

Denis Candusso

Soutenance de thèse

29/11/2002

**Hybridation du groupe électrogène
à pile à combustible
pour l'alimentation d'un véhicule électrique**

**Directeur de thèse : Elisabeth RULLIERE
Responsable : Jean-Paul YONNET**



L.E.G



Plan de la présentation

- 1 Introduction et contexte de l'étude**
- 2 La pile à combustible PEM (PAC PEM)**
- 3 Les modèles de PAC**
- 4 L'hybridation du GE à PAC en simulation**
- 5 Le démonstrateur RobotPAC**
- 6 Conclusion et perspectives**

Plan de la présentation

- 1 Introduction et contexte de l'étude**
- 2 La pile à combustible PEM (PAC PEM)
- 3 Les modèles de PAC
- 4 L'hybridation du GE à PAC en simulation
- 5 Le démonstrateur RobotPAC
- 6 Conclusion et perspectives

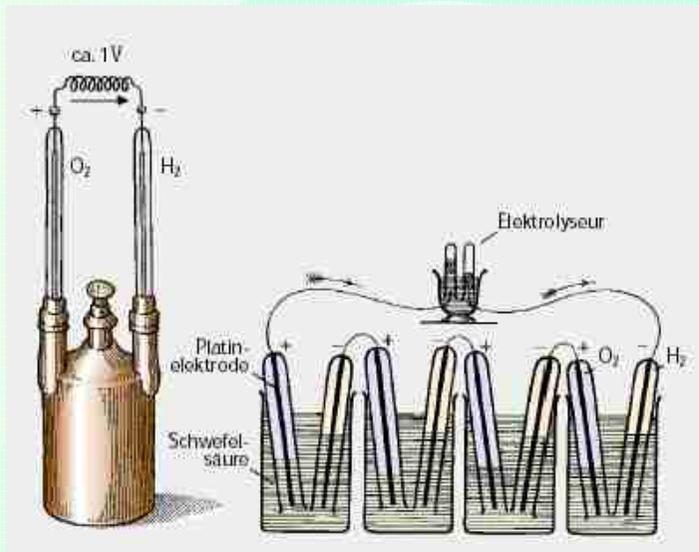
Introduction et contexte de l'étude

Qu'est ce qu'une PAC?

1

La pile à combustible : un convertisseur d'énergie
 énergie chimique → électricité + chaleur

2



Expérience de W. Grove
 (1839)

Combustible (réducteur) : H₂
 Comburant (oxydant) : O₂

3

4

5

6

Suivant la nature des combustibles utilisés (H₂, CH₄ ...), les réactions électrochimiques se déroulent à des températures différentes (de 40 à 1100°C).

Il existe différents types de pile : PEM, SOFC, PAFC, AFC, DMFC.

Introduction et contexte de l'étude

Intérêt de la PAC ?

1

- Avancées technologiques réalisées sur les matériaux

2

- Recherche d'une indépendance et d'une diversification énergétiques plus grandes
Réduction des importations d'HC dans les transports

3

- Réduction des émissions polluantes
(CO2 responsable de l'effet de serre)

4

- Large gamme de puissance des PAC

5

Applications potentielles : du portable au stationnaire

6

Source :
Fraunhofer
Institut



Source : ERD



Source : Ballard



Source :
Alstom
Ballard

Introduction et contexte de l'étude

Intérêt de la PAC ?

1

- L'hydrogène, nouveau vecteur énergétique
Pour découpler dans le temps consommation et production d'électricité à partir d'énergies renouvelables.

2

3

4

Eolien



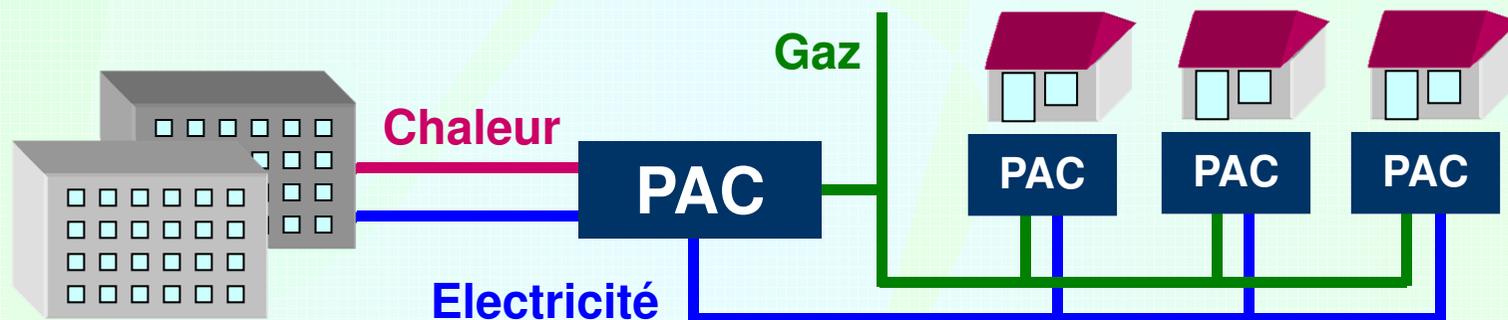
Solaire



5

- Législation nouvelle plus favorable à la production décentralisée de l'énergie. Intérêt offert par la cogénération.

6



Introduction et contexte de l'étude

La PAC dans les transports

1 Pour différents types de véhicule électrique :

2 Photo :
Source
Aprilia



3 Photo : source Mercedes



Photo :
source MAN

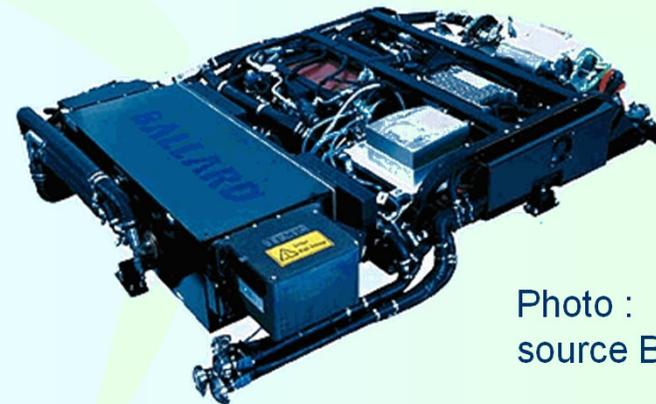


Photo :
source Ballard

Introduction et contexte de l'étude

La PAC dans les transports

1

On recherche un véhicule propre,
sûr,
silencieux,
et économe.

2

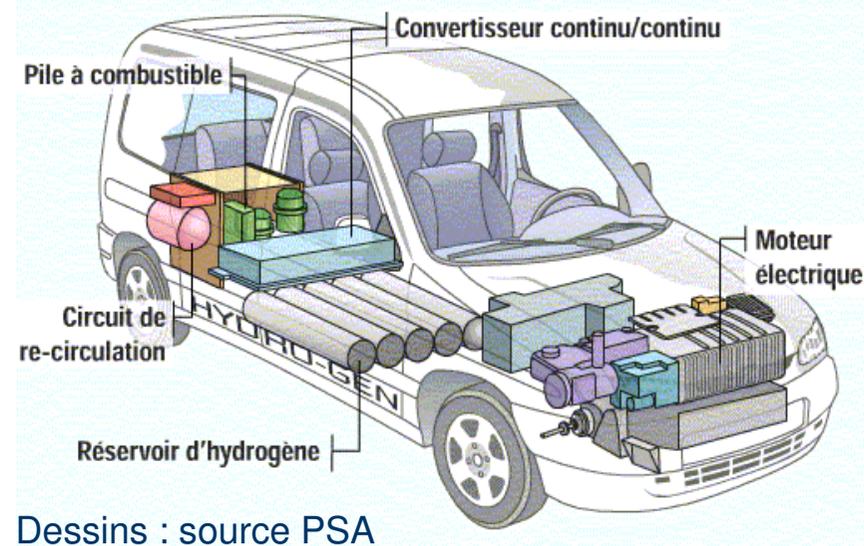
Il existe deux sortes de véhicule électrique à pile à combustible :

3

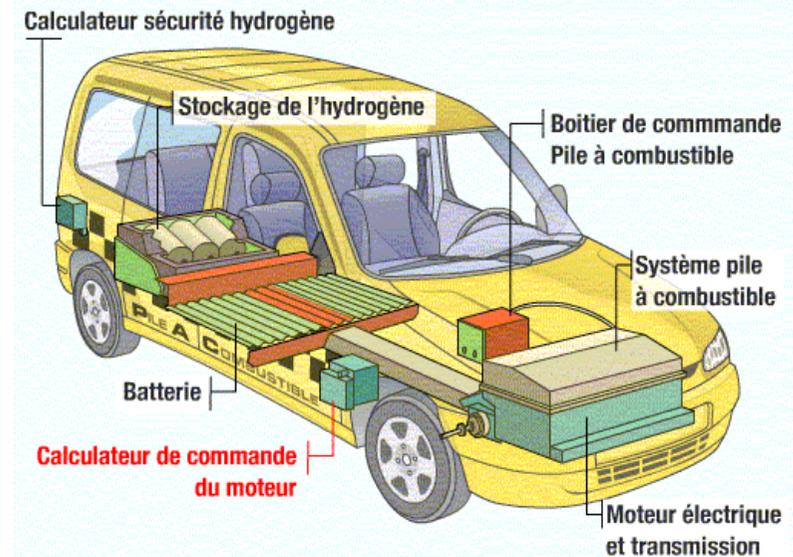
4

5

6



Tout PAC



PAC hybridée
par des batteries

Introduction et contexte de l'étude

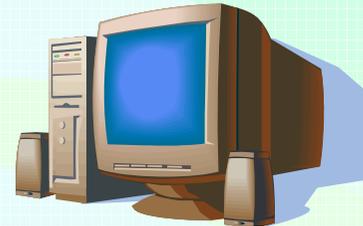
Objectifs du travail de thèse

1 Mettre en avant les avantages et les inconvénients de l'hybridation d'un GE à PAC par un dispositif de stockage tampon de la puissance

2

3

- grâce à la simulation



4

5

- par l'expérimentation



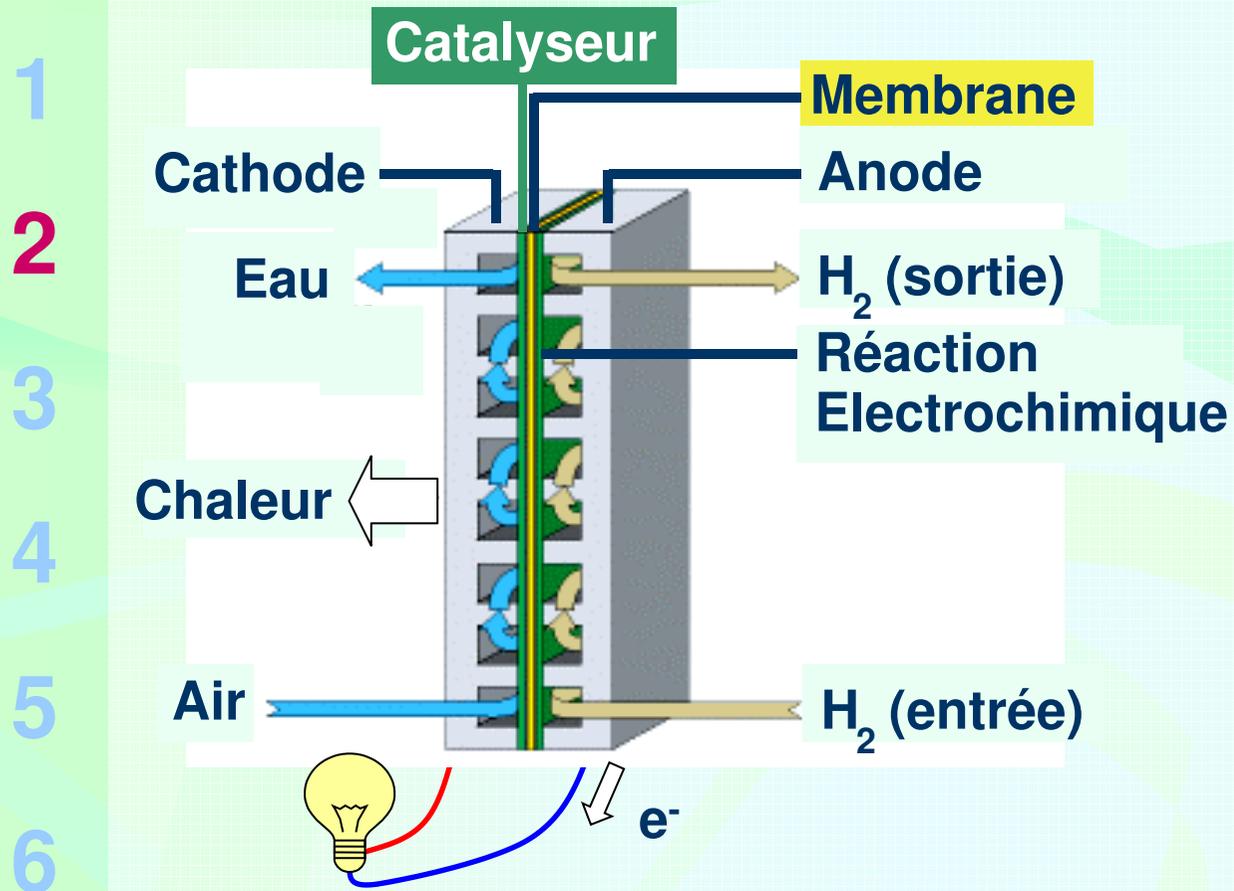
6

Plan de la présentation

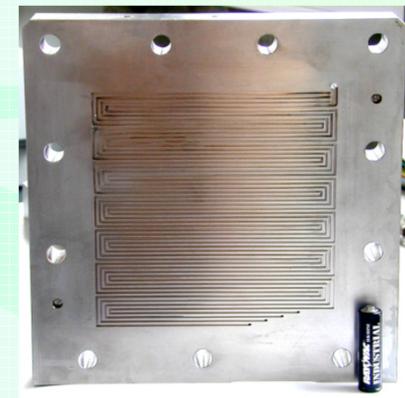
- 1 Introduction et contexte de l'étude
- 2 **La pile à combustible PEM (PAC PEM)**
- 3 Les modèles de PAC
- 4 L'hybridation du GE à PAC en simulation
- 5 Le démonstrateur RobotPAC
- 6 Conclusion et perspectives

La pile à combustible PEM

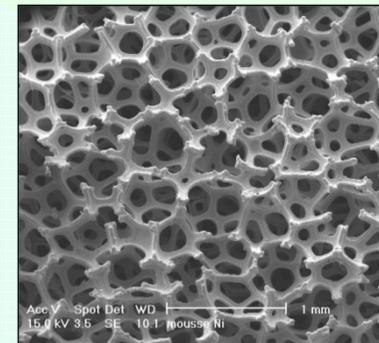
Son principe



Distributeurs



à canaux



à poreux

La pile à combustible PEM

Son principe

1 Pour disposer d'un niveau de tension suffisant, on empile les cellules. Le courant est proportionnel à la surface des plaques.

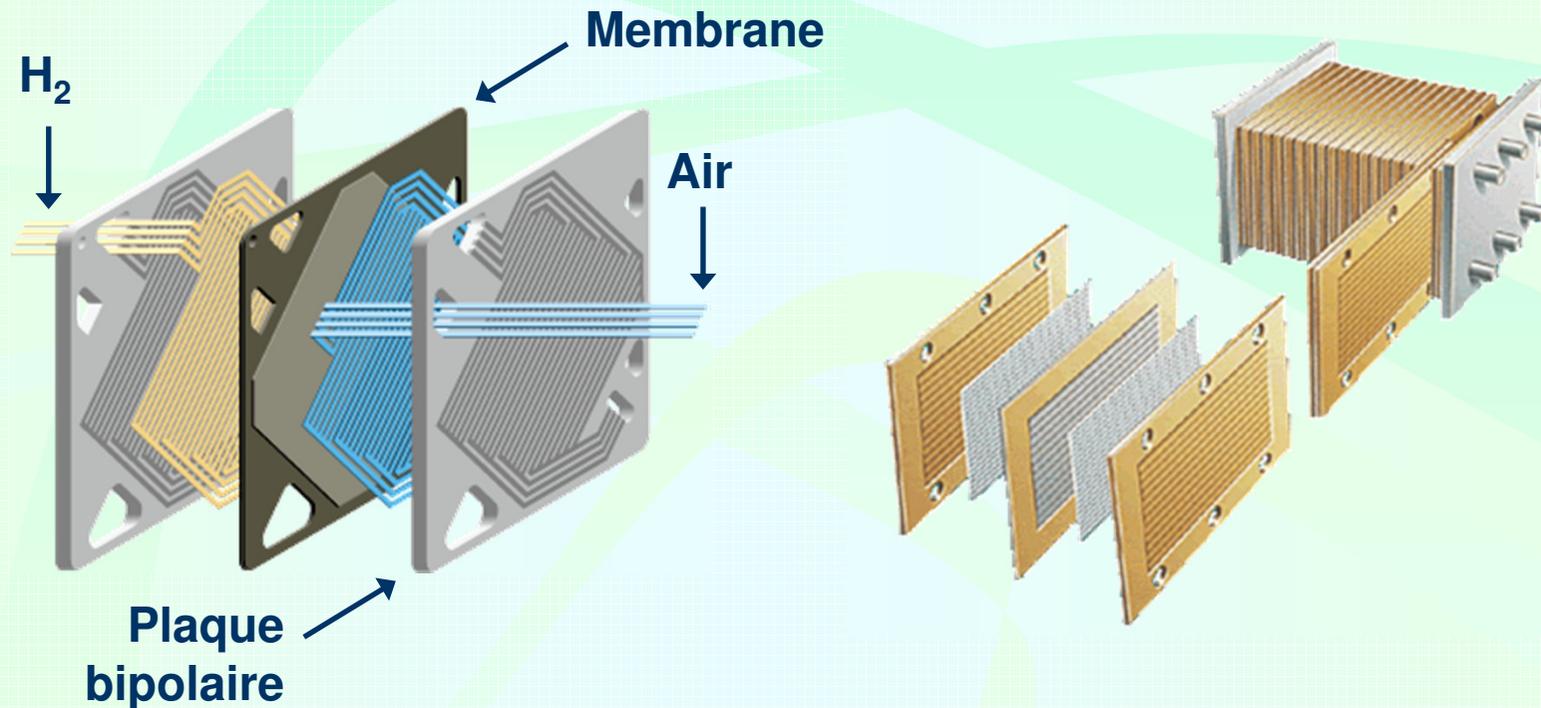
2

3

4

5

6



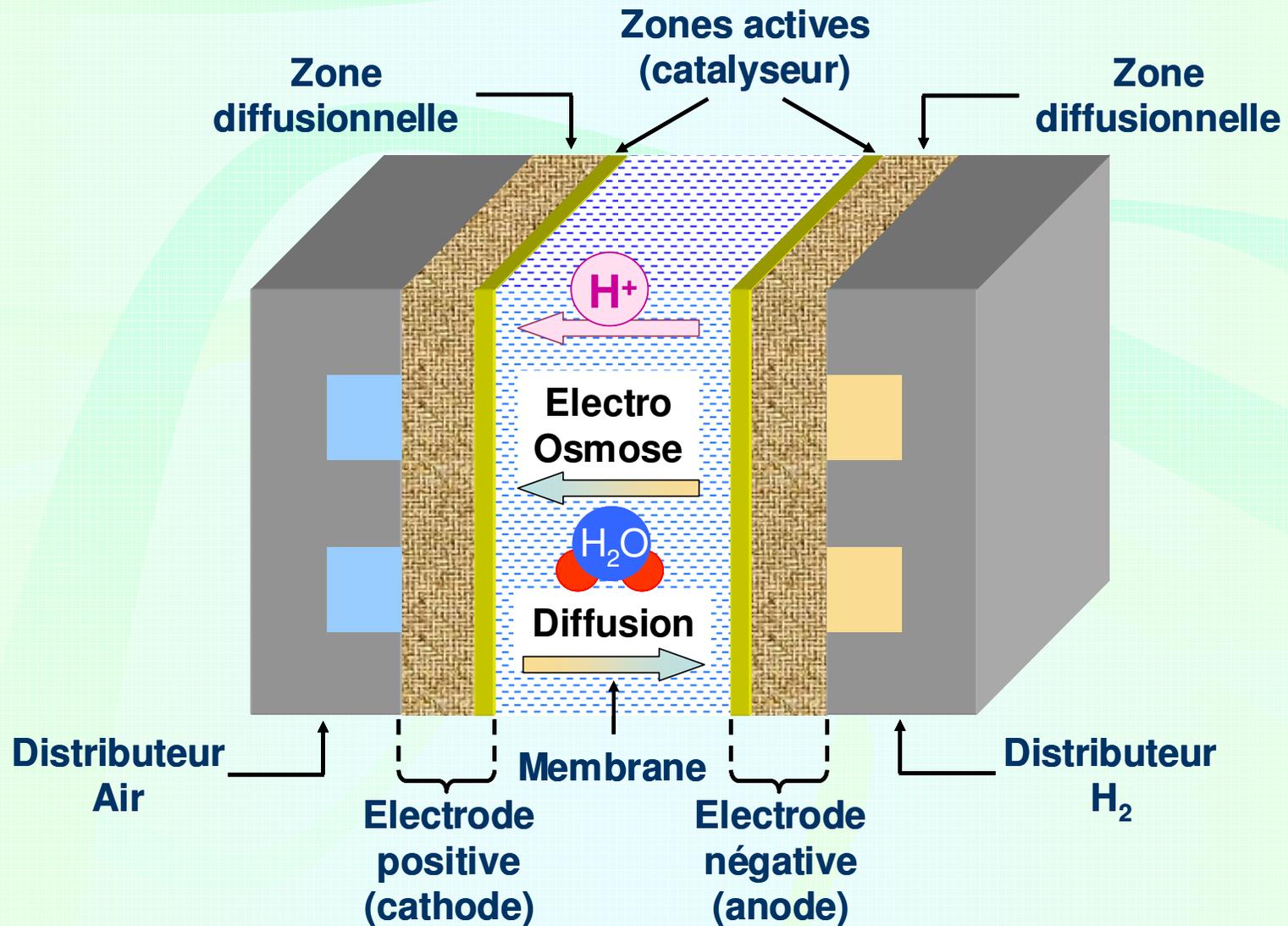
Une cellule

Un empilement de cellules
(stack)

La pile à combustible PEM

Les différentes zones

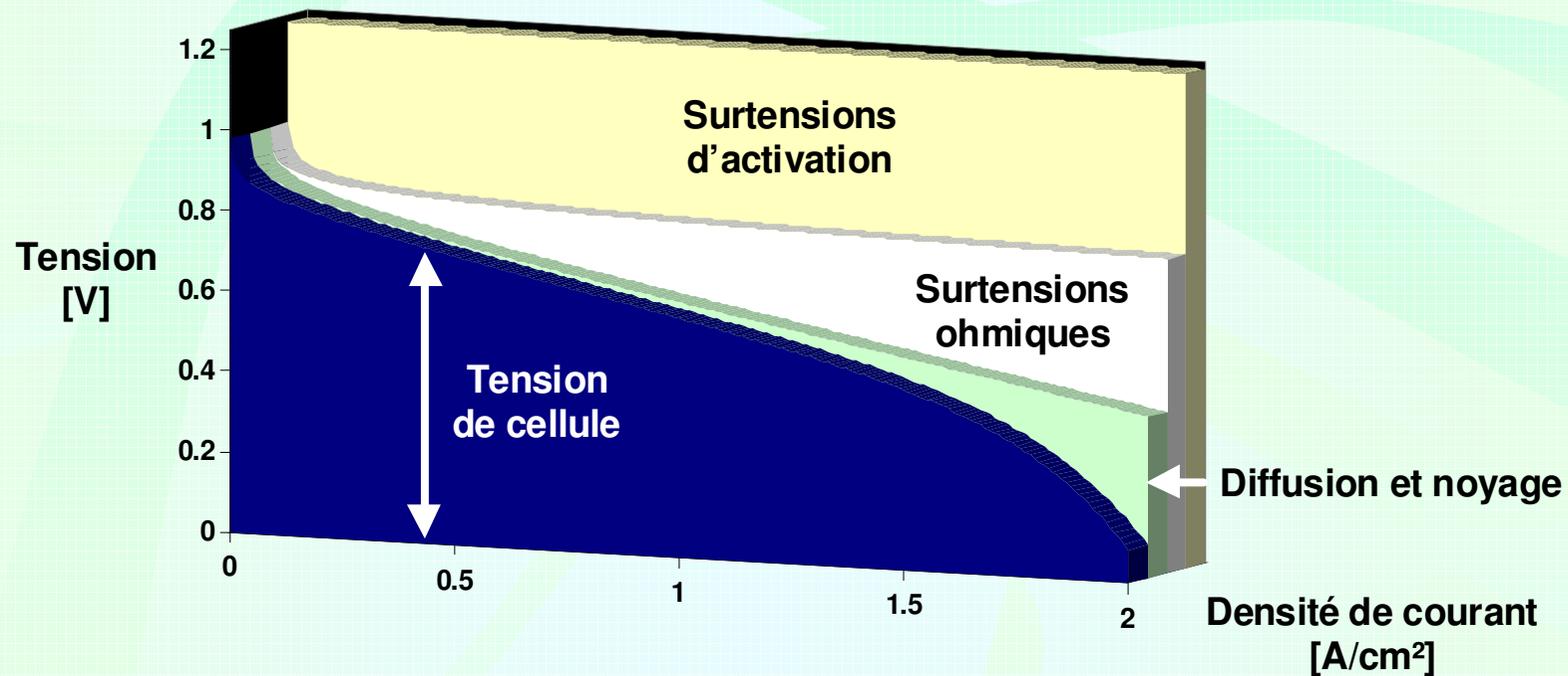
1
2
3
4
5
6



La pile à combustible PEM

La courbe de polarisation d'une cellule

1 La courbe de polarisation, ou caractéristique courant - tension,
= image du rendement de tension de la cellule



Exemple de courbe de polarisation d'une cellule ($T = 80^{\circ}\text{C}$)

La pile à combustible PEM

Le groupe électrogène à pile à combustible

1

GE à PAC = pile + organes auxiliaires

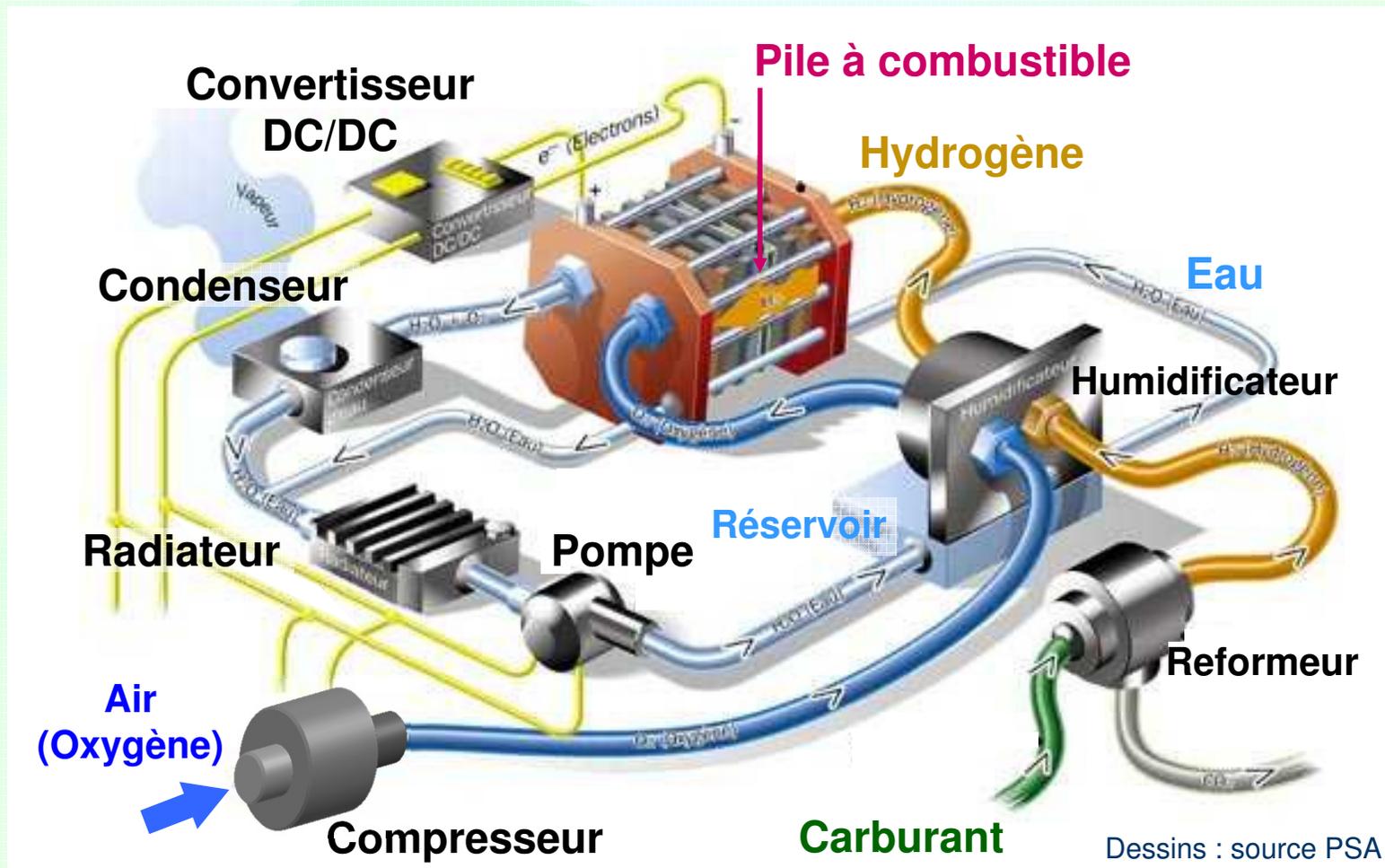
2

3

4

5

6



La pile à combustible PEM

Le rendement du GE à PAC

1 Le rendement du groupe électrogène à pile à combustible est le produit de plusieurs rendements :

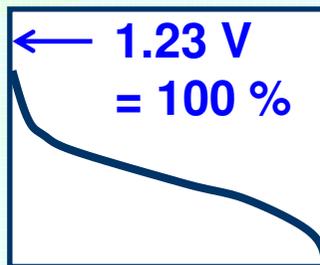
2

à 25°C
eau liquide

$$\frac{\Delta G}{\Delta H} = 83\%$$

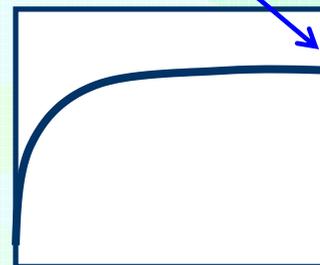
×

à 25°C
eau liquide



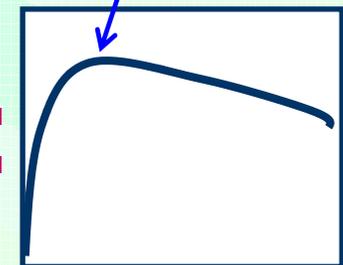
×

≈ 80 %



=

≈ 50 %



3

4

5

6

Le rendement
énergétique
maximal

Le rendement
de tension

Le rendement
du système
= f(Pnette)

Le rendement
du GE à PAC
= f(Pnette)

Plan de la présentation

- 1 Introduction et contexte de l'étude
- 2 La pile à combustible PEM (PAC PEM)
- 3 Les modèles de PAC**
- 4 L'hybridation du GE à PAC en simulation
- 5 Le démonstrateur RobotPAC
- 6 Conclusion et perspectives

Les modèles de PAC

Échelles de temps et de distance

1	100 ns Impédance membrane	1s Constante mécanique du compresseur	0.1 à 10 s Impédance de diffusion	1 à 10 min Phénomènes thermiques, hydratation
2				
3	Constantes de temps			
4	Distances			
5	1 à 10 nm Particules catalyseur	100 à 300 μm Epaisseur tissu constituant les électrodes	< 0.2 mm Epaisseur membrane	1 mm Largeur des canaux plaques bipolaires
6				



Besoin de modèles différents pour les simulations :

- de véhicules sur profils de mission (durée > 10s)
- des interactions PAC / convertisseurs (durée < 1s)

Les modèles de PAC

Expression de la relation courant - tension

1 De l'expression de la chute ohmique,
et de la relation de Butler-Volmer :

2

$$3 \quad i_f = i_0 \left[\left(\frac{a_{\text{H}_2\text{O}}}{a_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{equ}}} \right) e^{(+\alpha_a n f \eta_{\text{act}})} - \left(\frac{[\text{O}_2]}{[\text{O}_2]_{\text{equ}}} \right)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{[\text{H}^+]}{[\text{H}^+]_{\text{equ}}} \right)^2 e^{(-\alpha_c n f \eta_{\text{act}})} \right]$$

4 est issue une loi courant – tension :

5

$$U(i) = E_{\text{rev}} - R_m i + \beta_1 + \beta_2 T + \beta_3 T \ln(ki) + \beta_4 T \ln([\text{O}_2])$$



6

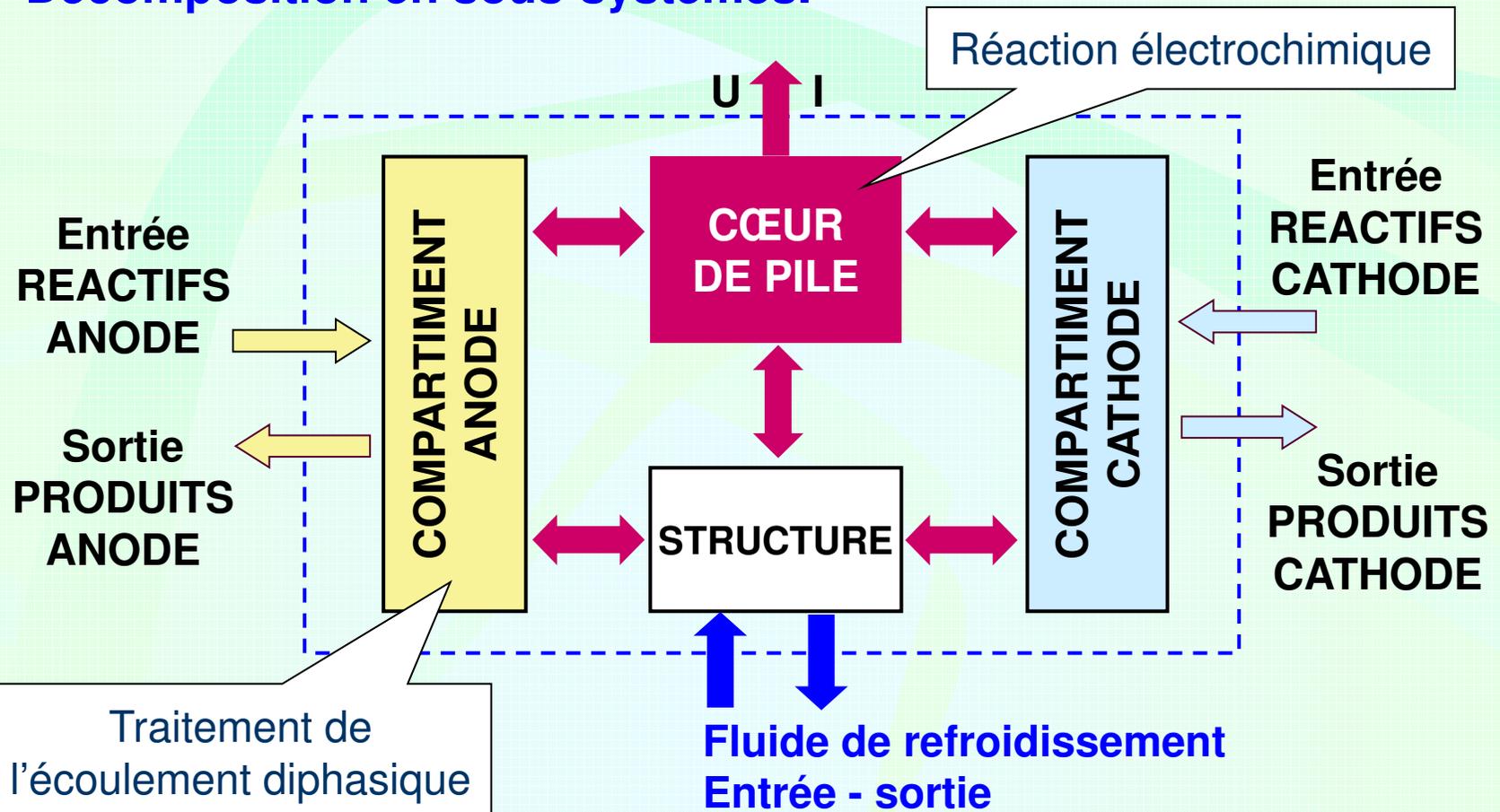
$$U(i) = E_{\text{rev}} - R_m i - \beta_1 T \ln\left(\frac{i}{i_0}\right) + \beta_2 T \ln\left(1 - \frac{i}{i_l}\right)$$

Cette équation électrique décrit la réaction électrochimique qui a lieu dans le cœur de pile (EME).

Les modèles de PAC

Le modèle développé par le CEA

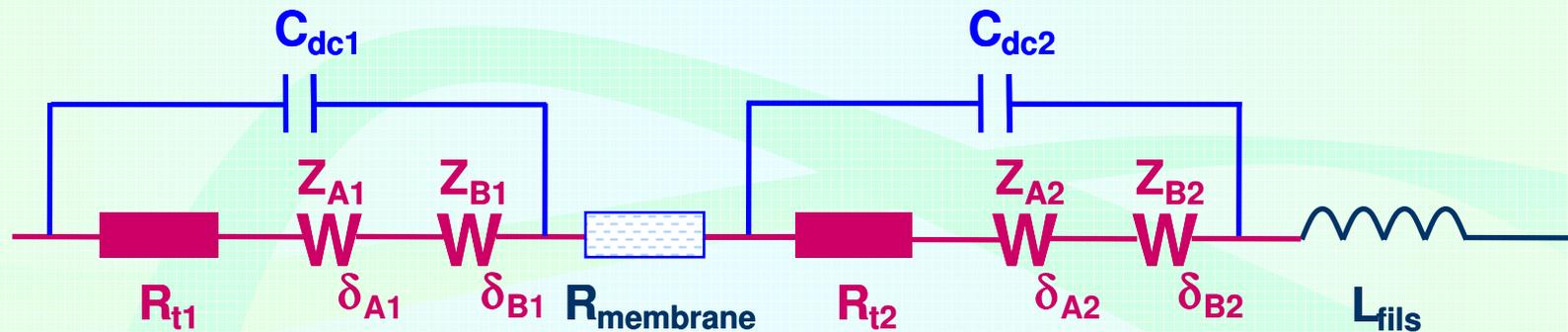
1 **Modèle dynamique à l'architecture modulaire,**
 2 **destiné à la prédiction et à la compréhension des phénomènes.**
 3 **Décomposition en sous-systèmes.**



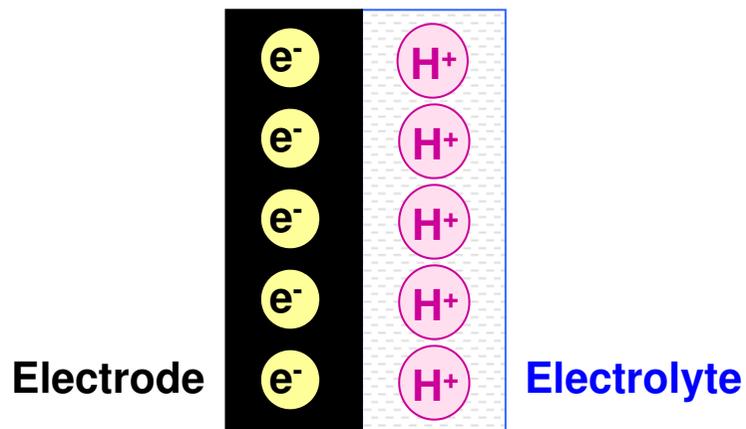
Les modèles de PAC

Le modèle fréquentiel des impédances

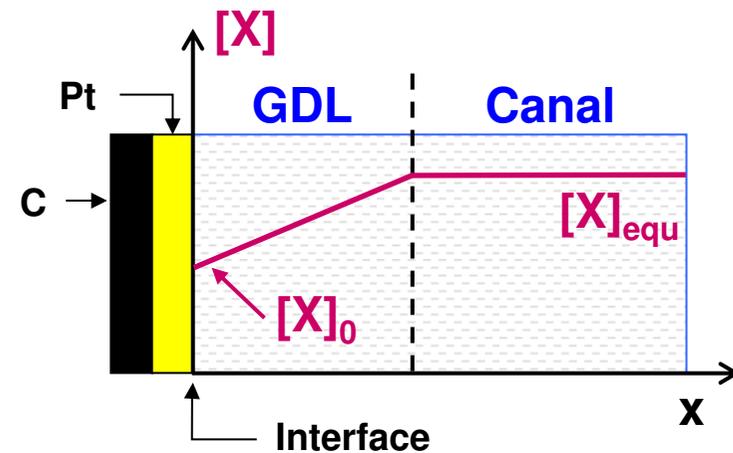
Circuit électrique équivalent



La double couche



La diffusion



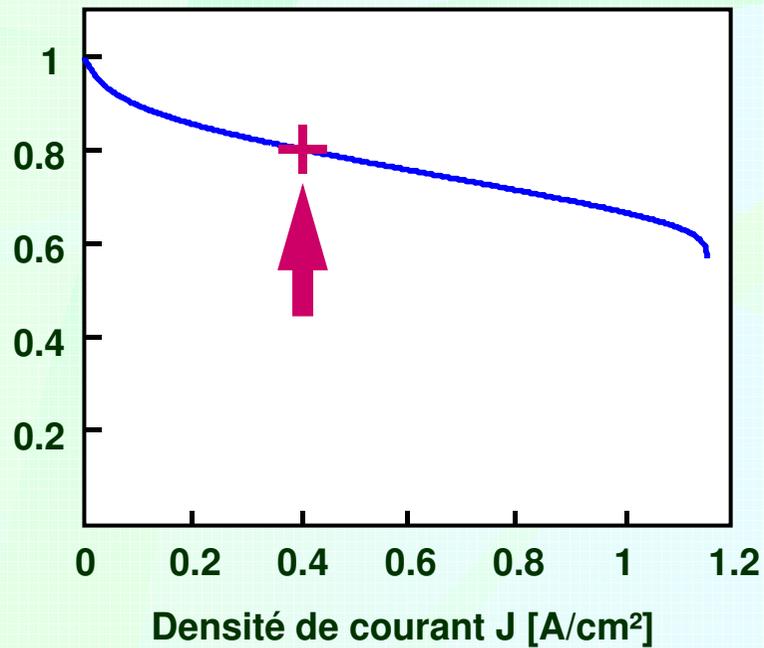
Les modèles de PAC

Diagrammes d'impédance théoriques

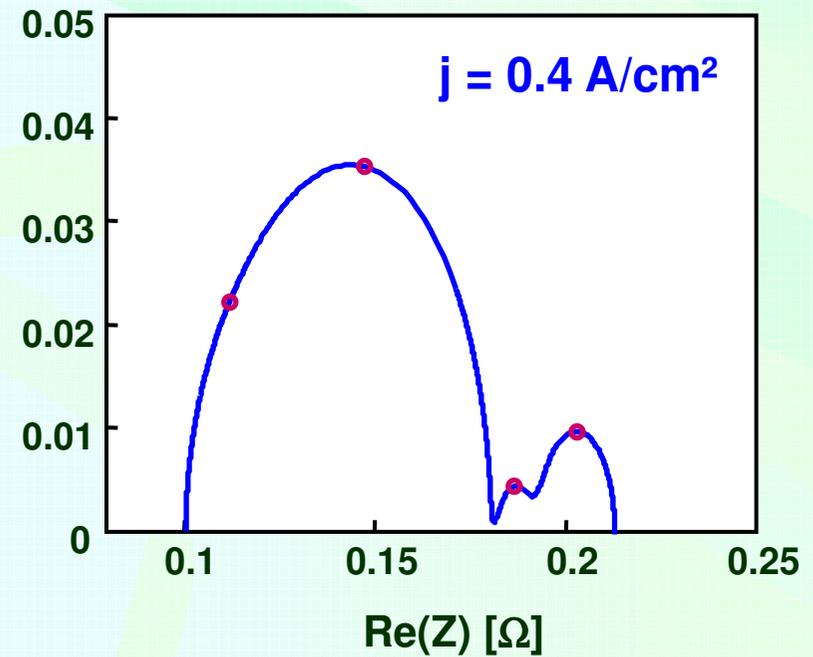
1 Le long de la courbe de polarisation :

2

Tension
de cellule [V]



$- \text{Im}(Z)$ [Ω]



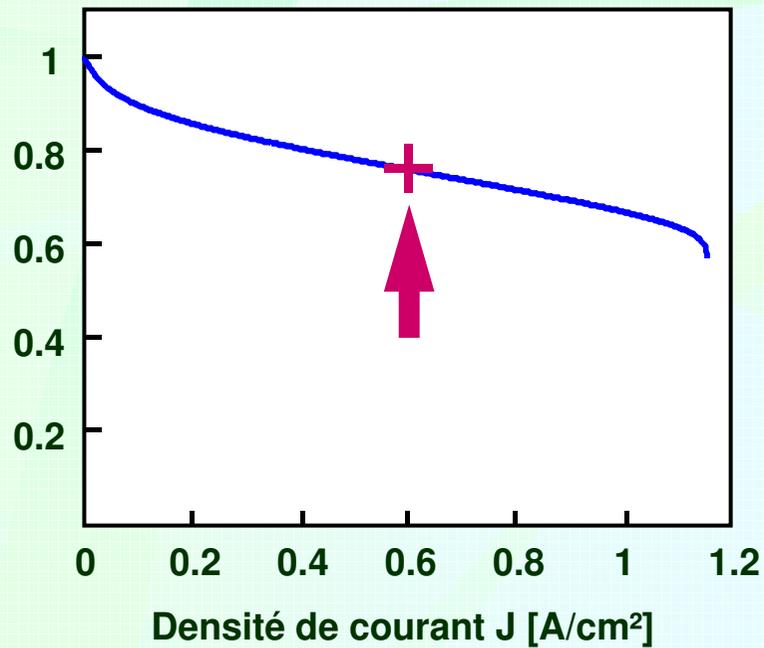
Les modèles de PAC

Diagrammes d'impédance théoriques

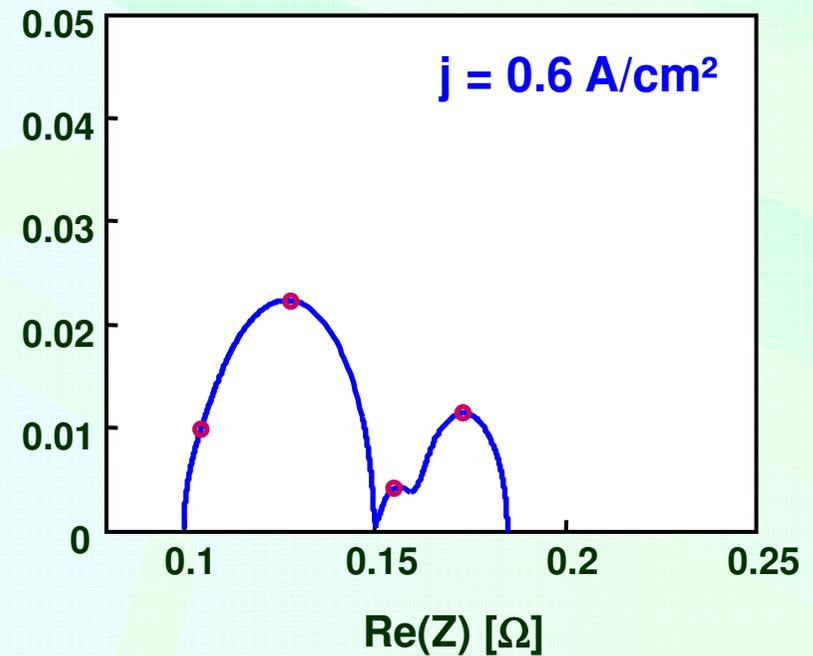
1 Le long de la courbe de polarisation :

2

Tension
de cellule [V]



$-\text{Im}(Z)$ [Ω]



Les modèles de PAC

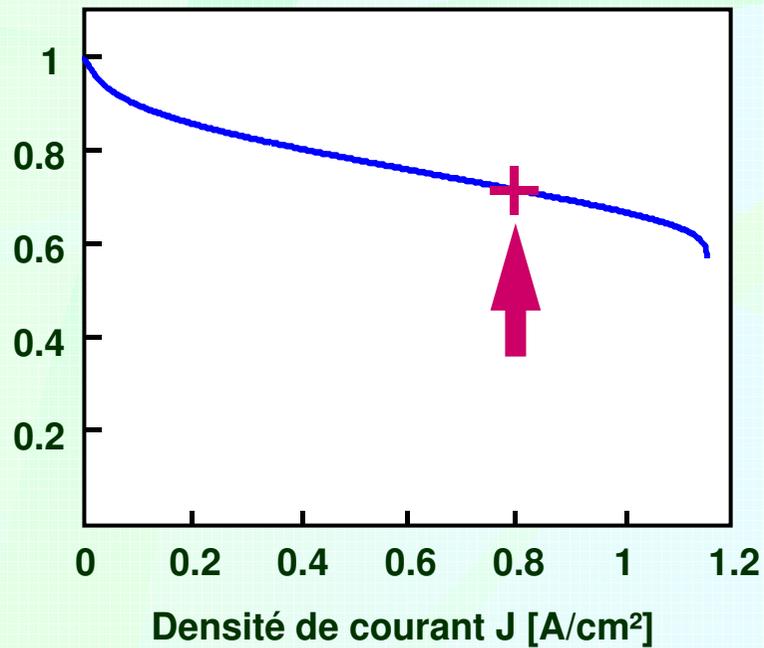
Diagrammes d'impédance théoriques

1 Le long de la courbe de polarisation :

2

Tension
de cellule [V]

3

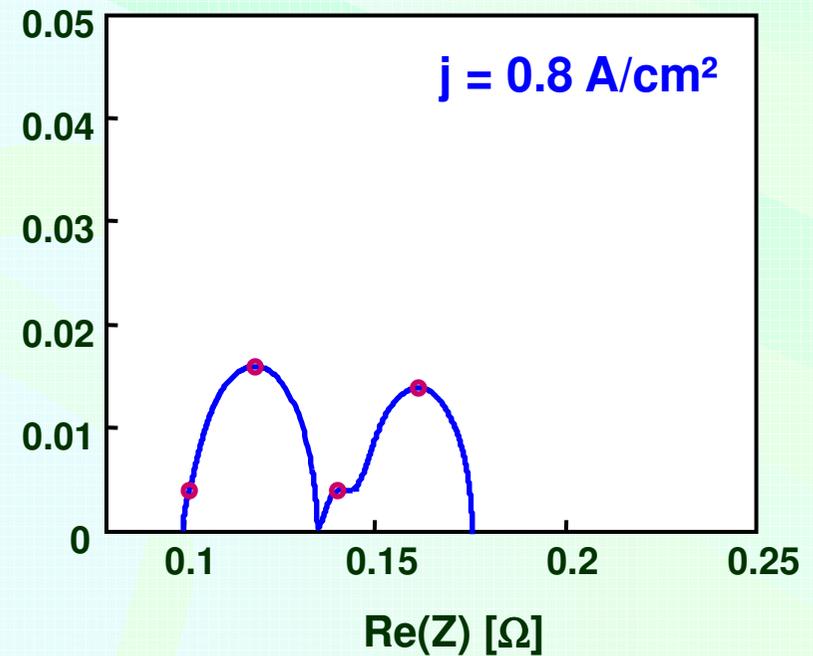


4

5

6

- Im(Z) [Ω]



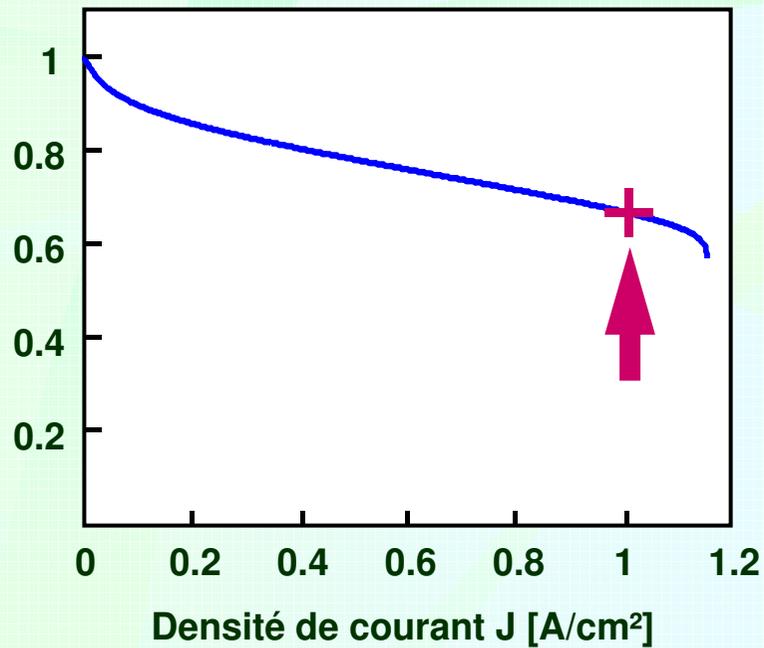
Les modèles de PAC

Diagrammes d'impédance théoriques

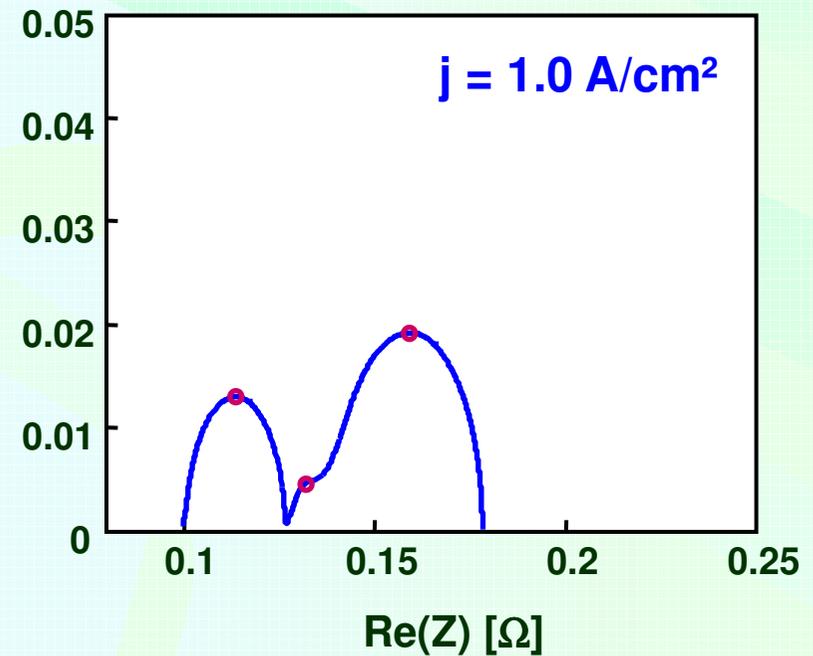
1 Le long de la courbe de polarisation :

2

Tension
de cellule [V]



- Im(Z) [Ω]



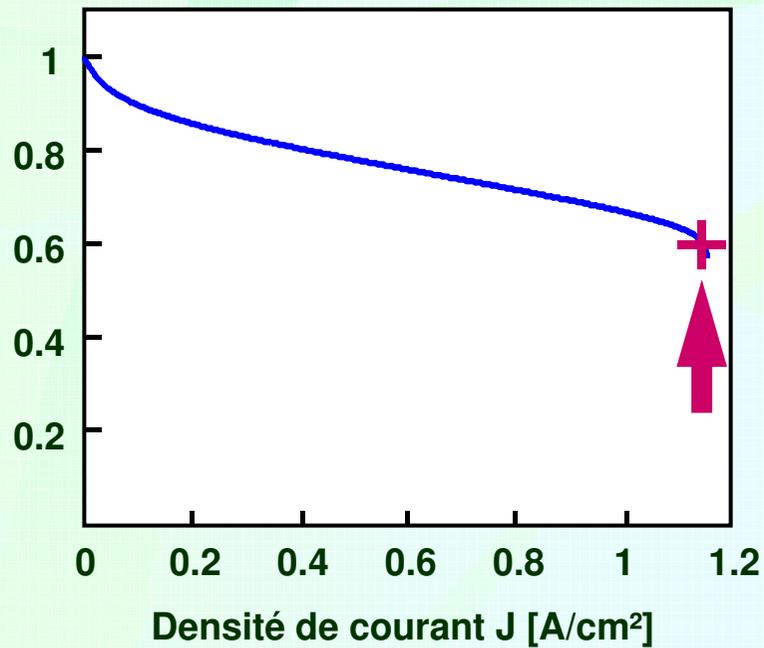
Les modèles de PAC

Diagrammes d'impédance théoriques

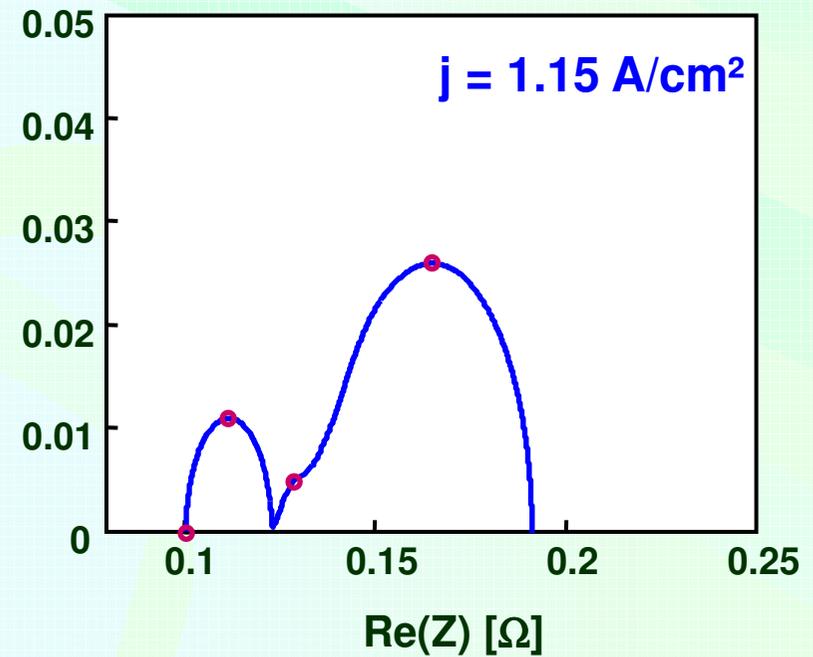
1 Le long de la courbe de polarisation :

2

Tension
de cellule [V]



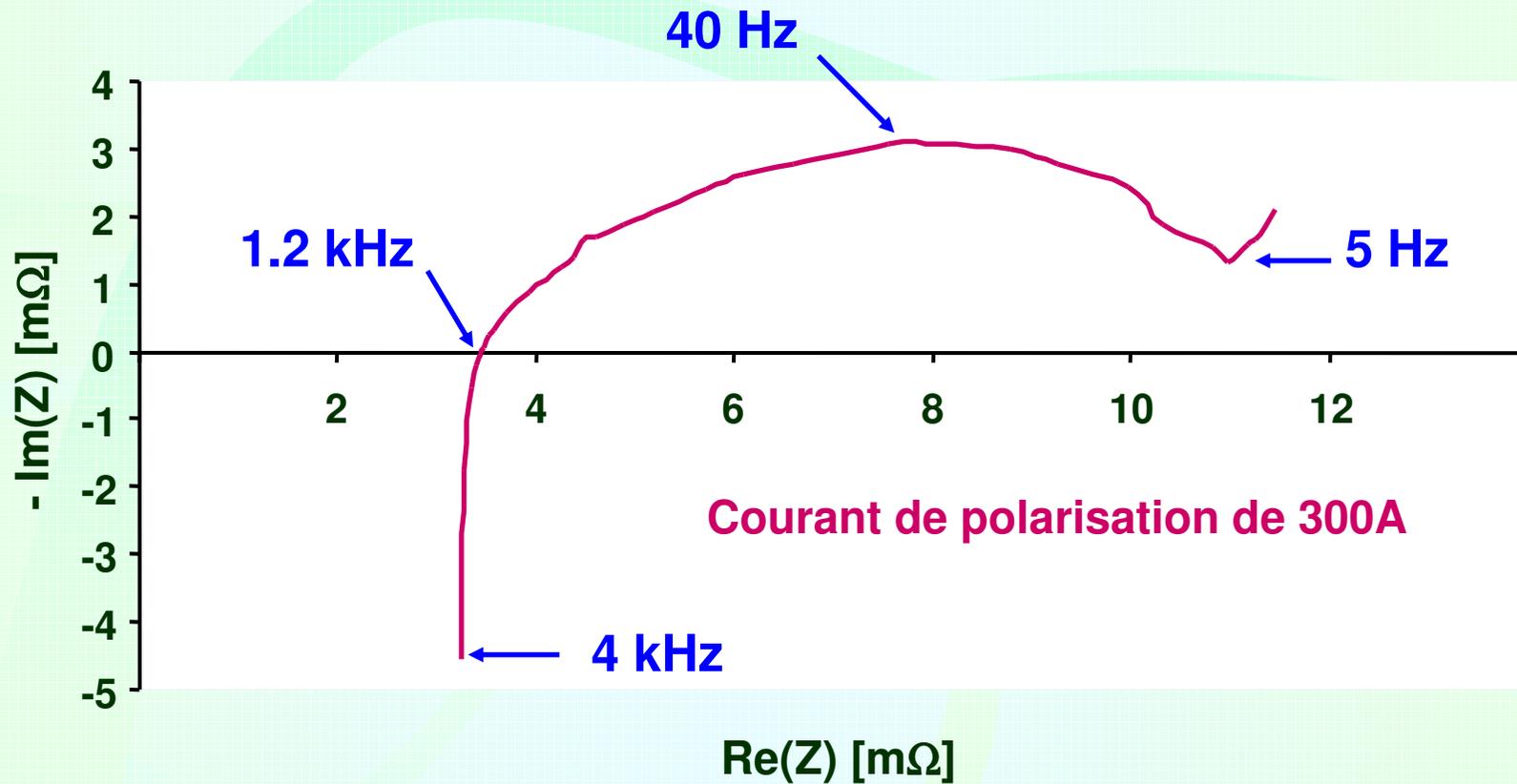
- Im(Z) [Ω]



Les modèles de PAC

Mesure d'impédance

Exemple de diagramme d'impédance dans le plan complexe :



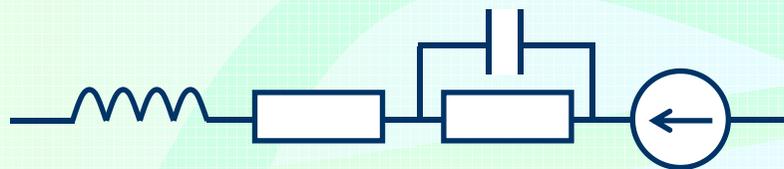
Mesures réalisées par Thierry Pascal au CEA

Les modèles de PAC

Choix d'un modèle

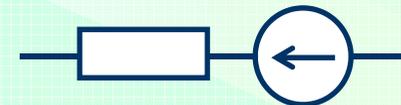
1 Le modèle peut être choisi en fonction des constantes de temps des phénomènes auxquels on s'intéresse.

2

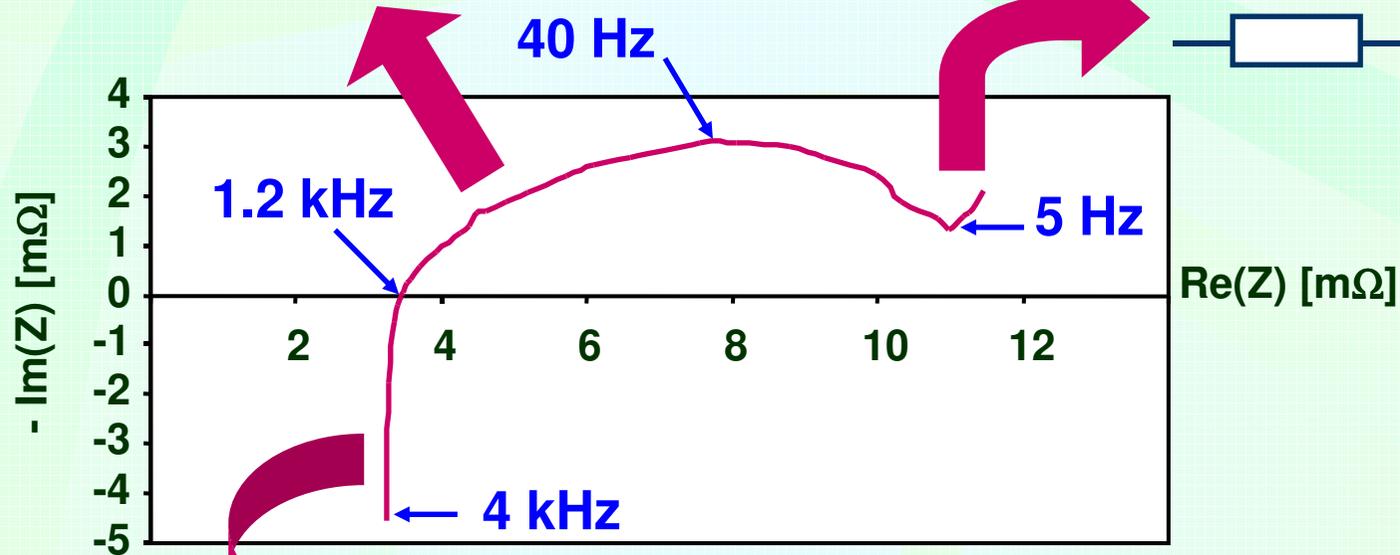


Modèle du CEA
- hydraulique
- thermique

3

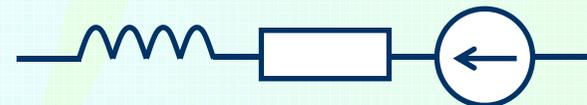


4



5

Circuit électrique équivalent



6

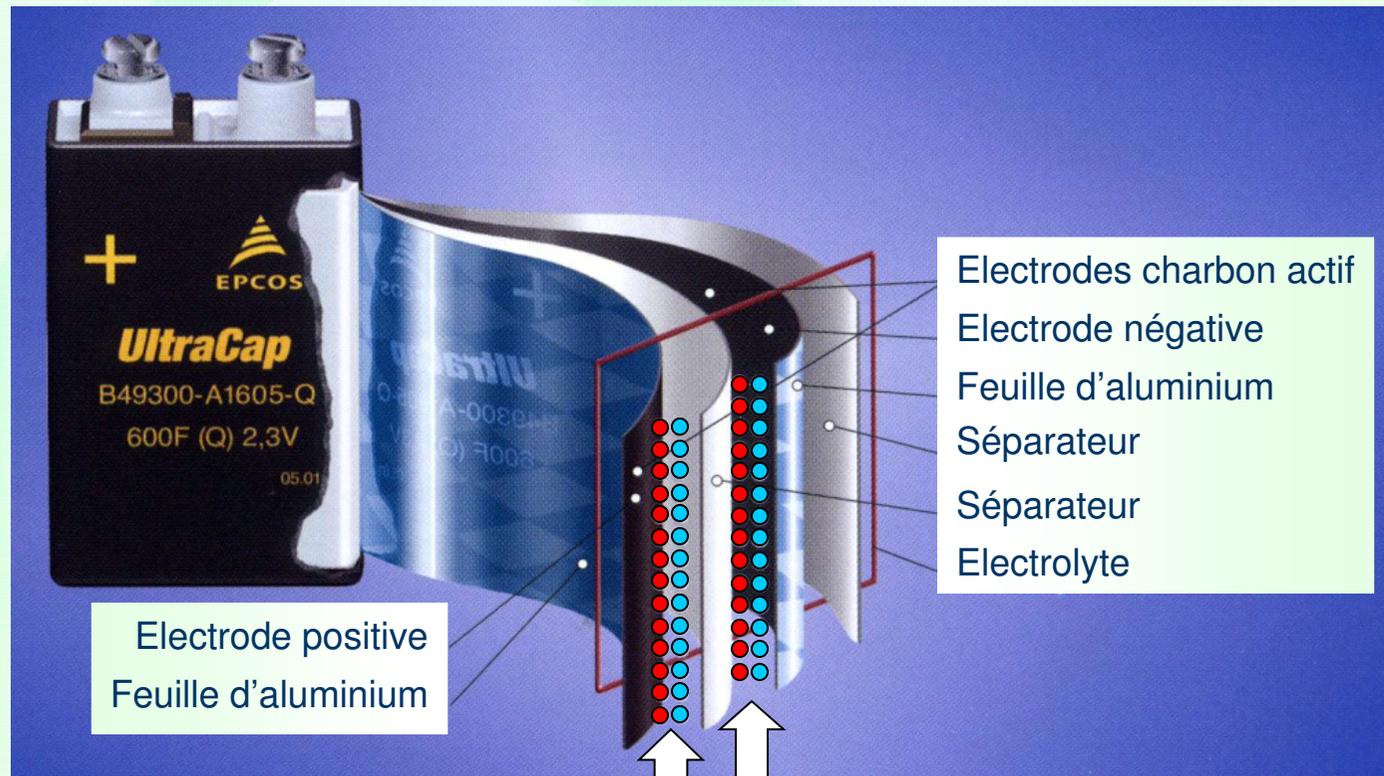
Plan de la présentation

- 1 Introduction et contexte de l'étude
- 2 La pile à combustible PEM (PAC PEM)
- 3 Les modèles de PAC
- 4 L'hybridation du GE à PAC en simulation**
- 5 Le démonstrateur RobotPAC
- 6 Conclusion et perspectives

L'hybridation du GE à PAC

La structure des supercondensateurs

1 Technologie des électrodes métal/carbone associées à un électrolyte organique non aqueux.



Double couche

1

2

3

4

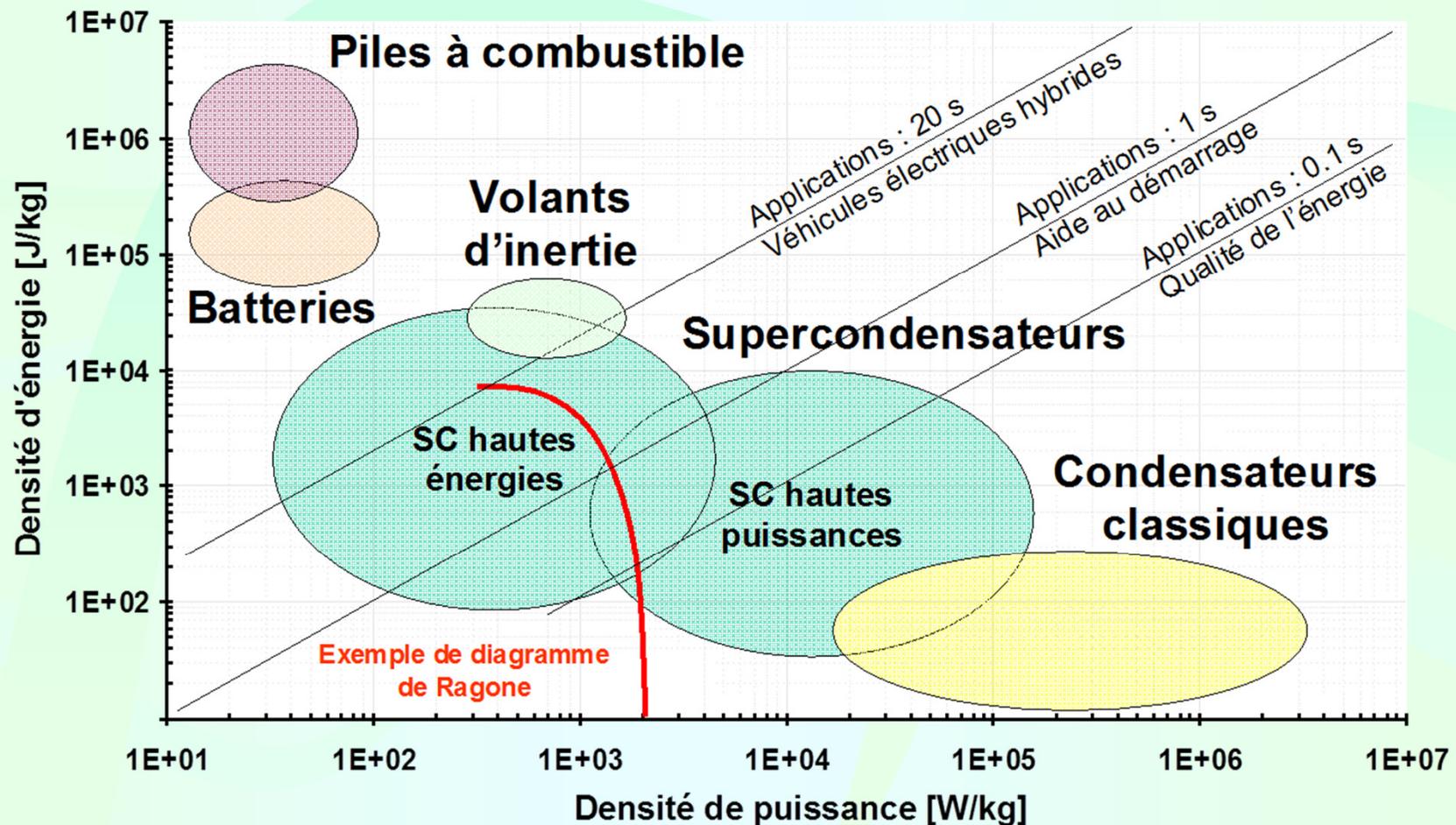
5

6

L'hybridation du GE à PAC

Les SC comparés à d'autres éléments de stockage

Les supercondensateurs peuvent délivrer et absorber des énergies importantes dans des durées très brèves.



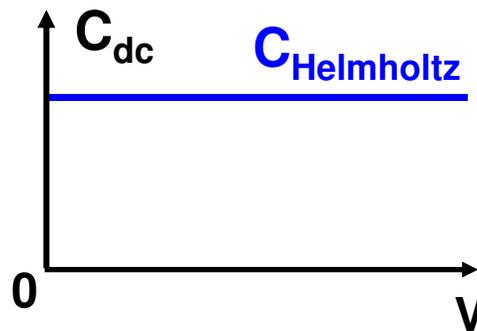
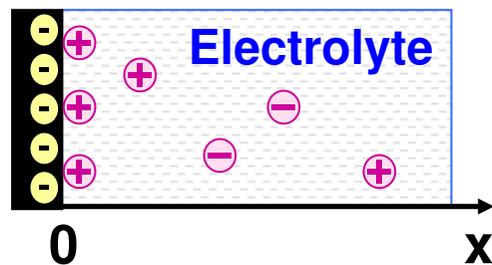
L'hybridation du GE à PAC

La double couche des supercondensateurs

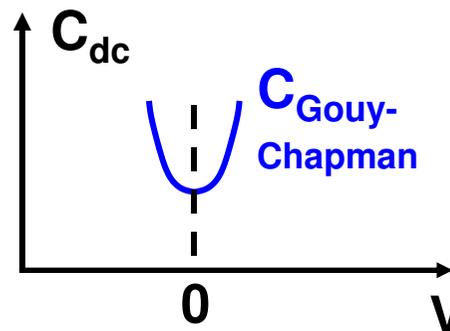
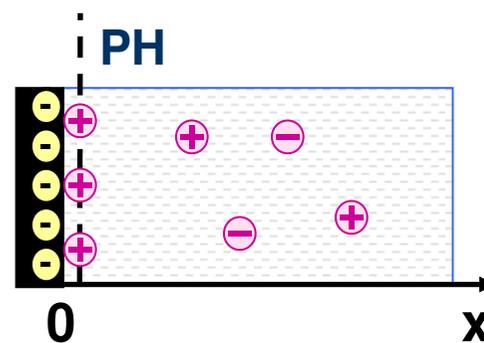
Il existe différents modèles :

Helmholtz

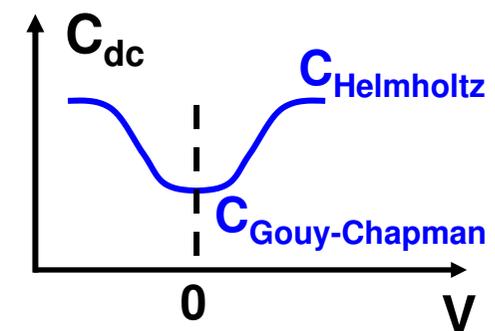
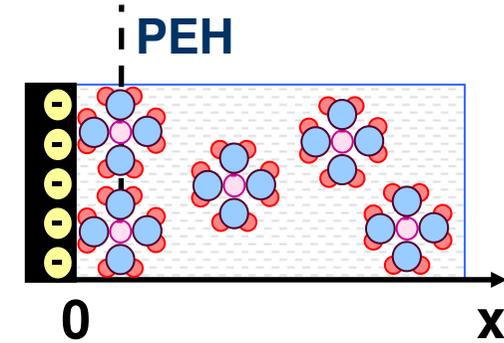
Electrode



Gouy-Chapman



Stern



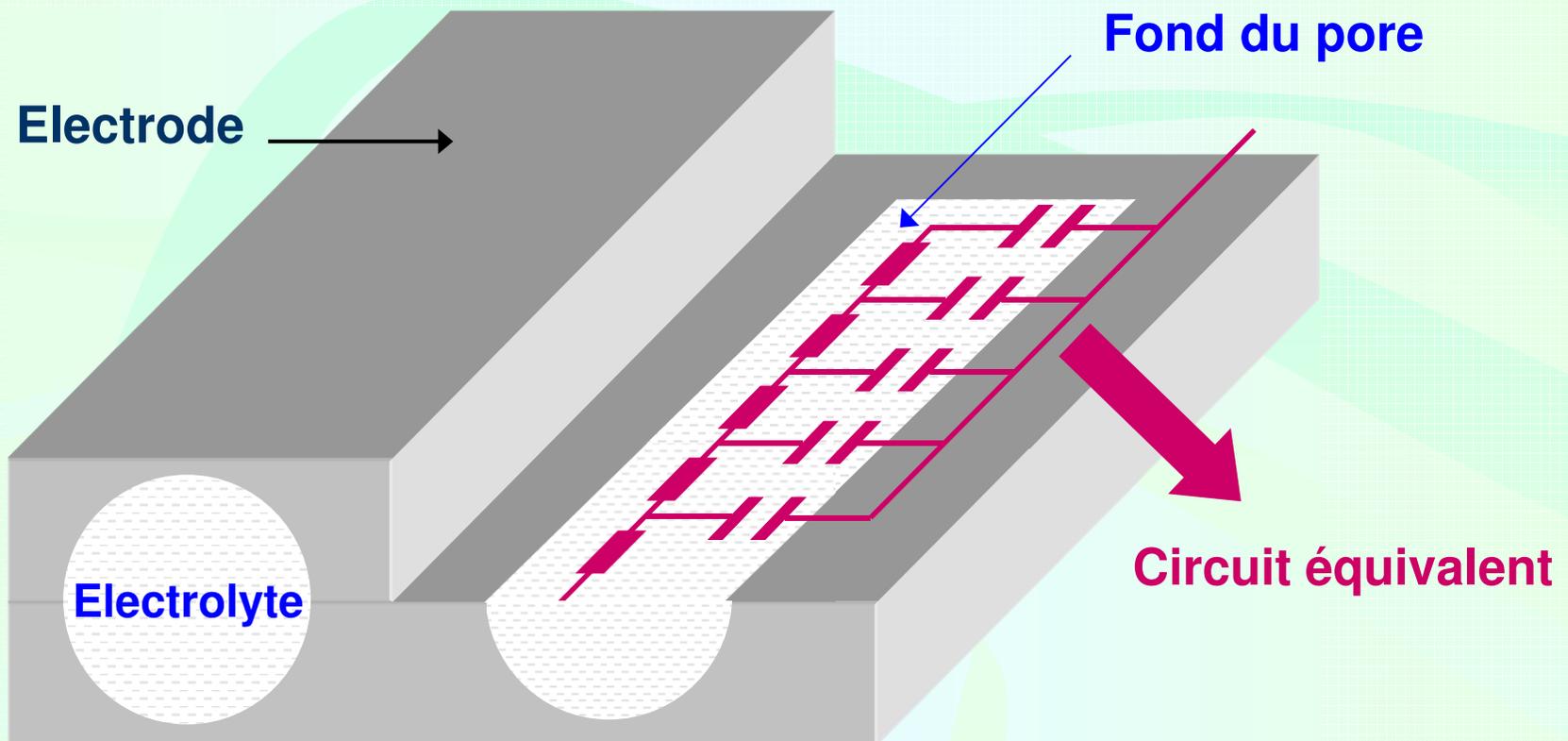
Dépendance de la capacité en fonction de la tension

L'hybridation du GE à PAC

L'électrode poreuse des supercondensateurs

1
2
3
4
5
6

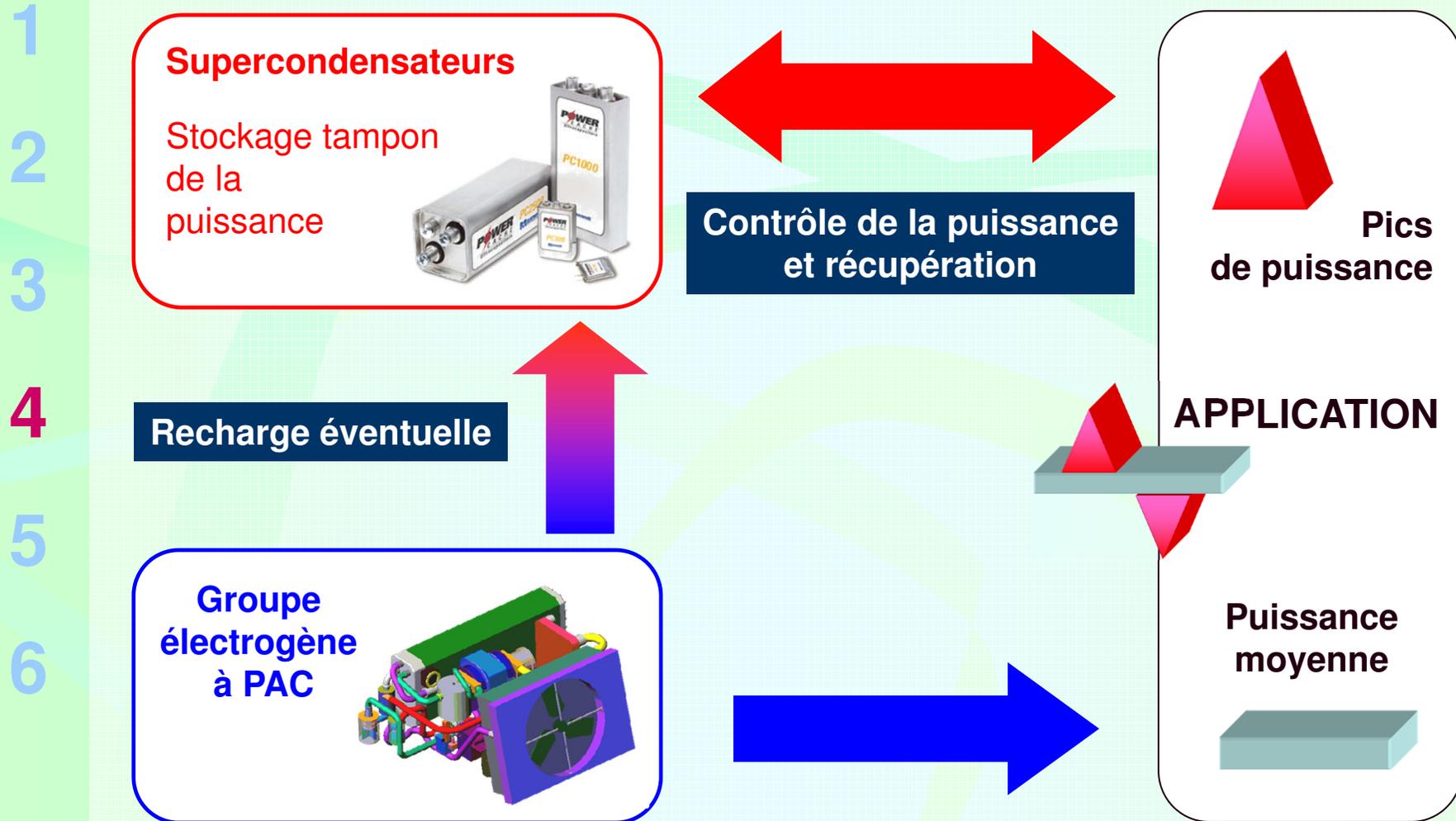
Comportement type ligne de transmission



Expression de l'impédance : $Z_{\text{poreux}}(\omega) = \sqrt{\frac{R_w}{j\omega C}} \coth\sqrt{j\omega R_w C}$

L'hybridation du GE à PAC

Principe de l'hybridation

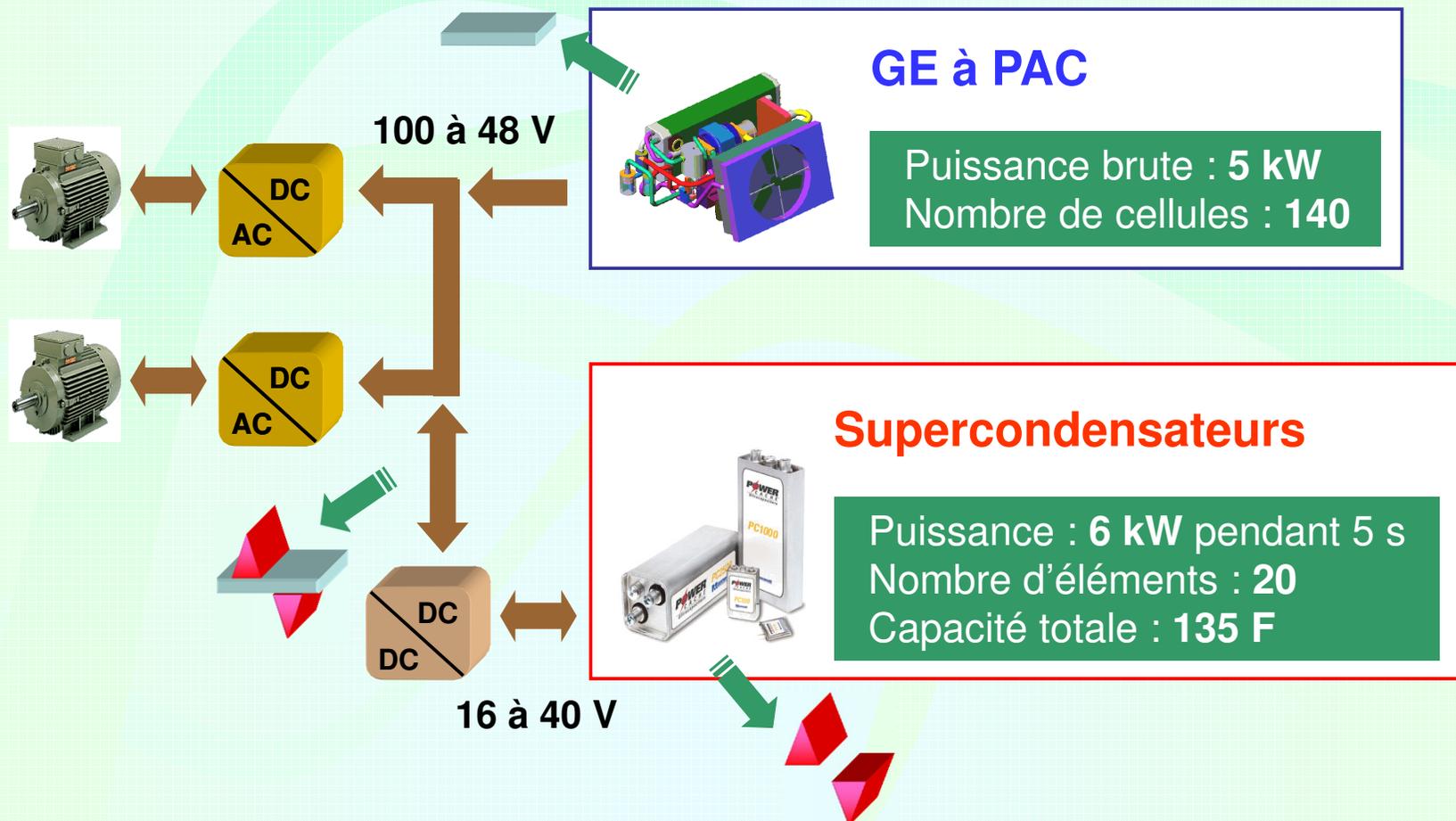


L'hybridation du GE à PAC en simulation QS

Chaîne de traction simulée

1 Véhicule pesant entre 250 kg et 300 kg
 Puissances moyenne et maximale de 2 et 10 kW environ.

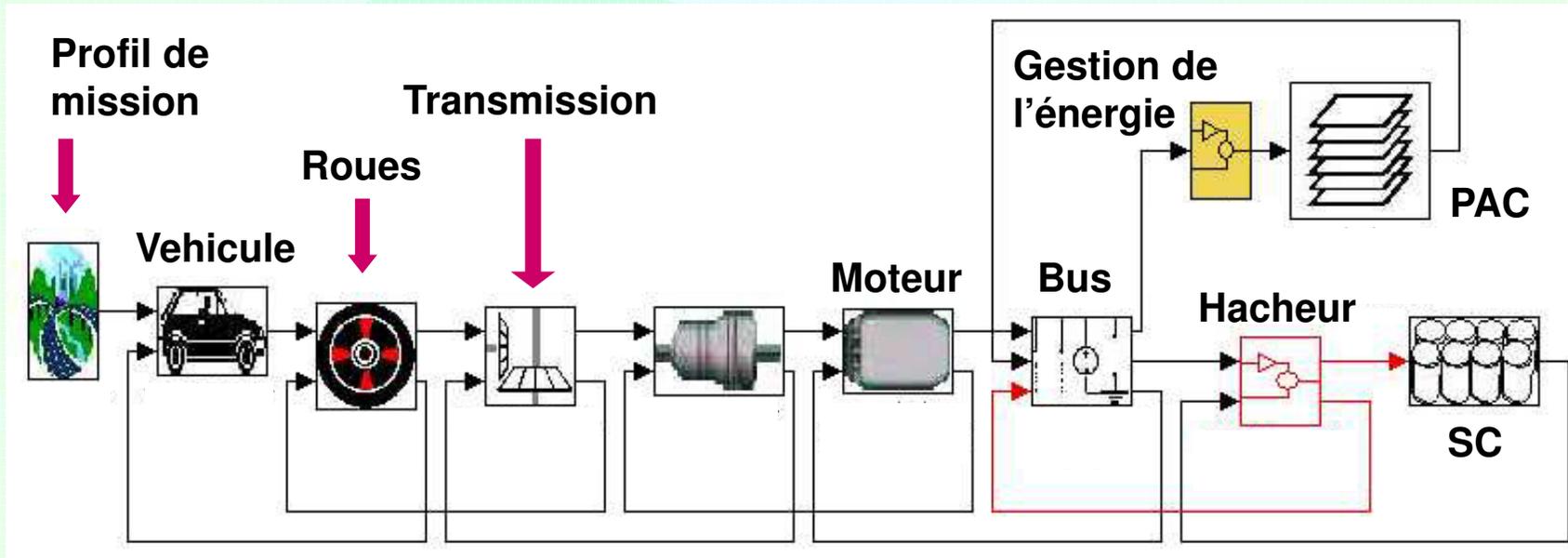
2
3
4
5
6



L'hybridation du GE à PAC en simulation QS

Le logiciel Advisor (NREL)

1 Modèles simplifiés quasi-statiques, semi-empiriques



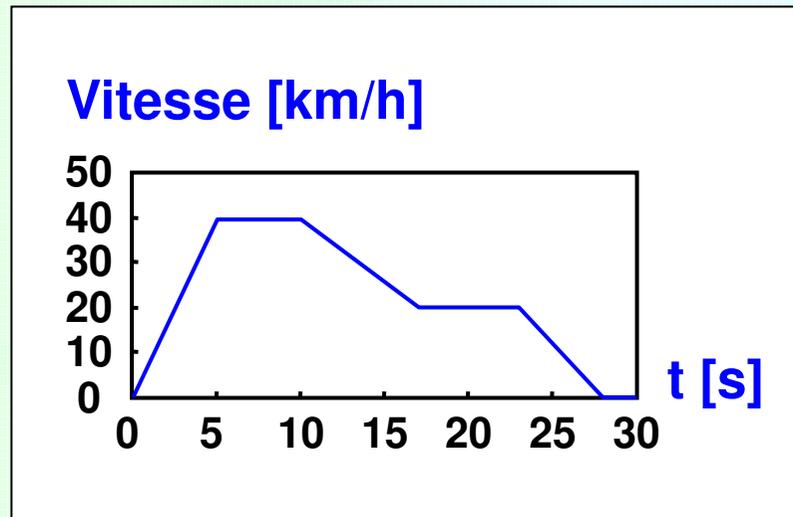
6 Logiciel particulièrement adapté pour la mise au point de stratégies de gestion de l'énergie dans les véhicules hybrides.

Dans l'environnement Matlab / Simulink.

L'hybridation du GE à PAC en simulation QS

Le logiciel Advisor (NREL)

1
2
3
4
5
6

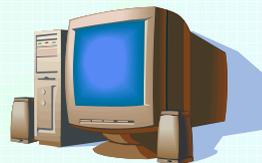


- vitesse effective
- consommation
- puissances
- grandeurs électriques
- etc

Profil de mission
Caractéristiques du véhicule

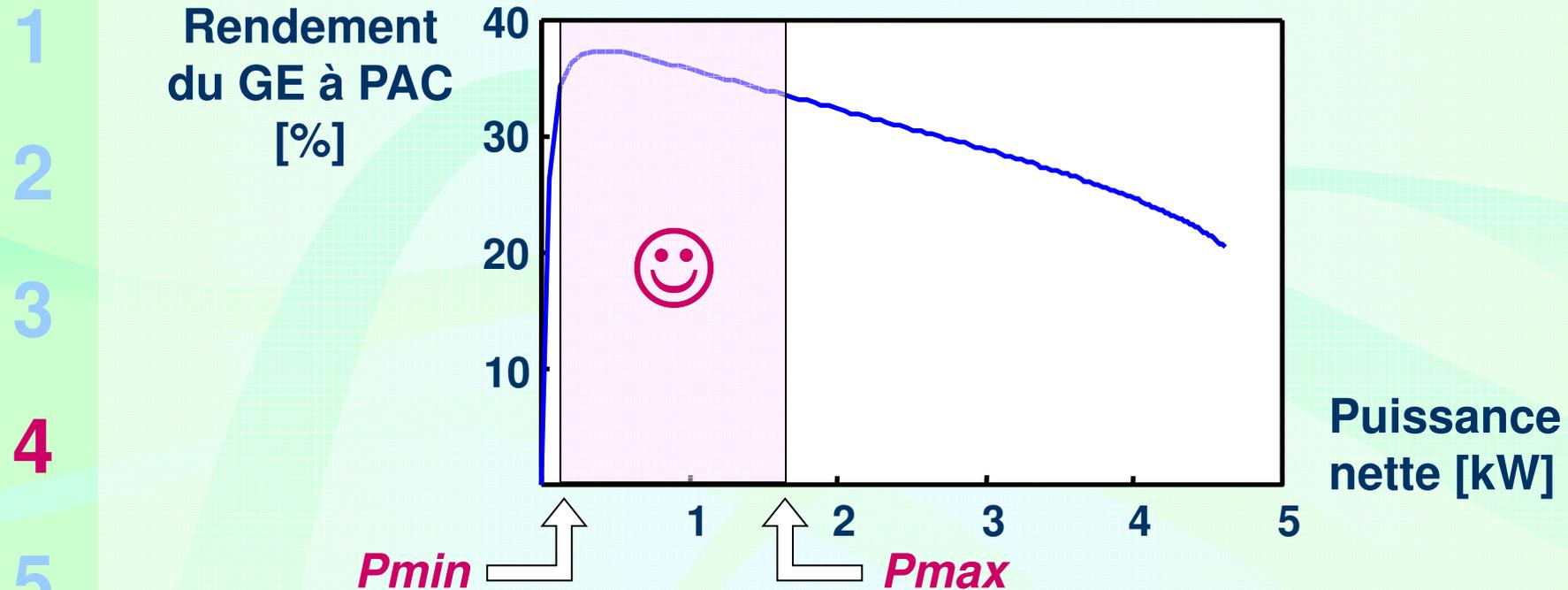
Résultats

Simulation



L'hybridation du GE à PAC en simulation QS

Principe de la première stratégie



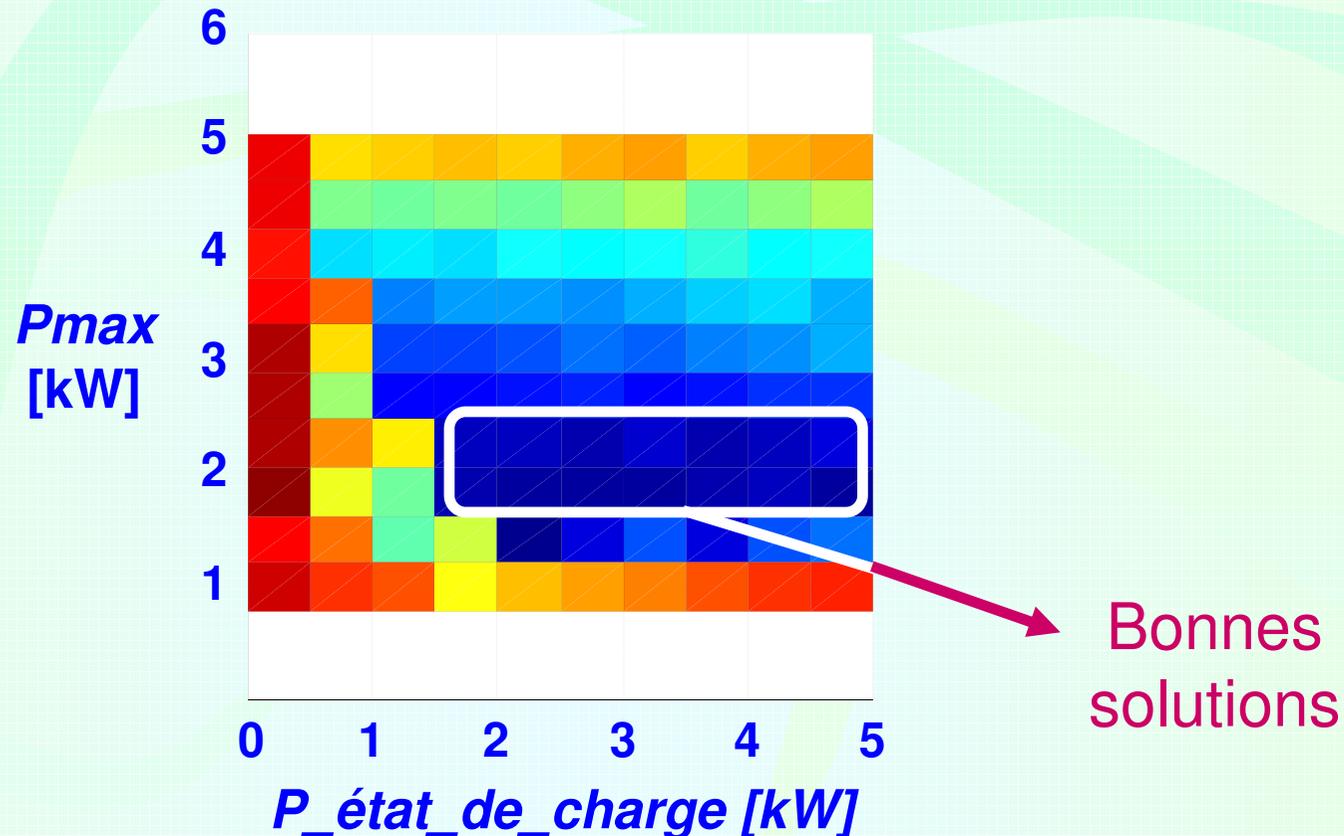
- Le GE à PAC doit fonctionner à charge partielle, là où le rendement est bon (P_{min} , P_{max})
- La puissance délivrée par le GE à PAC est ajustée de manière à réguler l'état de charge des supercondensateurs à 75% (variable $P_{état_de_charge}$)

L'hybridation du GE à PAC en simulation QS

Optimisation des paramètres de la stratégie

But : minimiser la consommation sur un profil de mission donné

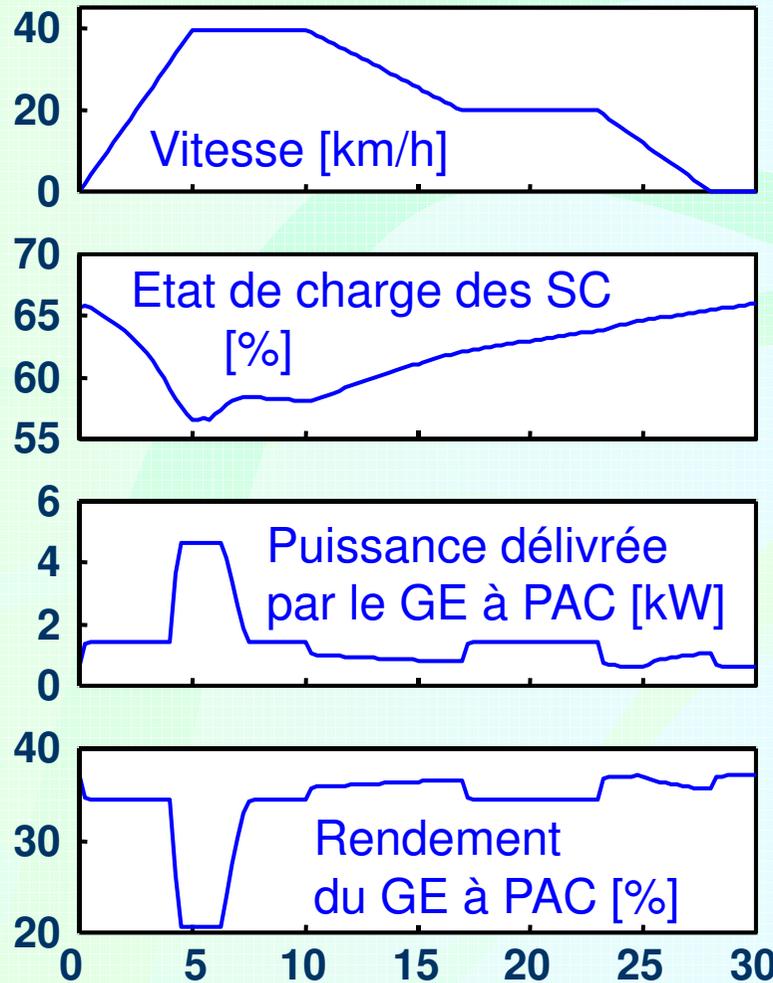
Réponses des routines affichées sous forme de surface :



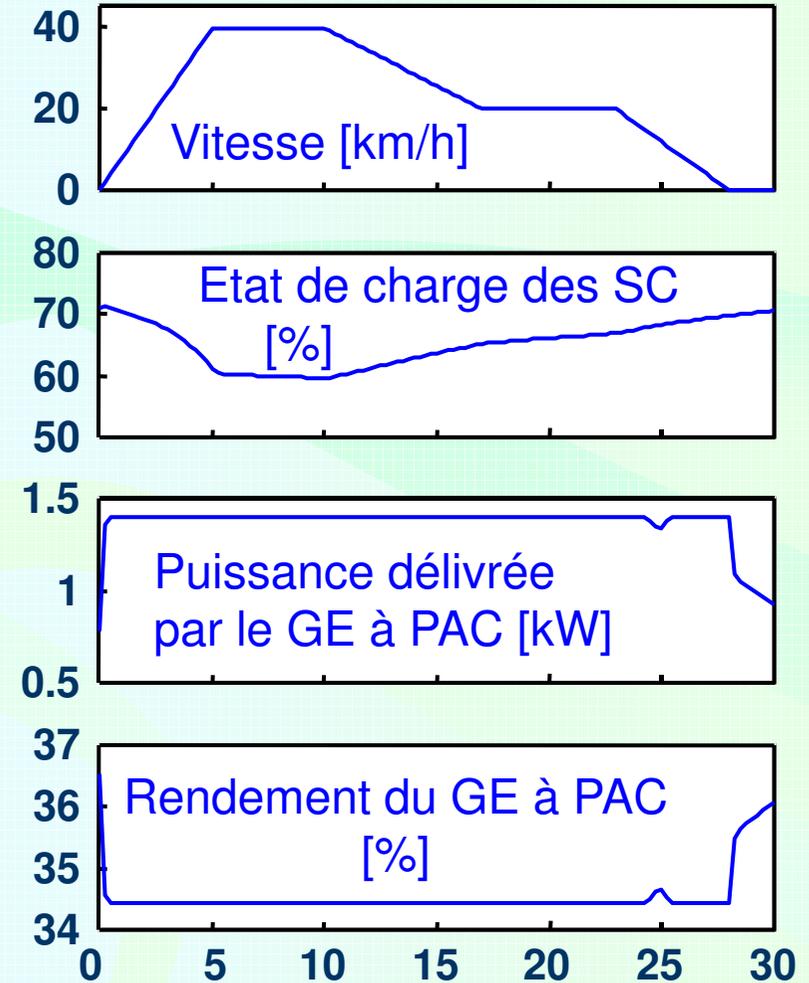
L'hybridation du GE à PAC en simulation QS

Exemple d'optimisation sur un profil de mission

1
2
3
4
5
6



Paramètres fixés sans optimisation
Consommation : 0,88 g d'H₂



Avec optimisation
Consommation : 0,74 g d'H₂

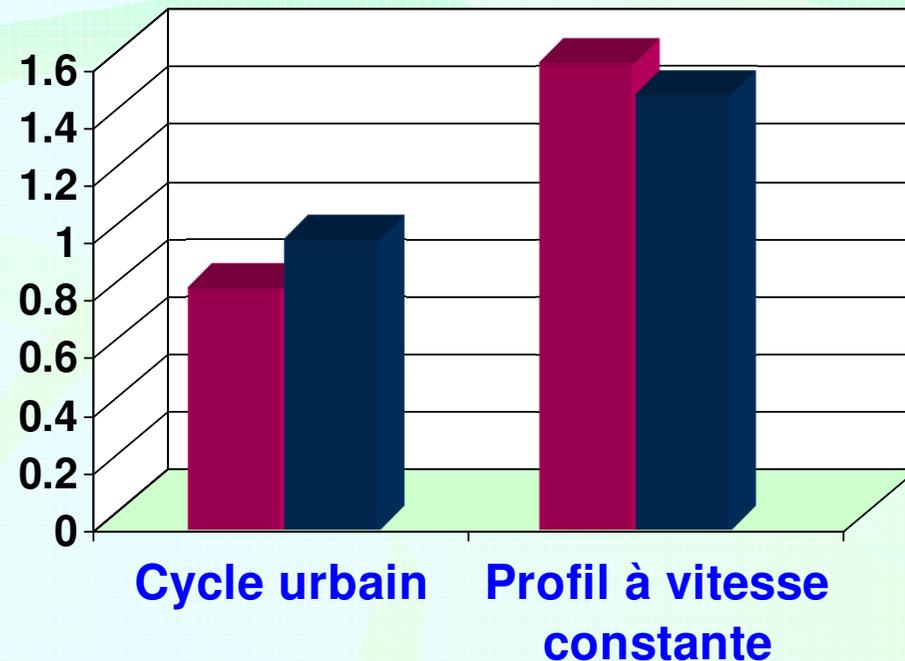
L'hybridation du GE à PAC en simulation QS

Taux d'hybridation

Deux véhicules de même masse sont comparés :

- hybride : PAC puissance brute 5 kW & banc de SC 135 F
- PAC seule : puissance brute de 10 kW

Consommation
en hydrogène [g]



L'hybridation présente un intérêt quand la dynamique de puissance est importante.

L'hybridation du GE à PAC en simulation QS

Seconde stratégie - principe

1

Basée sur une **minimisation instantanée**
de la consommation en H2

2

A chaque instant $i \in \{1 \dots n\}$, la puissance est répartie :

3



4

5

Objectif théorique : trouver $\{PGE\grave{a}PAC_1 \dots PGE\grave{a}PAC_n\}$
aboutissant à une consommation minimale optimale D_{min_opt} :

6

$$D_{min_opt} = \min (D_1 + \dots + D_n)$$

En pratique, le parcours n'est pas connu à priori. Donc :

$$D_{min} = \min (D_1) + \dots + \min(D_n)$$

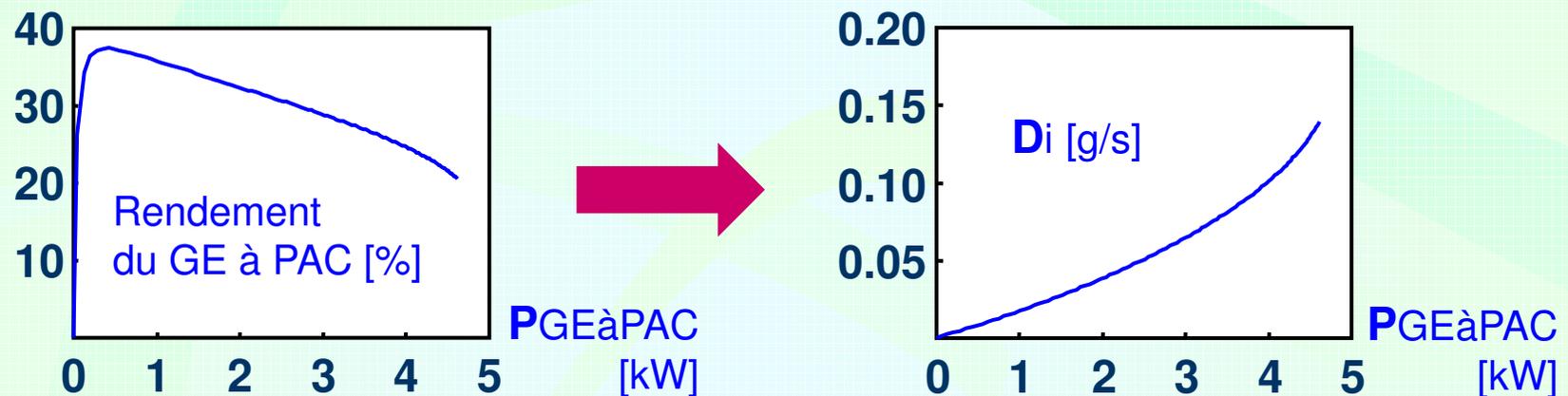
L'hybridation du GE à PAC en simulation QS

Seconde stratégie - principe

1 Pour chaque répartition de puissance, une consommation totale équivalente est calculée :

2 $Dequi_tot_i = D_i + Dequi_SC_i$ avec :

3 ■ D_i consommation instantanée réelle en H_2



■ $Dequi_SC_i$ consommation équivalente moyenne des SC

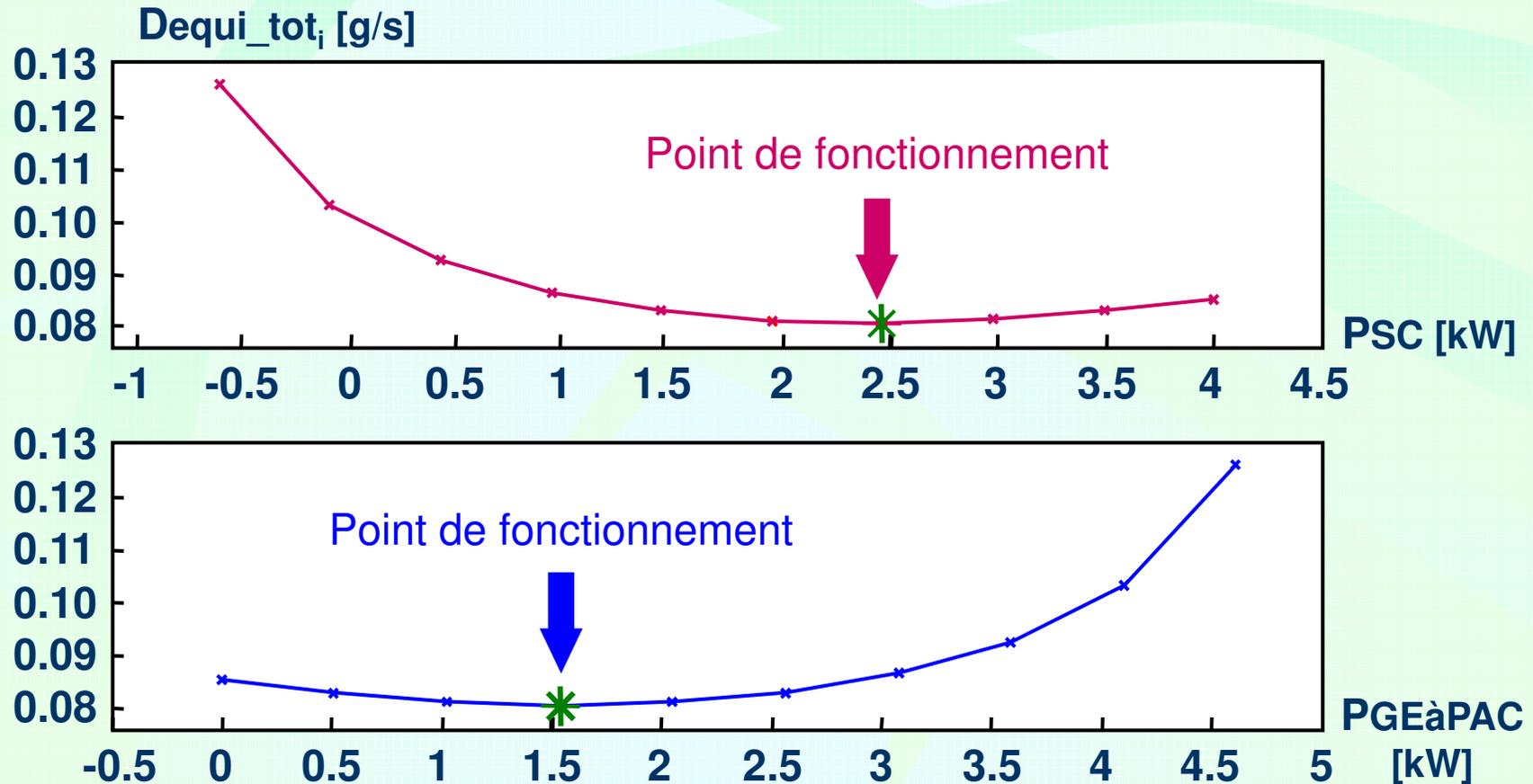
$Dequi_SC_i = D_i(PGE\grave{a}PAC_{moy}) \times dt_{moy} / 0.9$ avec :

$dt_{moy} = PSC_i / PGE\grave{a}PAC_{moy}$

L'hybridation du GE à PAC en simulation QS

Seconde stratégie - principe

1 A chaque instant i , 10 répartitions de puissance sont envisagées.
 2 On retient celle qui mène à $Dequi_tot_i$ la plus faible.
 3 Pour $PGMP_i = 4$ kW et état de charge des SC élevé :



L'hybridation du GE à PAC en simulation QS

Seconde stratégie - principe

- 1 ■ La consommation sur le cycle sera égale à :

$$\text{Dequi_tot_min} = \min(\text{Dequi_tot}_1) + \dots + \min(\text{Dequi_tot}_n)$$

- 2 ■ La stratégie peut conduire à une dérive de l'état de charge si la valeur de $\text{PGE}\text{\grave{a}}\text{PAC}_{\text{moy}}$ n'est pas adaptée au cycle.

3 On régule alors l'état de charge en s'écartant plus ou moins de la distribution idéale de puissance GE à PAC / SC.

4 Exemple : état de charge des SC élevé

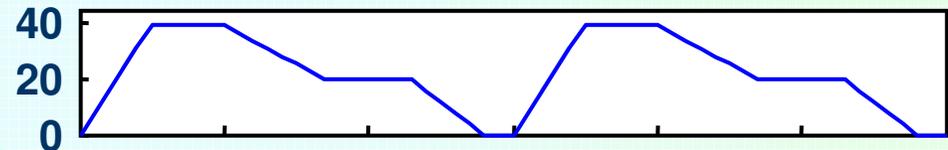


L'hybridation du GE à PAC en simulation QS

Seconde stratégie - principe

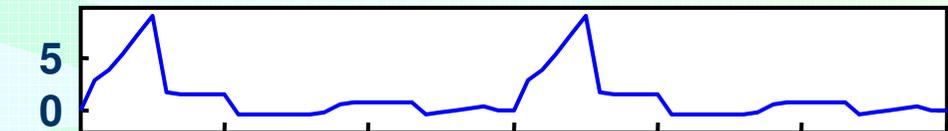
1

Vitesse [km/h]



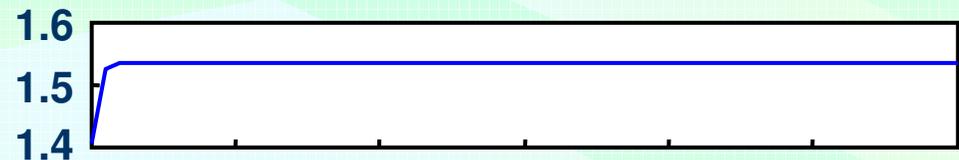
2

Puissance
GMP [kW]



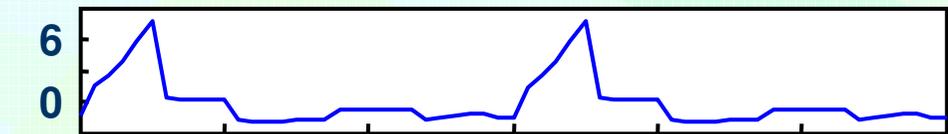
3

Puissance
GE à PAC [kW]



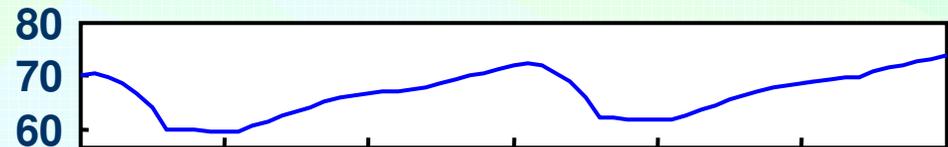
4

Puissance
SC [kW]



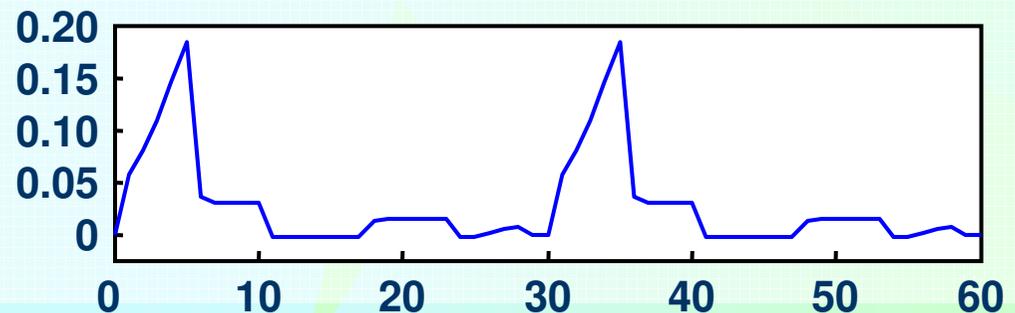
5

Etat de charge
des SC [%]



6

Consommation
instantanée
totale équivalente [g/s]

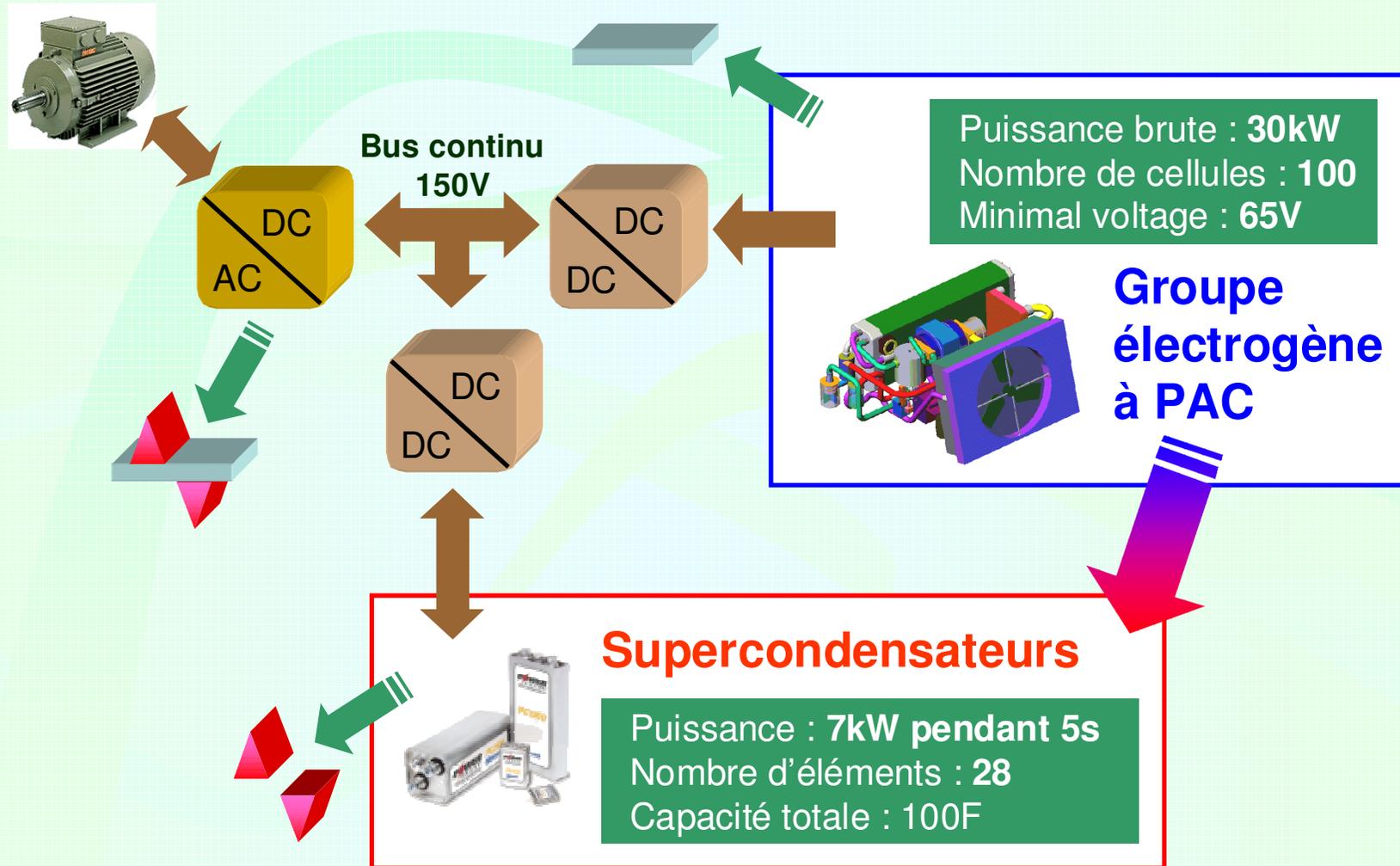


L'hybridation du GE à PAC

Simulation en dynamique

■ Architecture de la chaîne de traction :

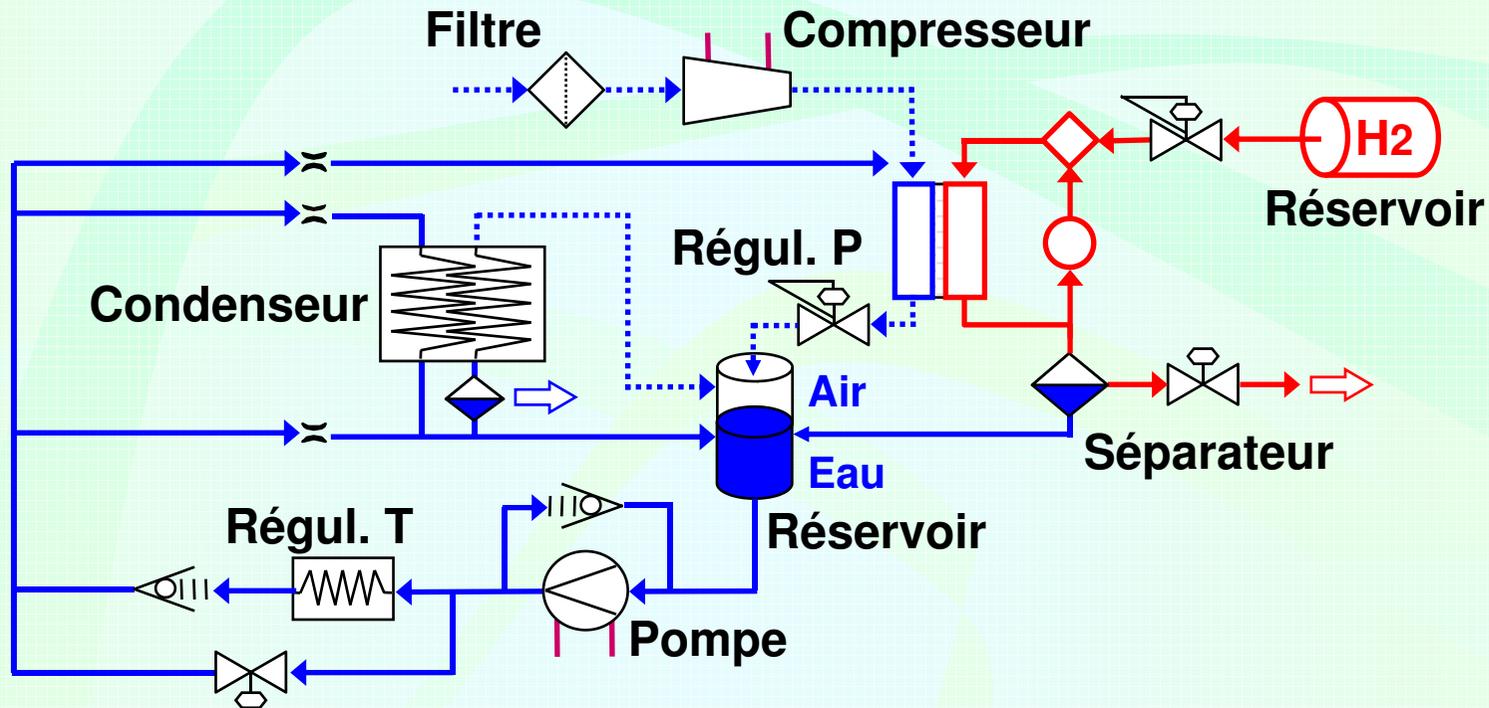
1
2
3
4
5
6



L'hybridation du GE à PAC en simulation dyn.

Modélisation par le CEA du GE à PAC

1 Modélisation dynamique des phénomènes de types hydraulique, thermique, électrochimique, mécanique et électrique.



Remarque : La dynamique du GE à PAC est essentiellement limitée par le compresseur.

L'hybridation du GE à PAC en simulation dyn.

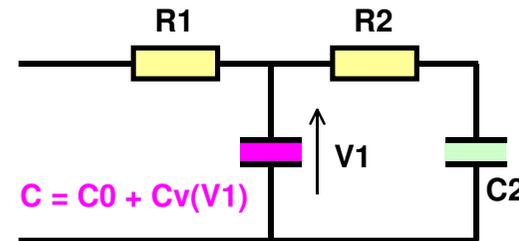
Modélisation des autres éléments

1

Supercondensateurs



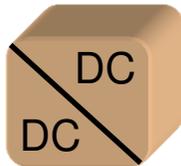
Circuit
équivalent



2

3

Convertisseurs



Modèle énergétique et thermique
Calcul des pertes dans les IGBT

4

5

Moteurs



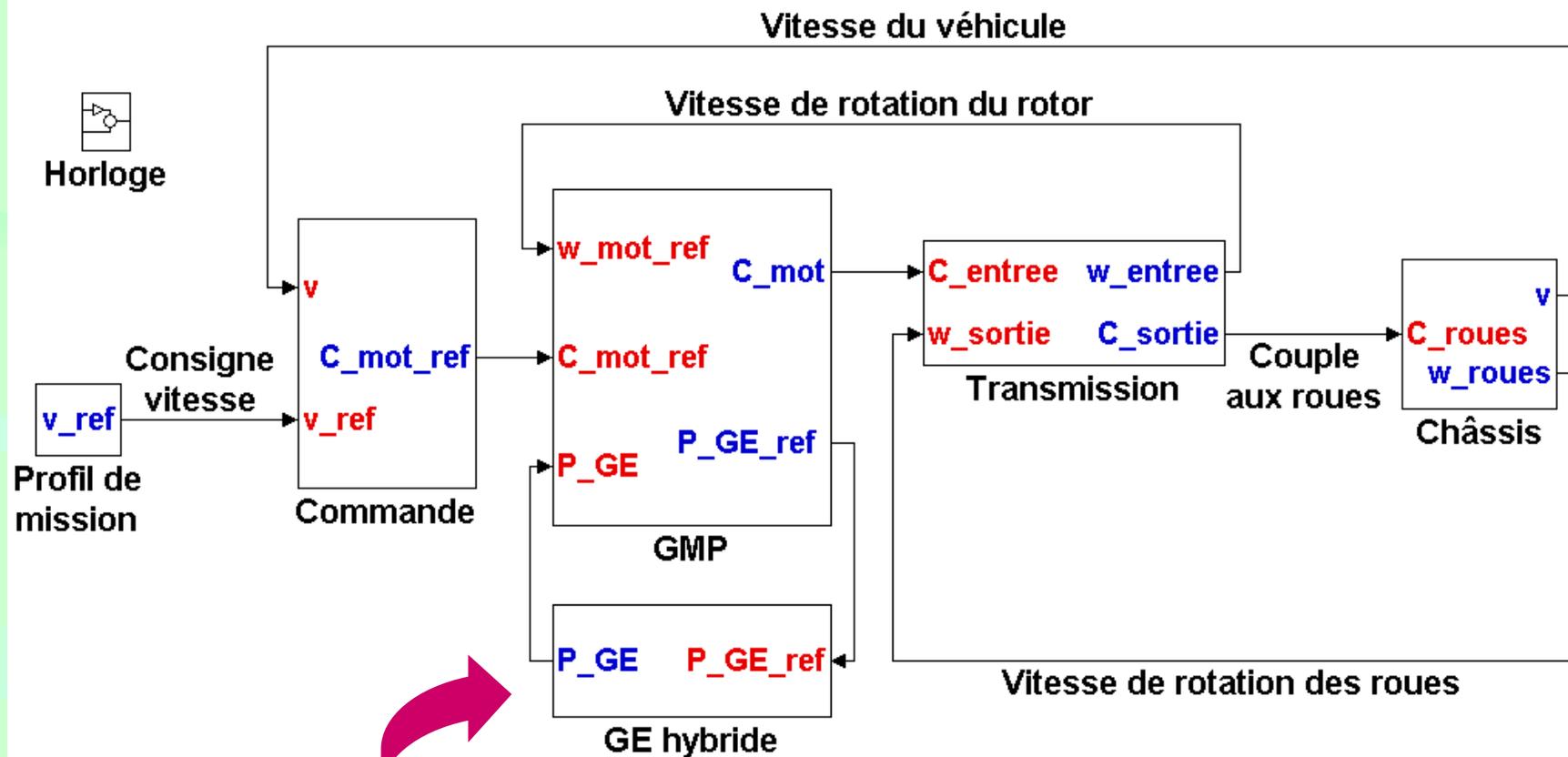
- Modèle quasi-statique construit à partir d'une cartographie
- Modèle dynamique MCC ou DC brushless

6

L'hybridation du GE à PAC en simulation dyn.

Modèle de la chaîne de traction

■ Niveau 1 du modèle de la chaîne de traction

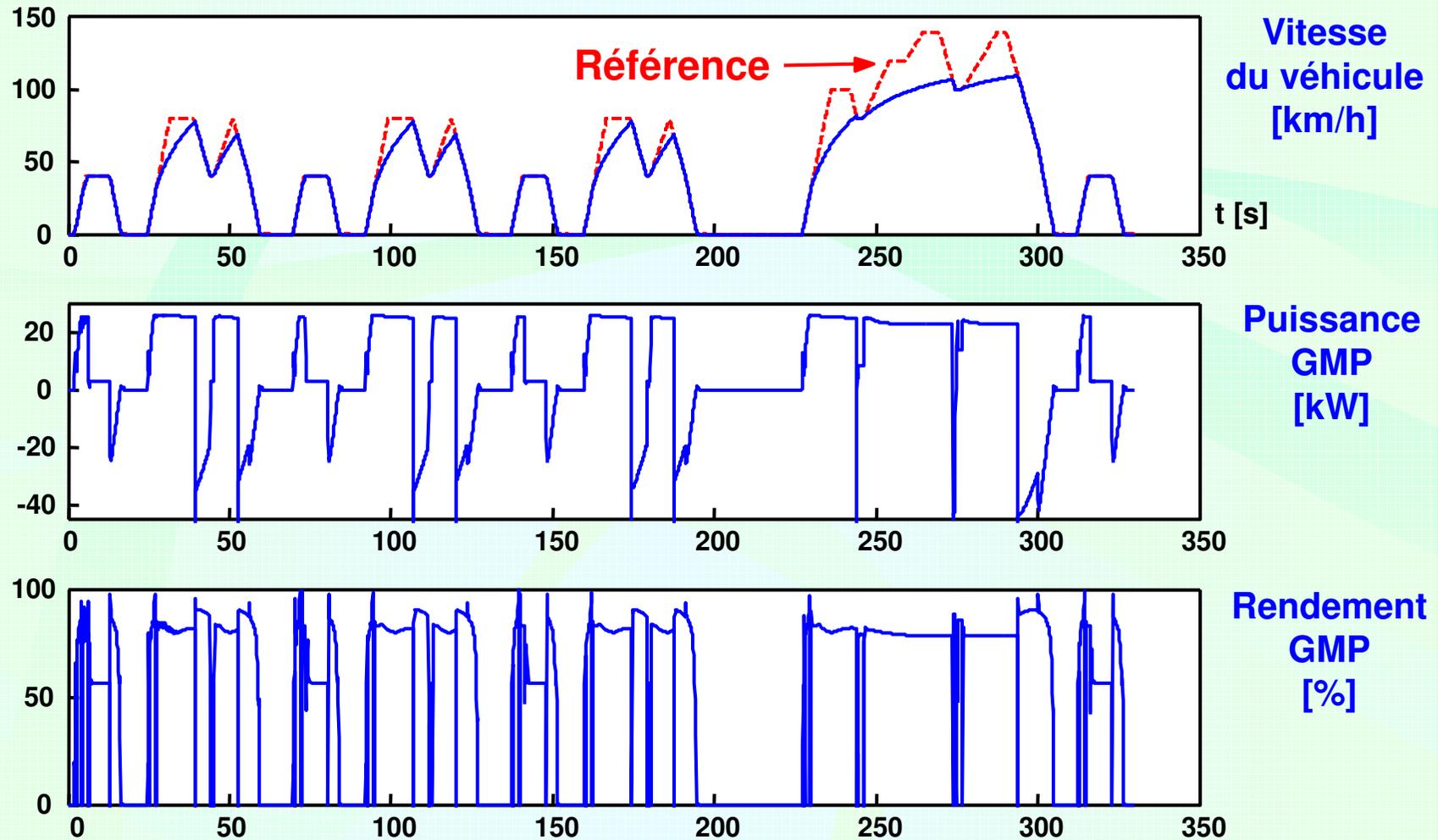


Stratégie développée à partir d'Advisor puis implantée dans notre outil de simulation

L'hybridation du GE à PAC en simulation dyn.

Résultats sur un profil de mission donné

1
2
3
4
5
6



L'hybridation du GE à PAC en simulation dyn.

Distribution des puissances

1

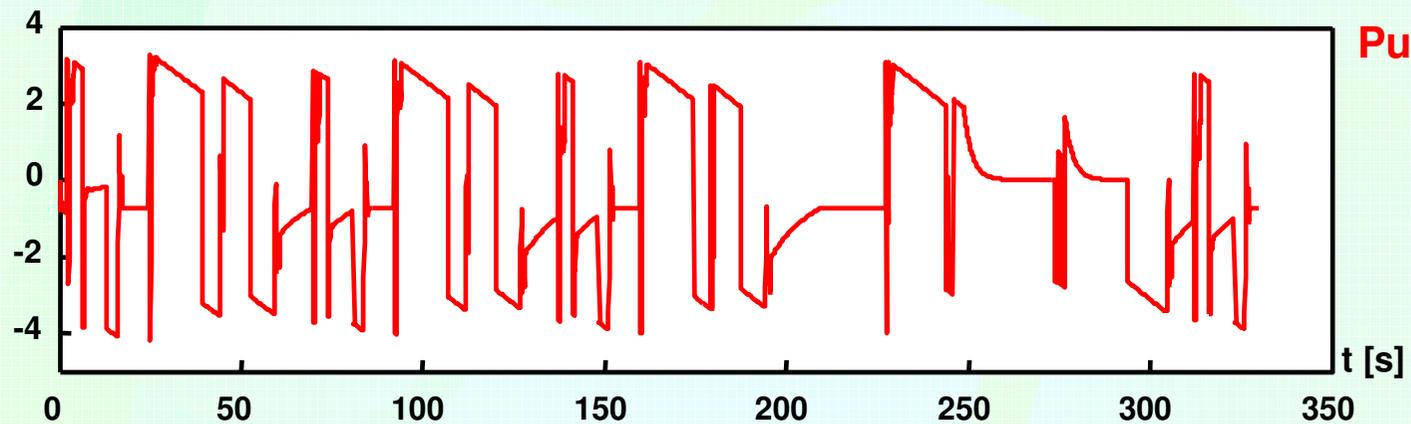
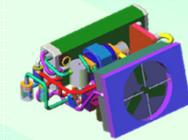
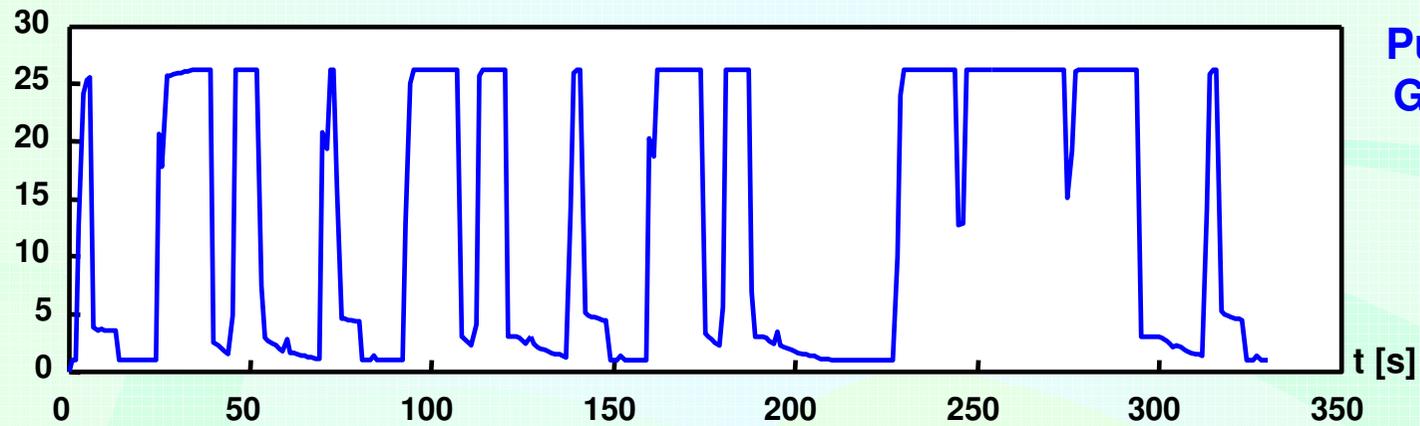
2

3

4

5

6

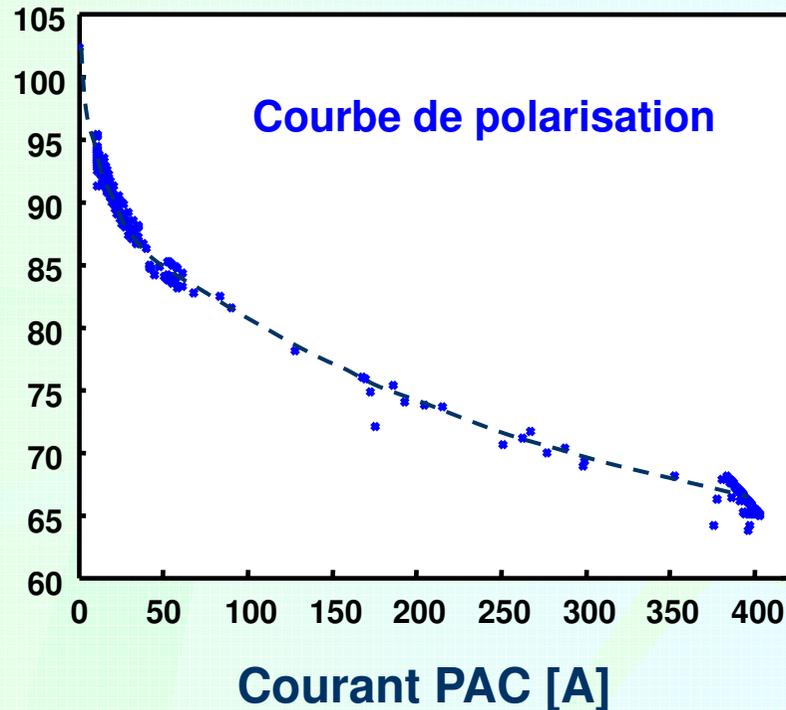


L'hybridation du GE à PAC en simulation dyn.

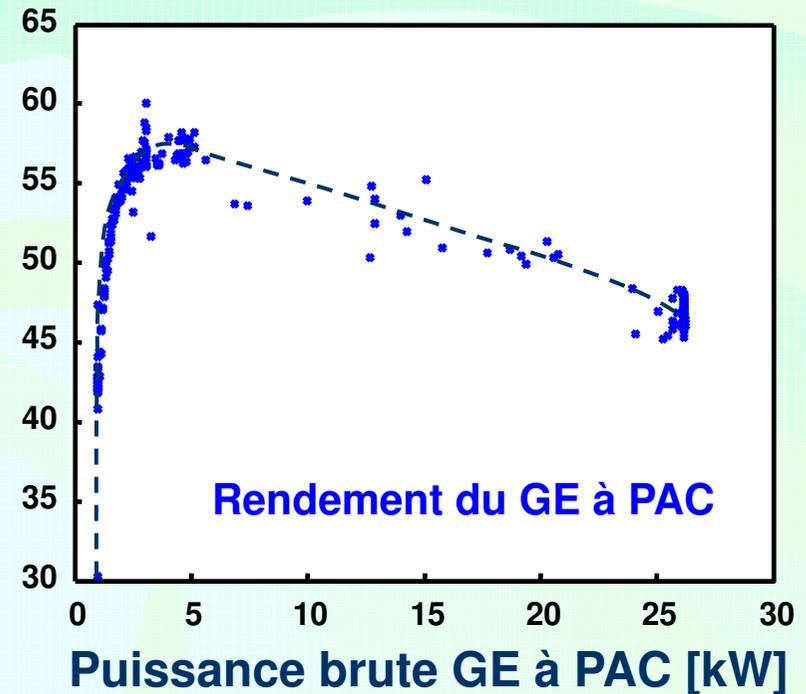
Points de fonctionnement en dynamique

1
2
3
4
5
6

Tension de pile [V]



Rendement [%]



Ces courbes illustrent l'importance des phénomènes transitoires.

L'hybridation du GE à PAC en simulation dyn.

Grandeurs liées aux supercondensateurs

1

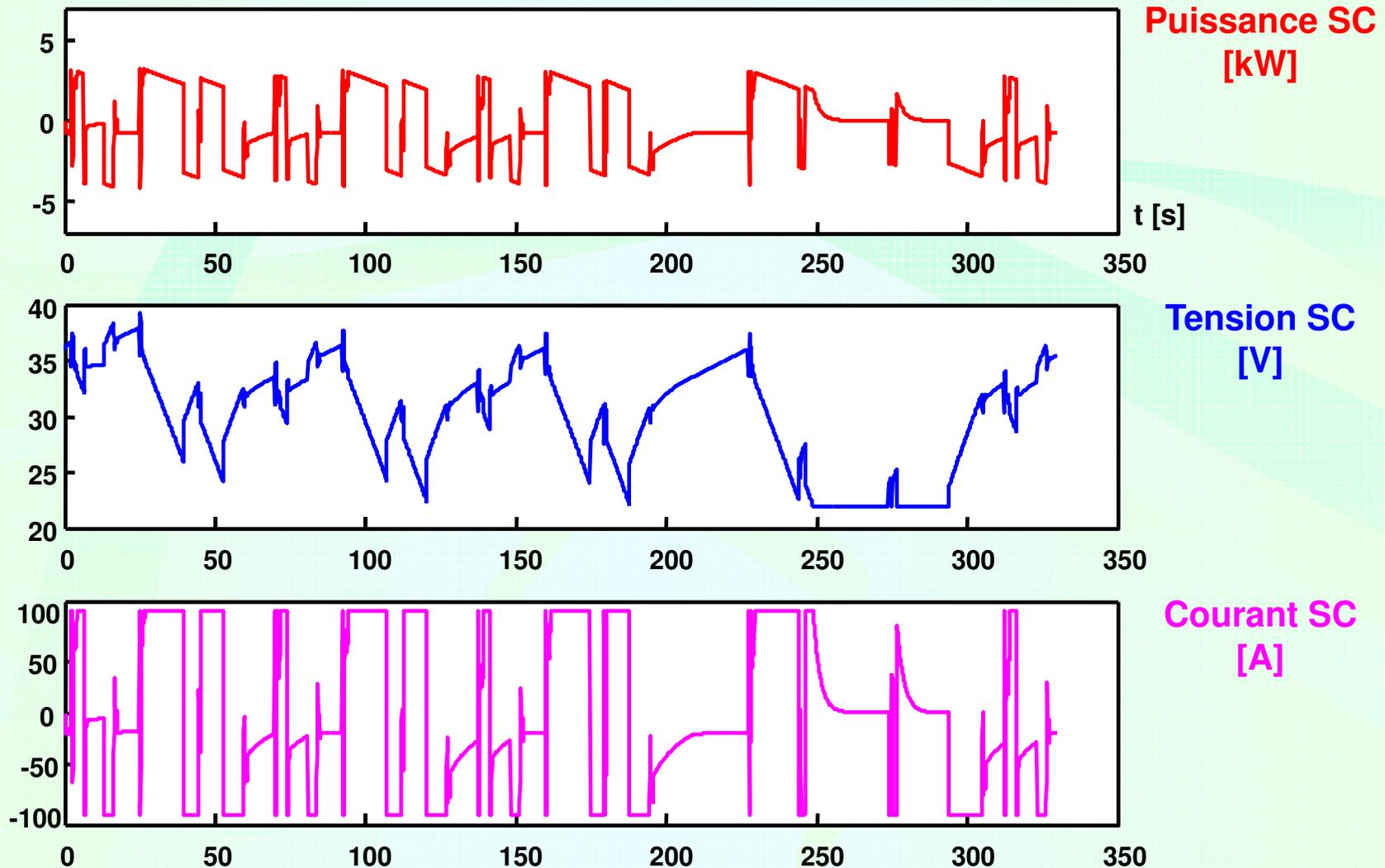
2

3

4

5

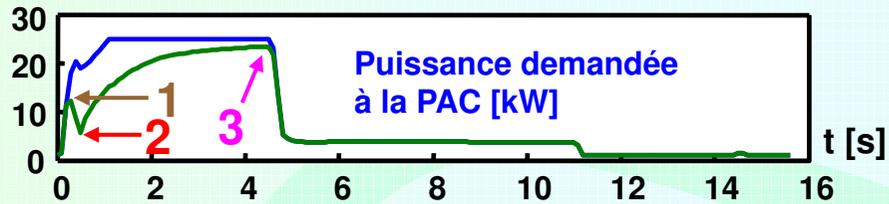
6



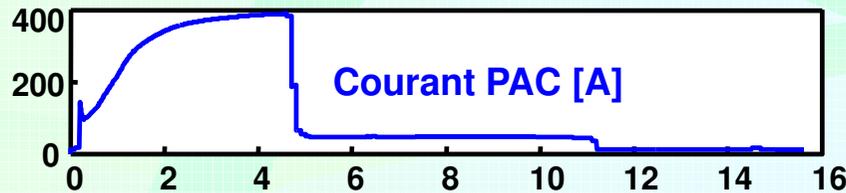
L'hybridation du GE à PAC en simulation dyn.

Cas particulier du démarrage

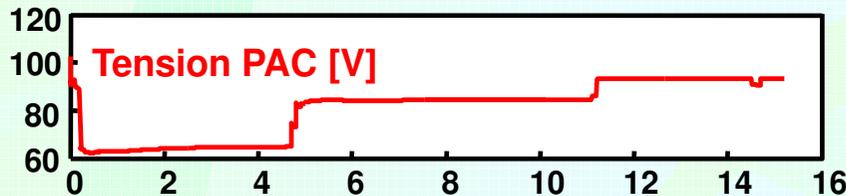
1



2

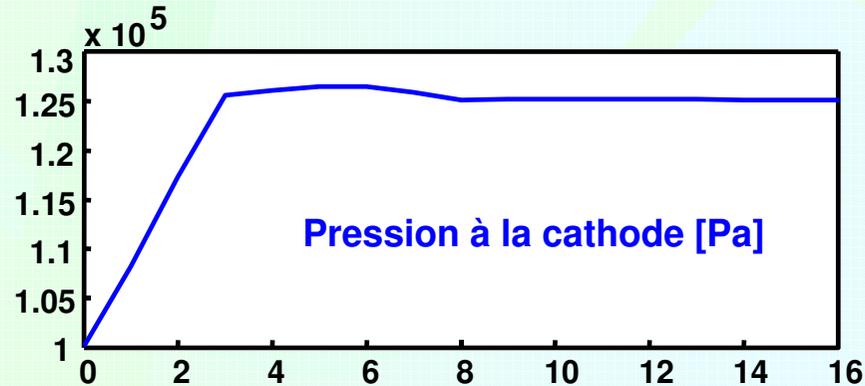


3



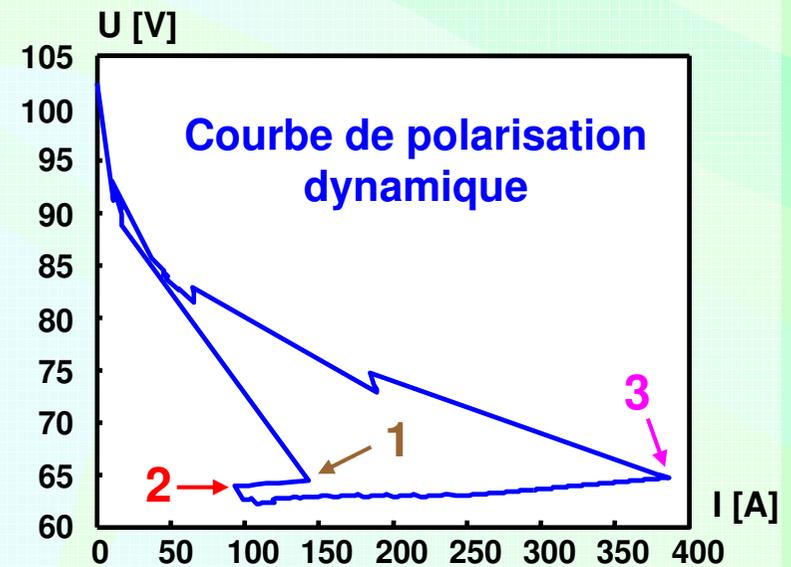
4

5



6

- Le courant de consigne de la PAC est déterminé de façon à ce que la tension de pile soit supérieure à 65V



L'hybridation du GE à PAC en simulation dyn.

Intérêt de l'hybridation

1

- Récupération de l'énergie

2

- Evite un fonctionnement à très faible charge du GE à PAC

3

- Facilite le démarrage

4

- Améliore la dynamique de puissance de la source d'énergie

5

- Prend en charge une partie des transitoires de puissance

6

- Dans notre cas, le surplus de masse n'est pas trop pénalisant

Contrepartie : complexité accrue

Plan de la présentation

- 1 Introduction et contexte de l'étude
- 2 La pile à combustible PEM (PAC PEM)
- 3 Les modèles de PAC
- 4 L'hybridation du GE à PAC en simulation
- 5 Le démonstrateur RobotPAC**
- 6 Conclusion et perspectives

Le démonstrateur RobotPAC

Architecture électrique du démonstrateur

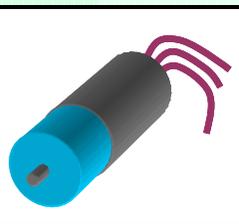
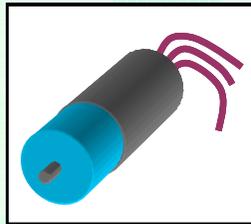
Quelques caractéristiques :

Masse : 30 kg

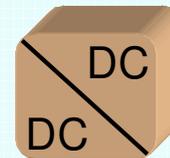
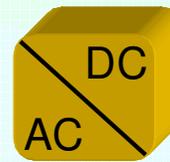
Vitesse maxi. : 0.8 m/s

Accélération maxi. : 1 m/s²

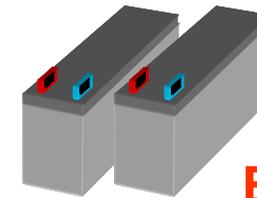
Moteur 1



Moteur 2

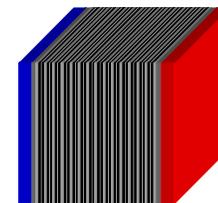


24 V



Batteries

Tension : 2 × 12 V
Capacité : 2 × 25 Ah



PAC

Tension : 14 à 7 V
Puissance : 240 W

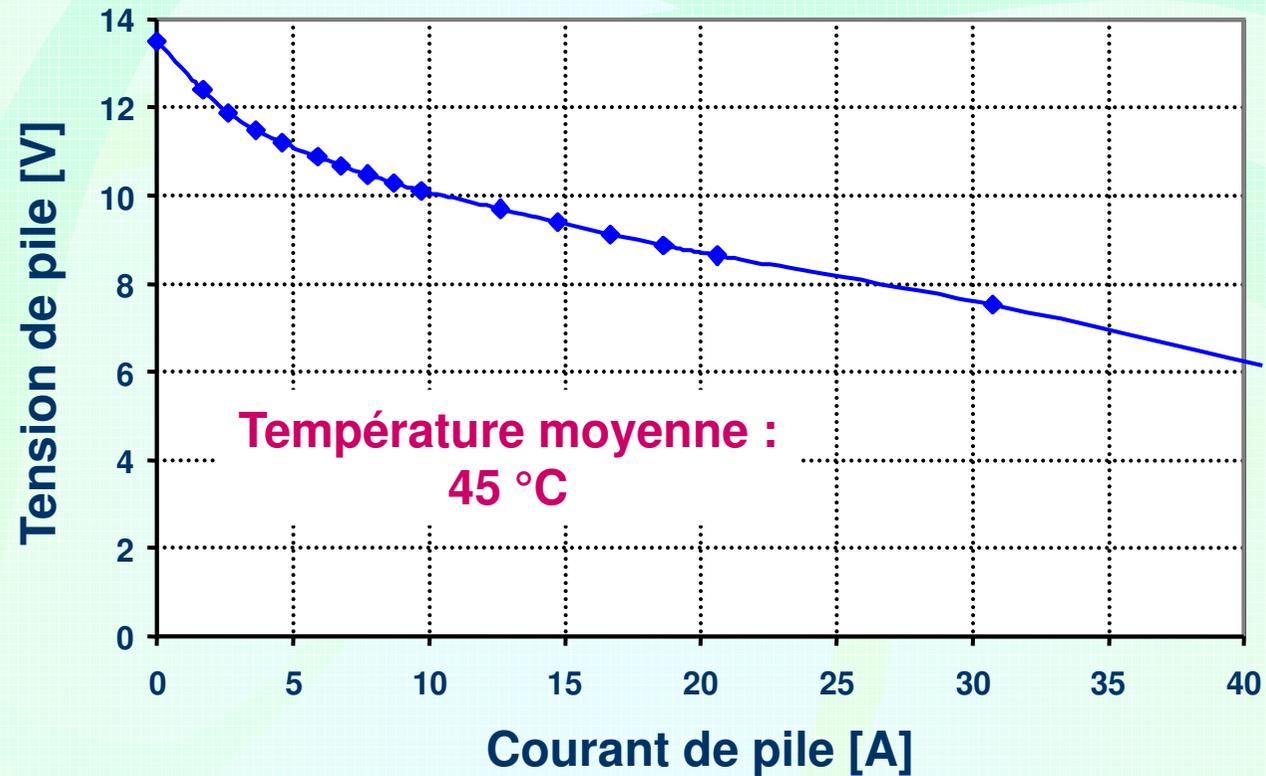
1
2
3
4
5
6

Le démonstrateur RobotPAC

Description de la pile PEM

1
2
3
4
5
6

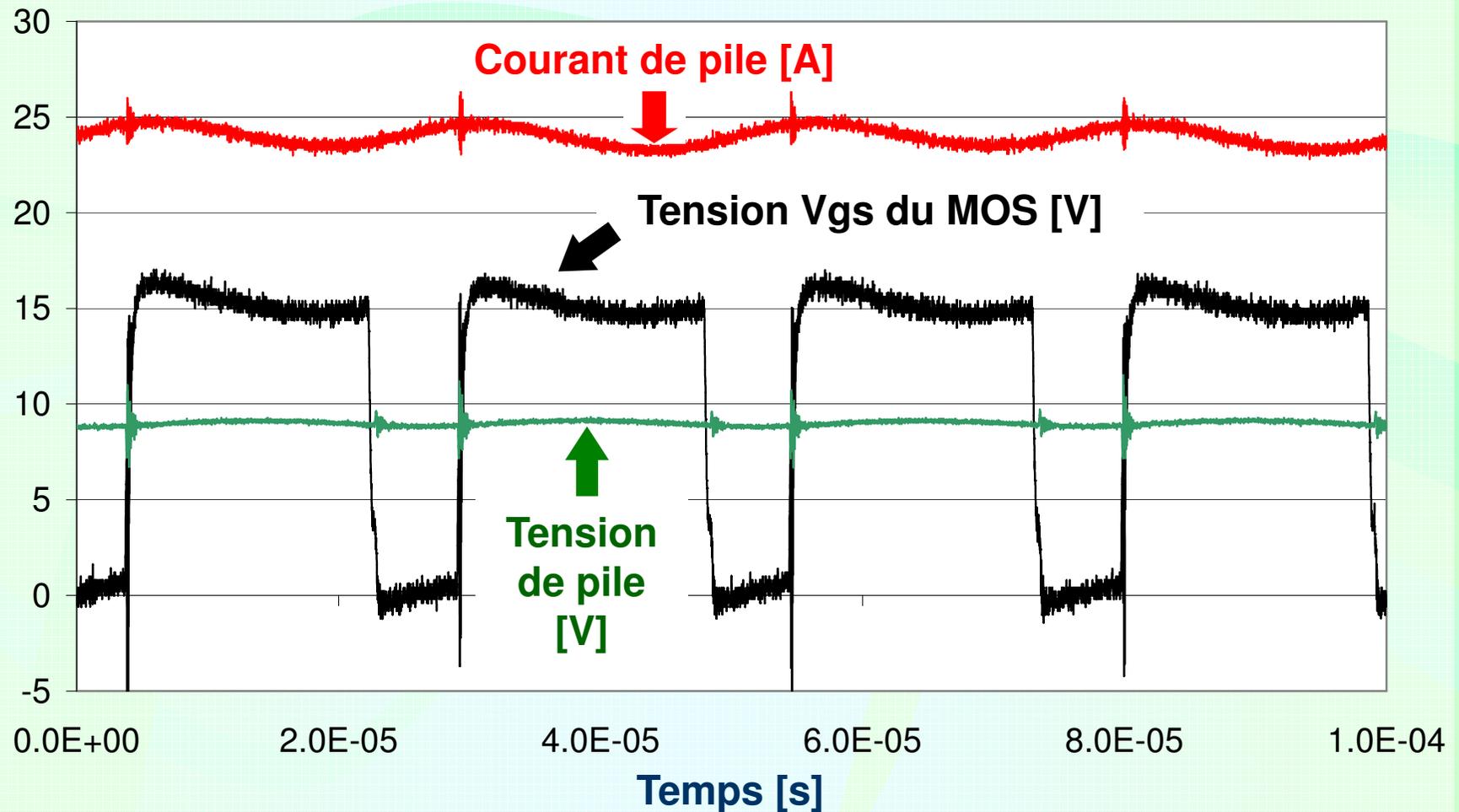
La pile est alimentée en oxygène et hydrogène purs sous 4 bars.
La pile comporte 14 cellules de surface active 60 cm².



Le démonstrateur RobotPAC

Formes d'ondes dans le circuit électrique

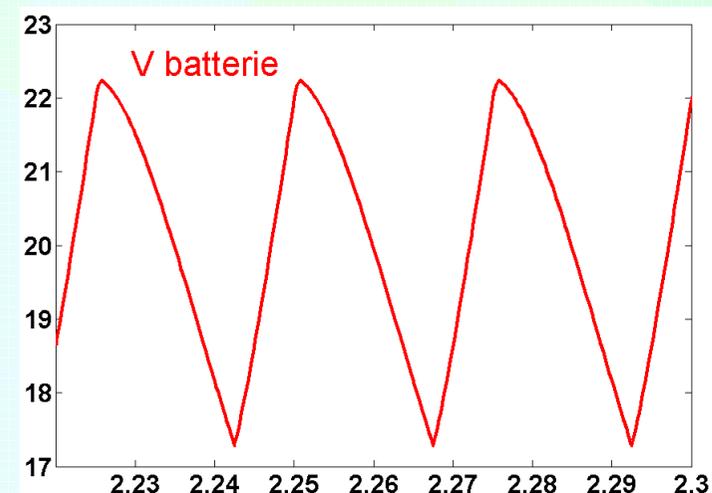
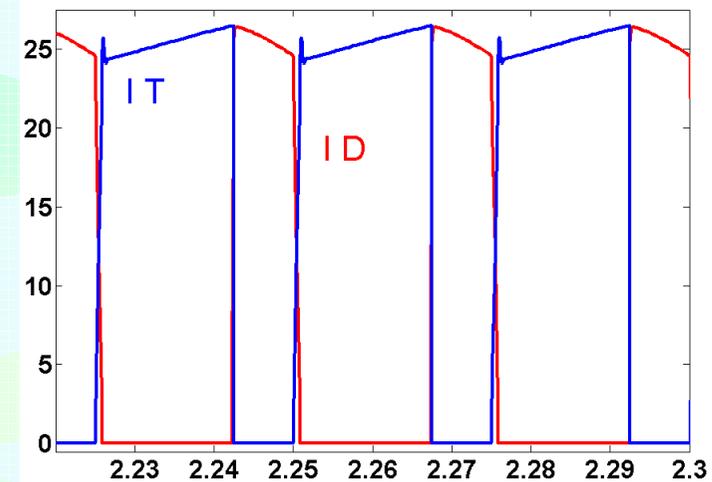
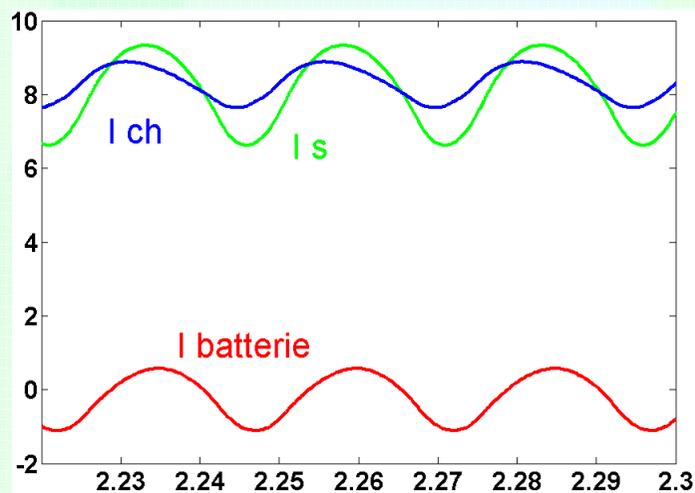
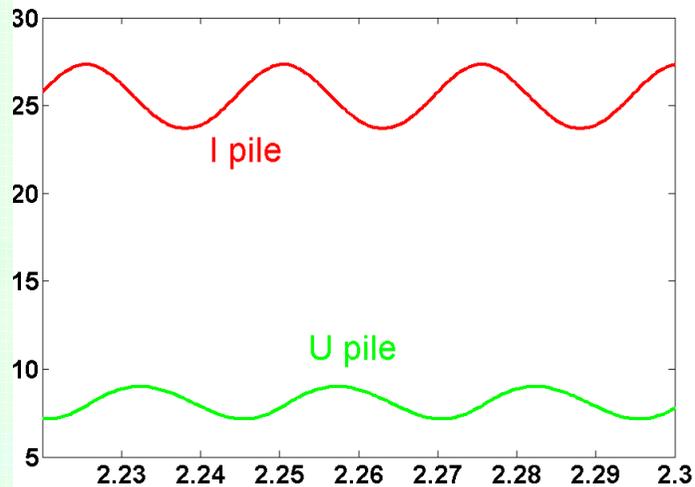
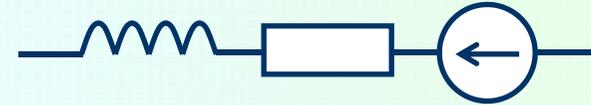
1 A la fréquence de 40 kHz :



Le démonstrateur RobotPAC

Modélisation de la chaîne de traction

A 40 kHz, modèle choisi pour la PAC :



1

2

3

4

5

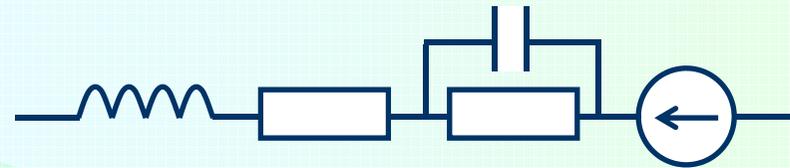
6

Le démonstrateur RobotPAC

Modélisation de la chaîne de traction

1

A 100 Hz, modèle de PAC :



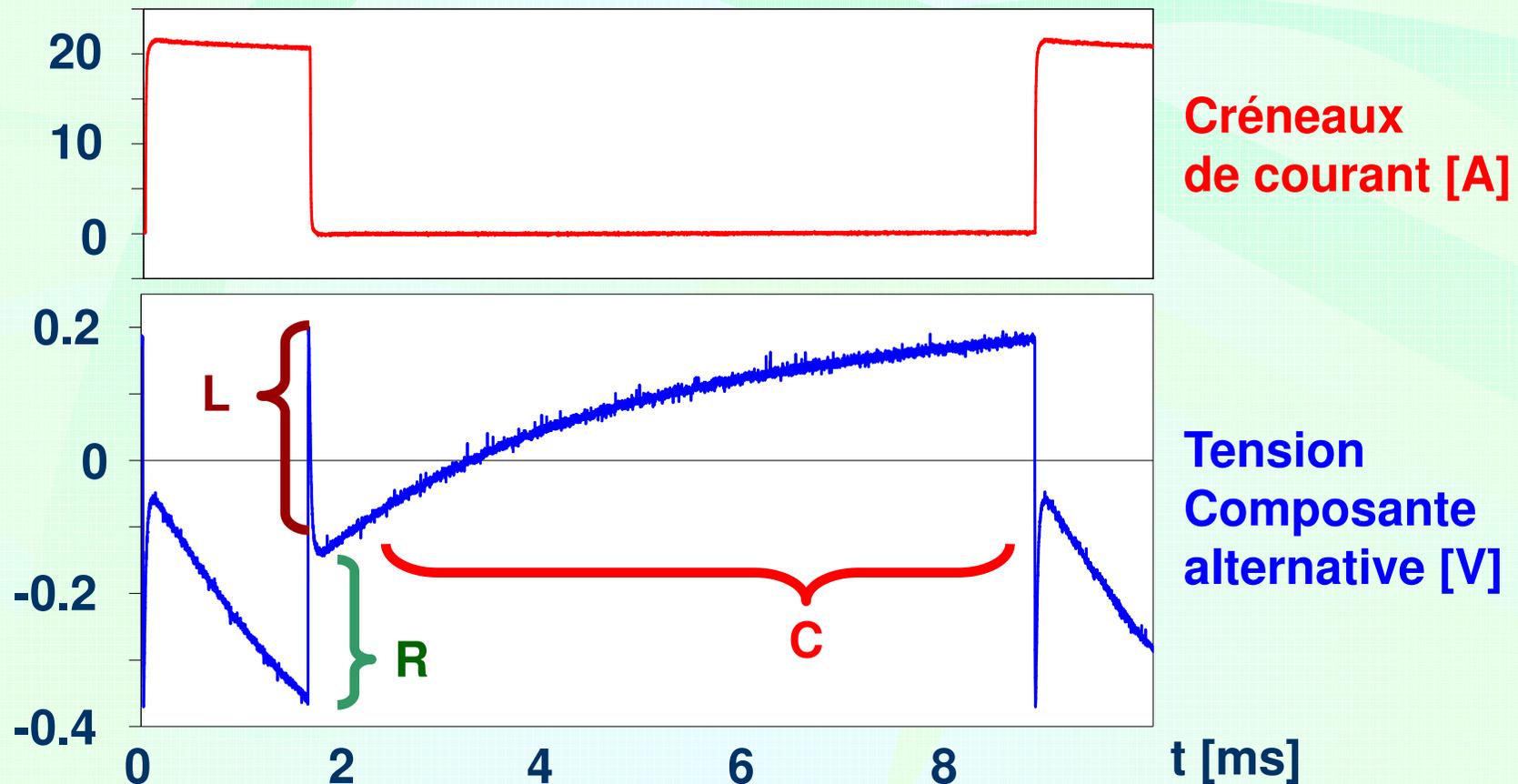
2

3

4

5

6

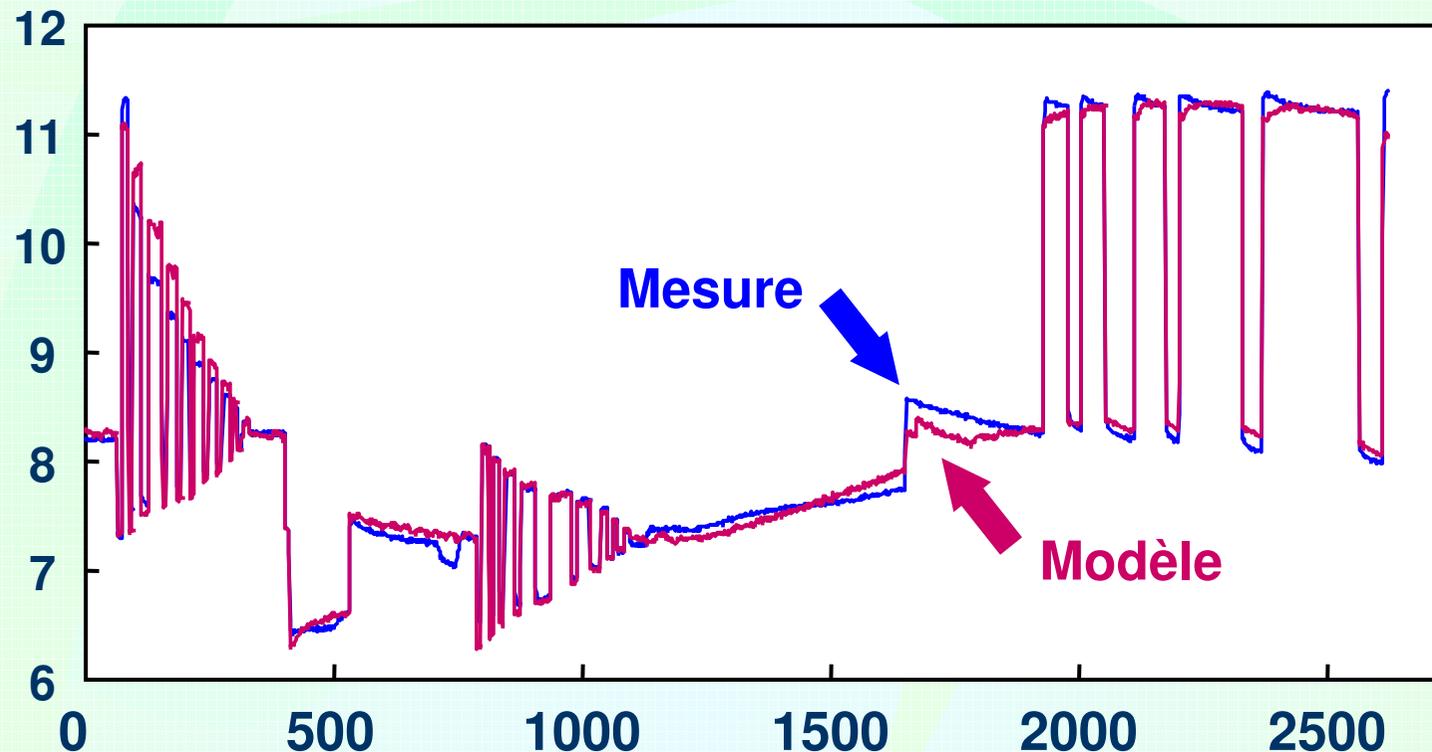


Le démonstrateur RobotPAC

Modélisation de la chaîne de traction

1 Identification multi-paramétrique sous Matlab
des paramètres semi-empiriques de la courbe de polarisation

2 Variations I, P, T → Identification → Paramètres

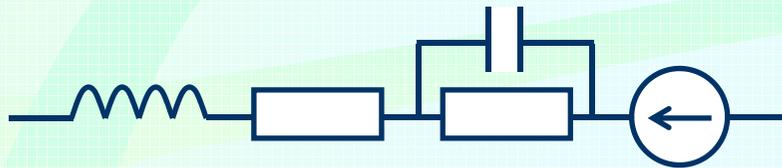


Le démonstrateur RobotPAC

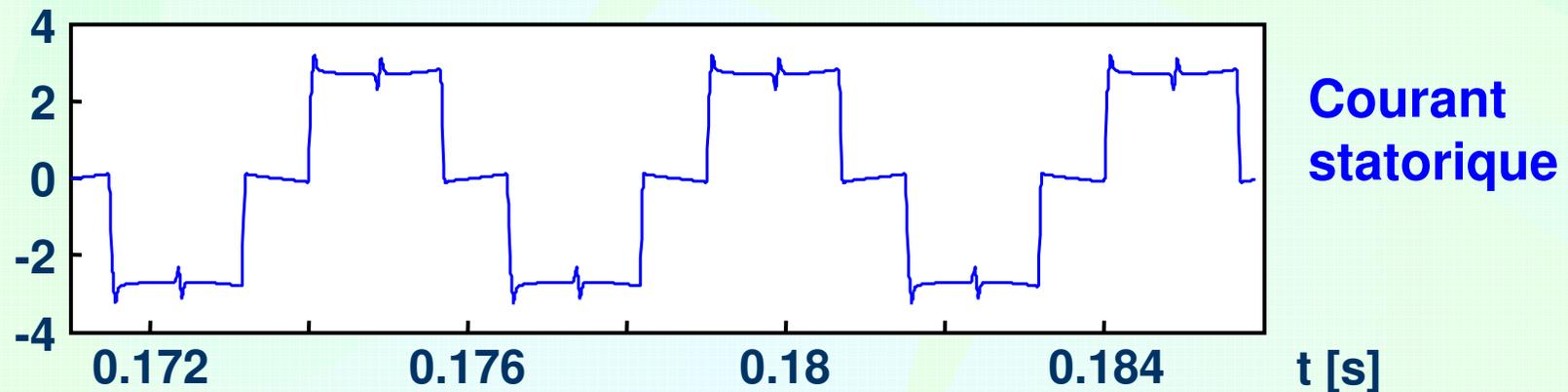
Modélisation de la chaîne de traction

Pour la commande :

- Circuit électrique équivalent pour la PAC



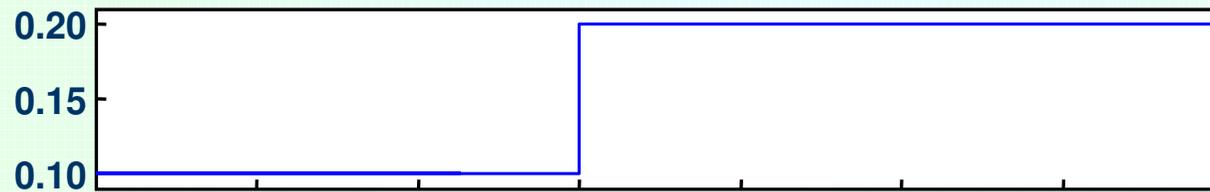
- Modèle moyen triphasé de moteur DC brushless



Le démonstrateur RobotPAC

Modélisation de la chaîne de traction

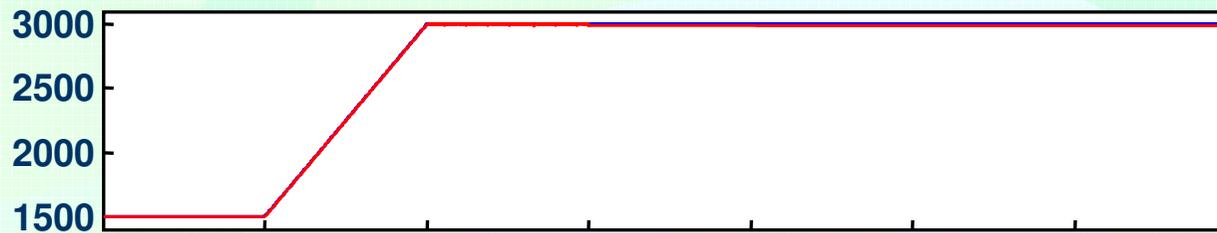
1



Consigne
de couple
[Nm]

2

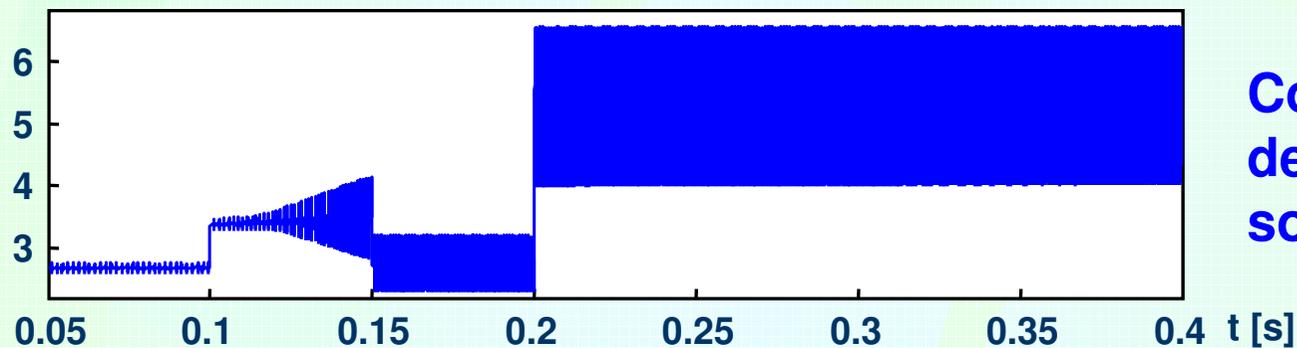
3



Consigne
de vitesse
[tr/min]

4

5



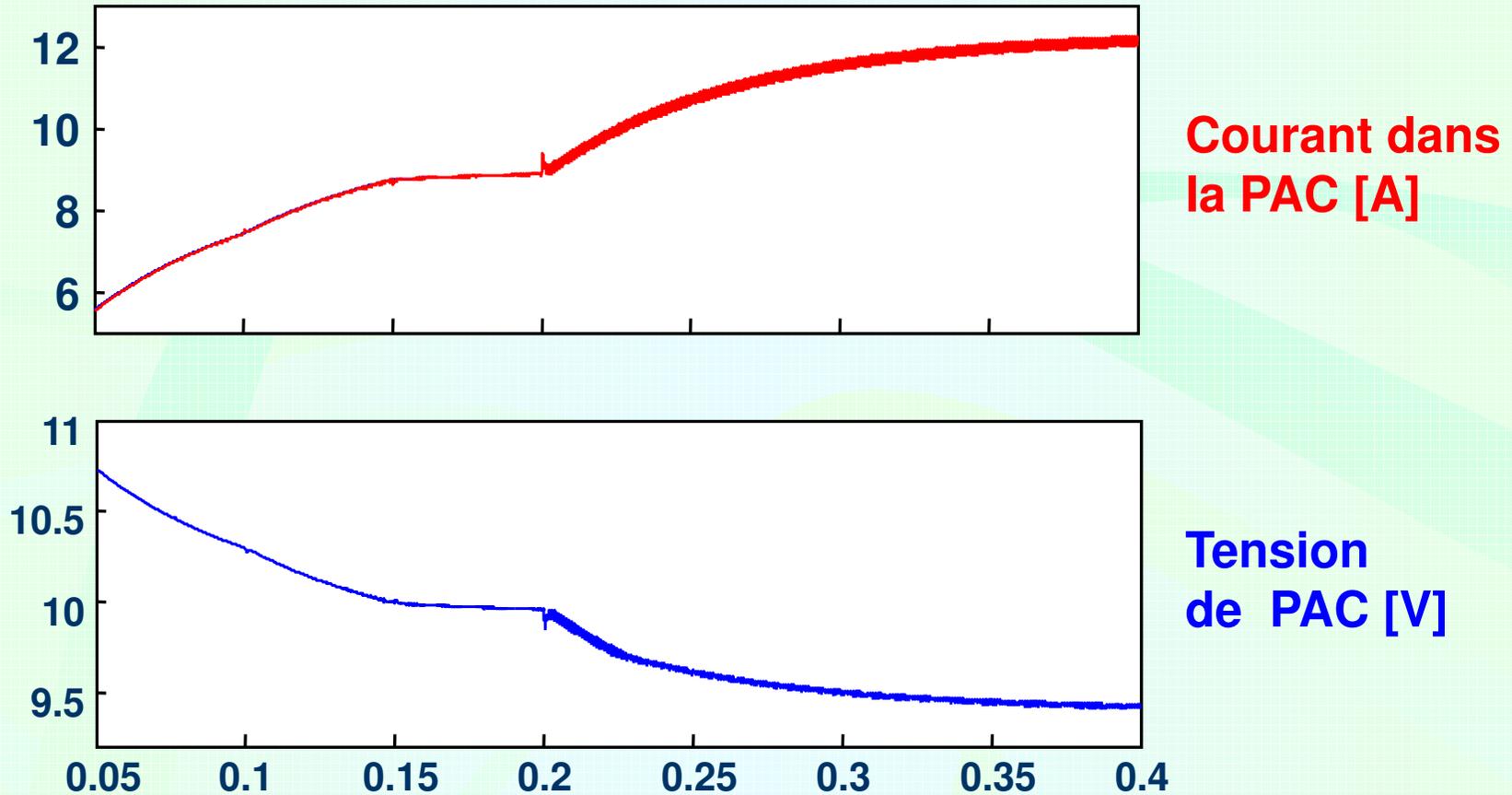
Courant [A]
demandé à la
source hybride

6

Le démonstrateur RobotPAC

Modélisation de la chaîne de traction

1
2
3
4
5
6



Evolution lente et douce du courant de pile

Le démonstrateur RobotPAC

Quelques photos de l'interface PAC / batteries

1

Hacheur :

Commande MLI, correcteur PI

2

Capteur de courant

Étage amplificateur

3

Filtre PAC

Filtre batteries

4

Diode Schottky

Mosfet

Diode de puissance

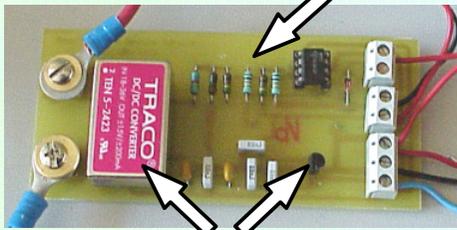
5

Régulation de courant

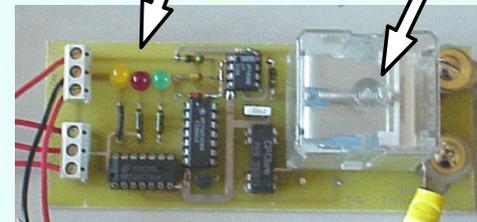
LED

Relais de puissance

6



Convertisseurs DC/DC

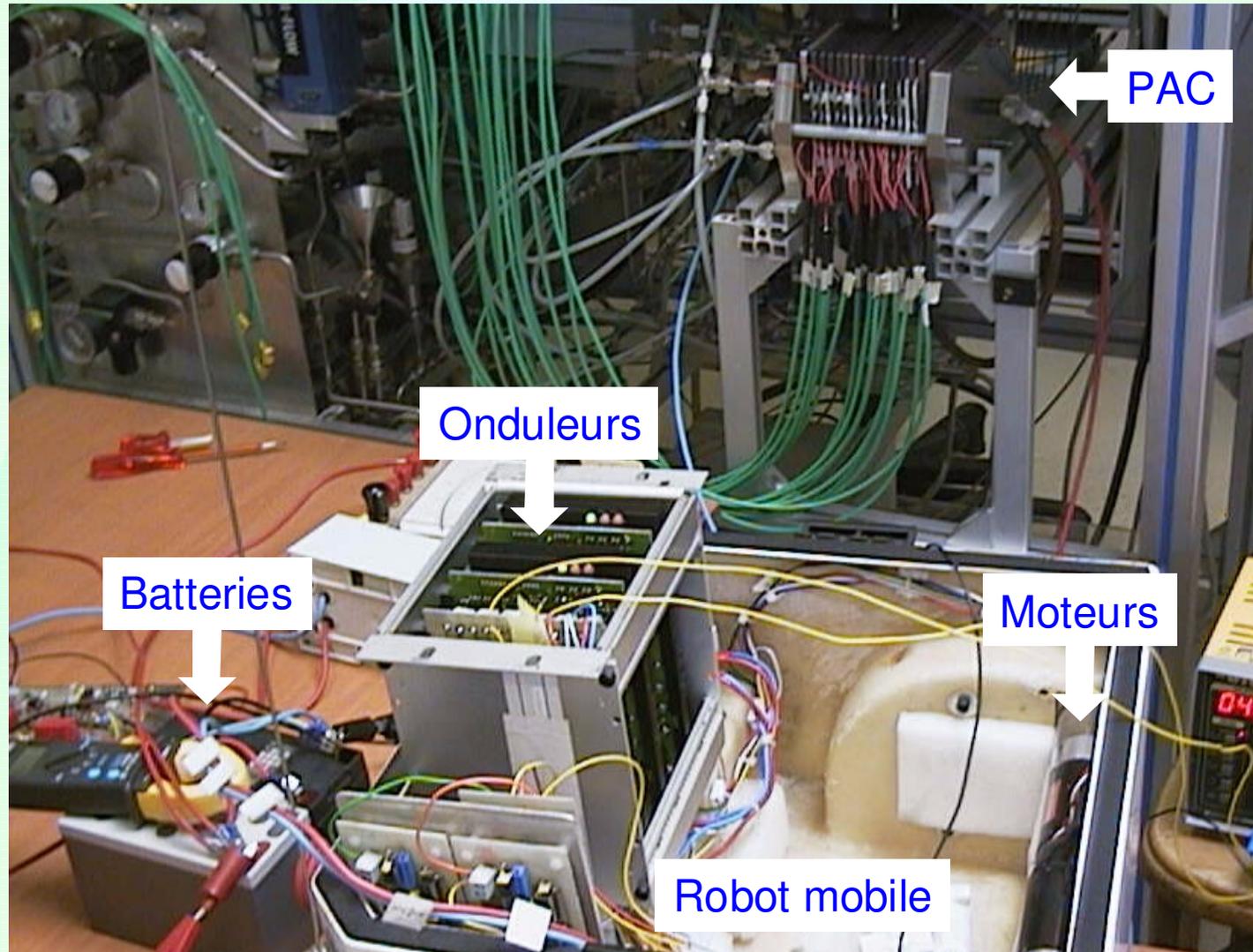


Dispositif de sécurité

Le démonstrateur RobotPAC

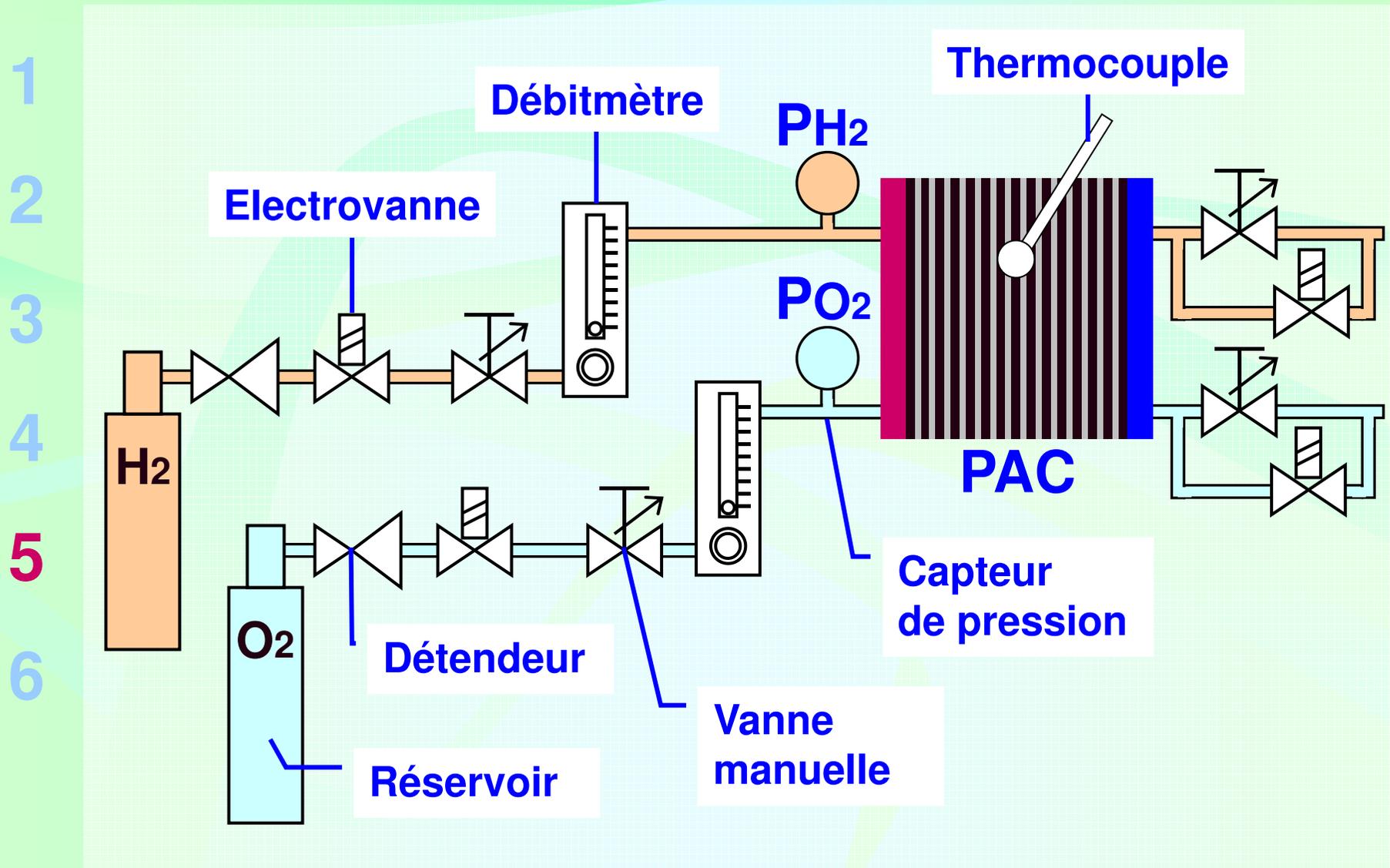
Le banc d'essais au CEA

1
2
3
4
5
6



Le démonstrateur RobotPAC

Plan du groupe électrogène



Plan de la présentation

- 1 Introduction et contexte de l'étude
- 2 La pile à combustible PEM (PAC PEM)
- 3 Les modèles de PAC
- 4 L'hybridation du GE à PAC en simulation
- 5 Le démonstrateur RobotPAC
- 6 Conclusion et perspectives**

Conclusion

- 1 ■ **Etude de la PAC PEM et du GE à PAC avec pour but :**
- 2 **le développement d'outils de simulation permettant de**
- 3 **mettre en évidence l'intérêt de l'hybridation d'un GE à**
- 4 **PAC**
 - **sur des profils de mission**
 - **pour la commande**
- 5 ■ **Réalisation expérimentale pour :**
- 6 **- aboutir à une meilleure compréhension des**
phénomènes physiques
 - **cerner les difficultés liées à la mise en œuvre d'un**
convertisseur

Perspectives

1

■ Poursuite du développement de modèles de PAC utiles aux électriciens

2

- modèles fréquentiels pour l'EP

3

- étude de l'interaction PAC - convertisseur

4

- simulation de la chaîne de traction du démonstrateur avec un modèle dynamique de pile à canaux

5

■ Poursuite de la réalisation expérimentale :

6

- montage du GE à PAC sur la plate-forme du robot

- mise en œuvre de supercondensateurs et des stratégies de gestion de l'énergie associées

Merci !

