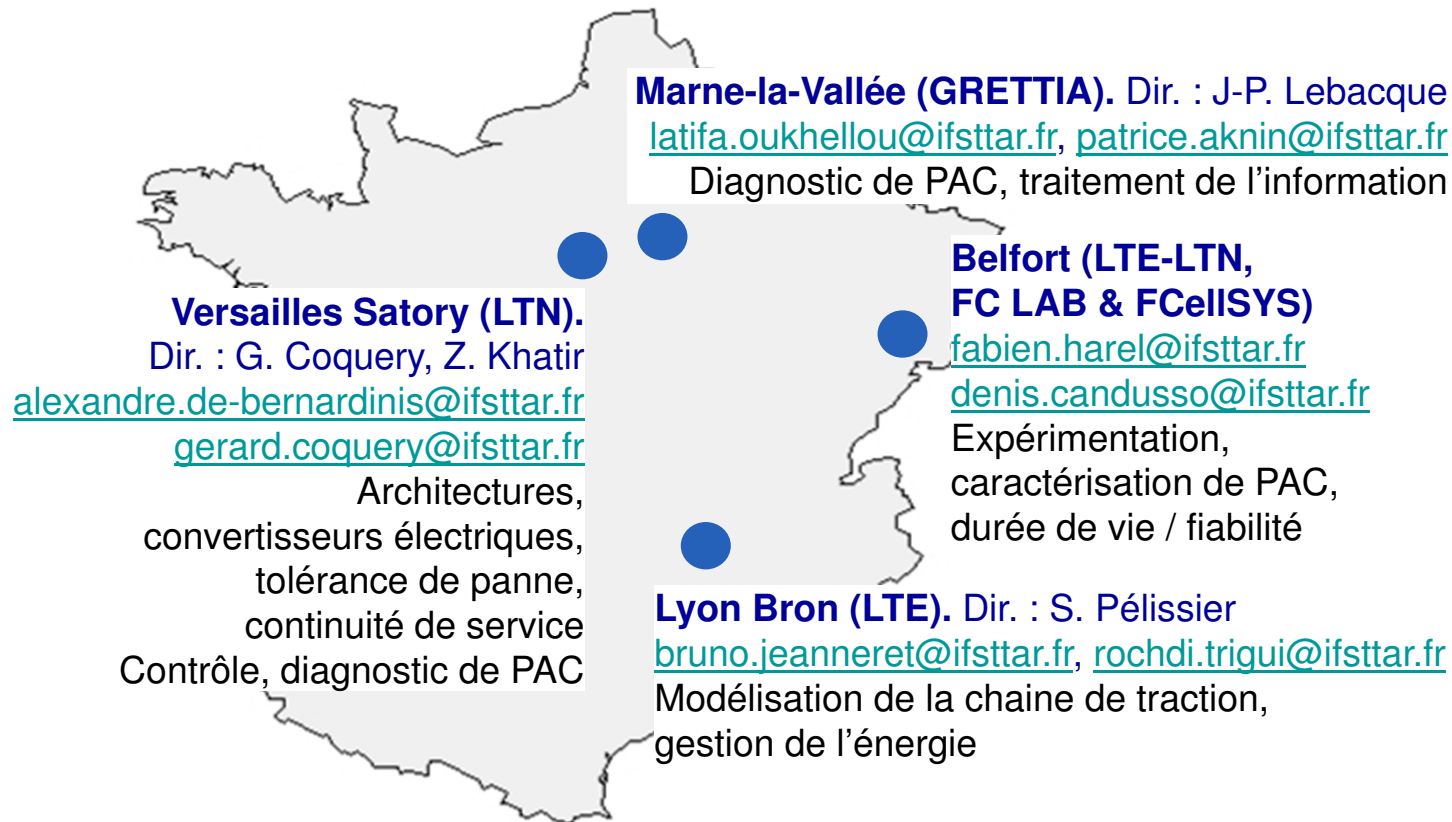




Activité de recherche

Thématique de recherche :

Générateurs à PAC pour les applications transport



→ 4 sites
IFSTTAR
en lien
avec la
thématique
PAC

