

**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

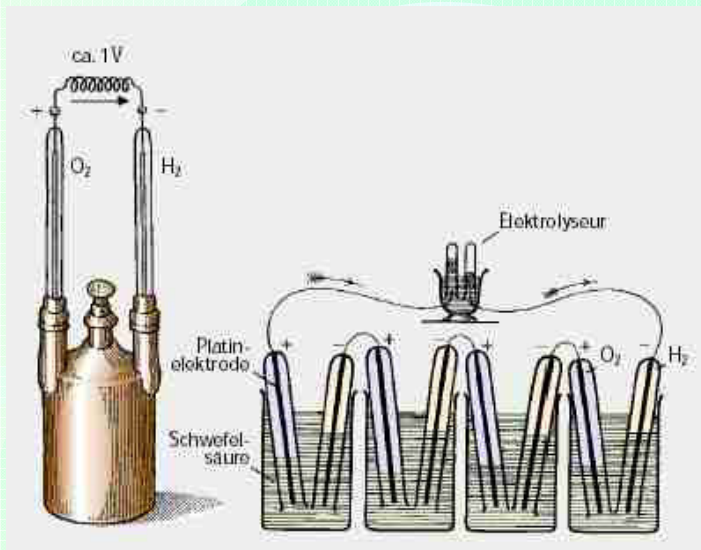
# Introduction et contexte de l'étude

## 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) :  $H_2$   
 Comburant (oxydant) :  $O_2$

4

5

6

Suivant la nature des combustibles utilisés ( $H_2$ ,  $CH_4$  ...), 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



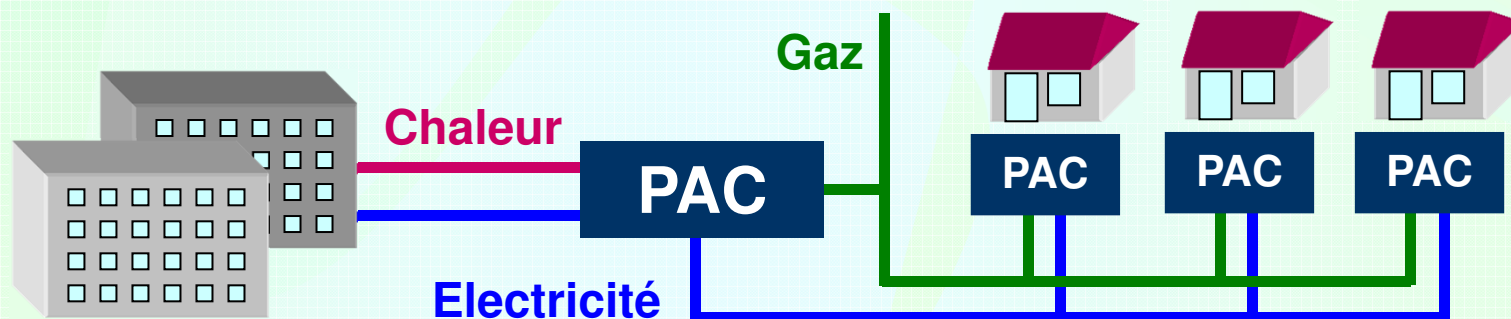
Solaire



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

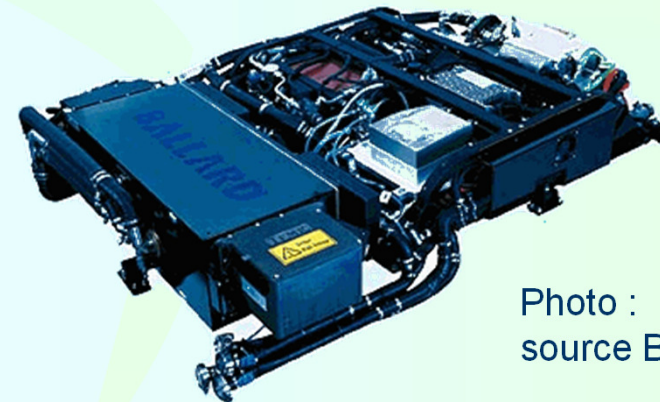


Photo :  
source Ballard

# Introduction et contexte de l'étude

## La PAC dans les transports

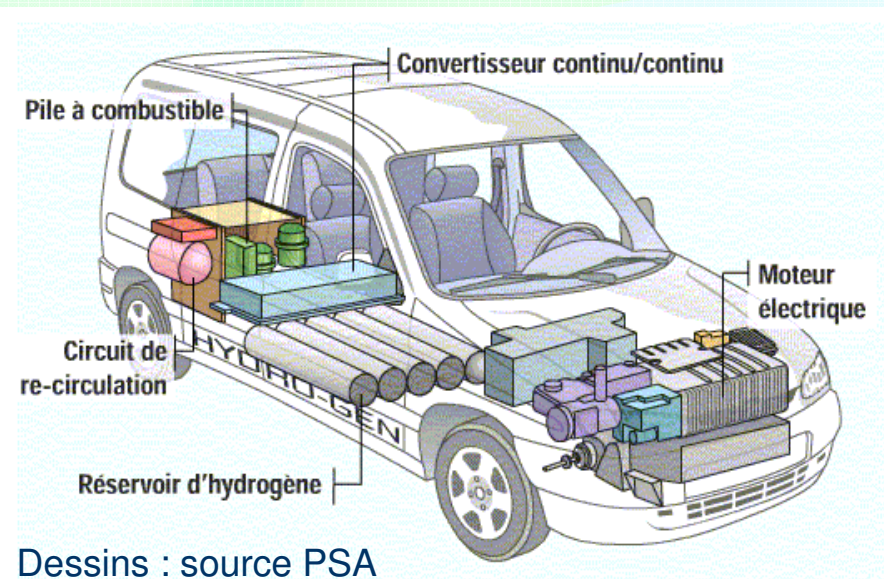
1

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

2

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

3

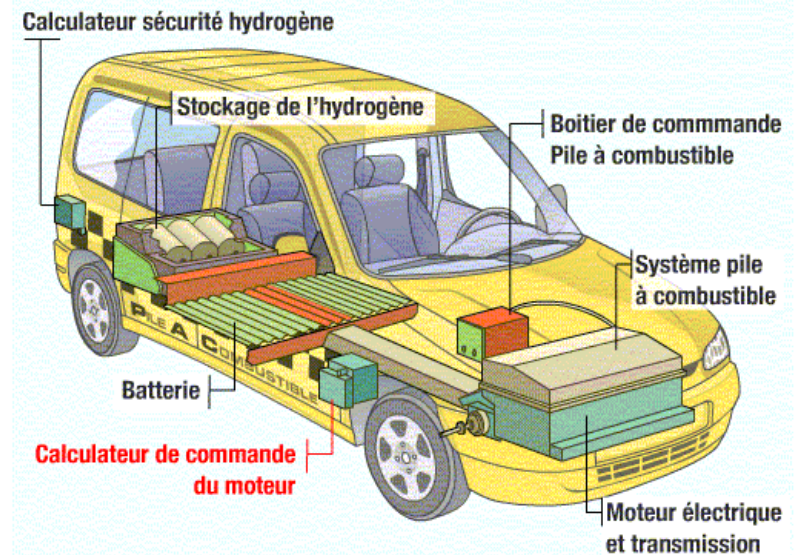


Tout PAC

4

5

6



PAC hybridée  
par des batteries



# Introduction et contexte de l'étude

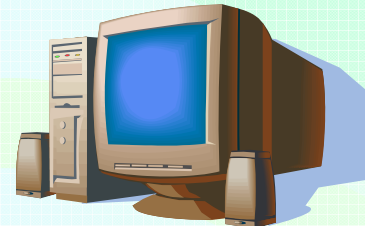
## Objectifs du travail de thèse

**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



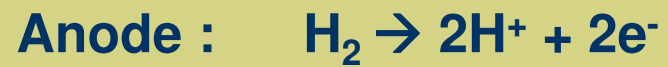
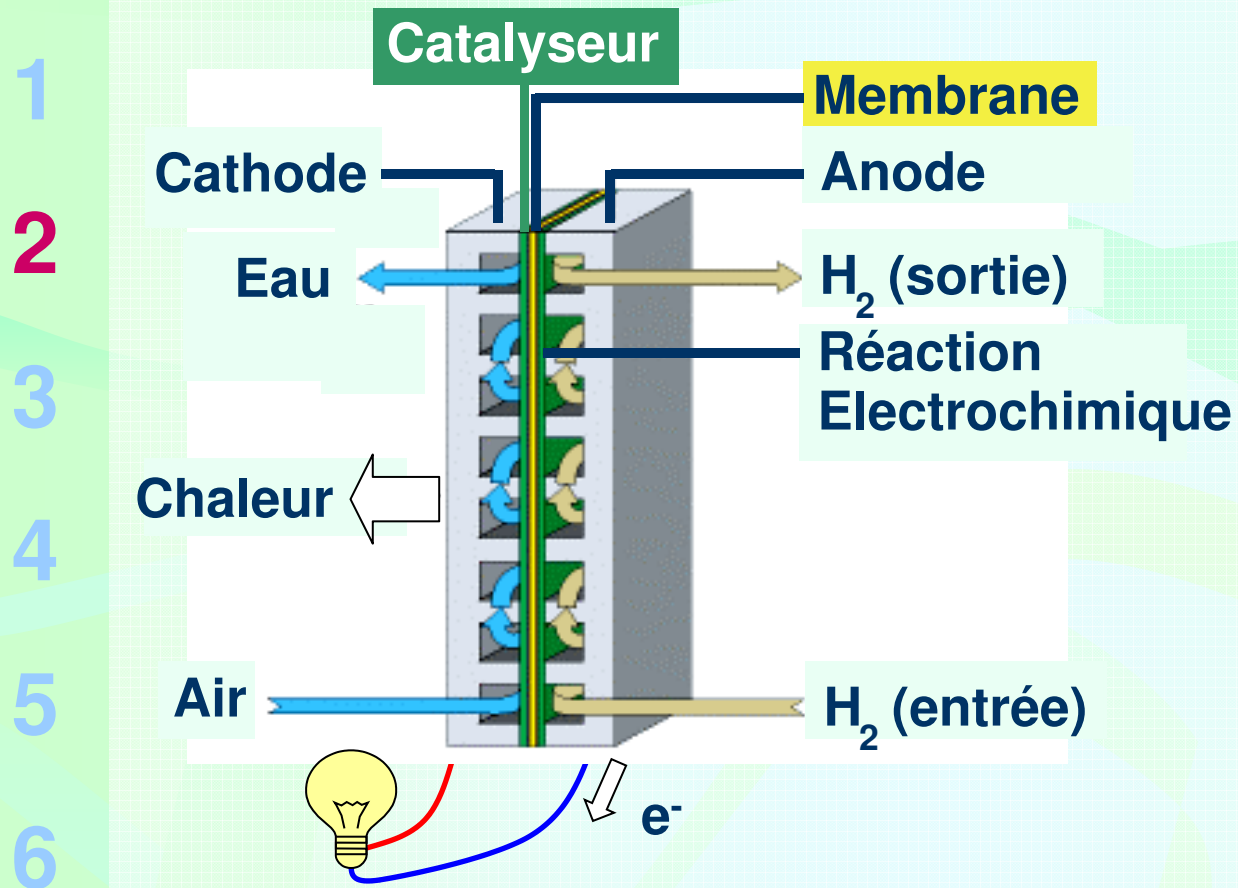
**6**

# Plan de la présentation

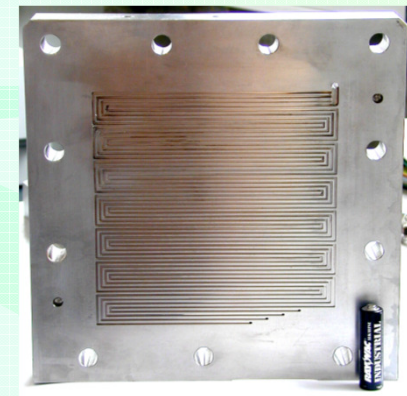
- 1 Introduction et contexte de l'étude
- 2 **La pile à combustible PEM (PAC PEM)**
- 3 Les modèles de PAC
- 4 L'hybridation du GE à PAC en simulation
- 5 Le démonstrateur RobotPAC
- 6 Conclusion et perspectives

# La pile à combustible PEM

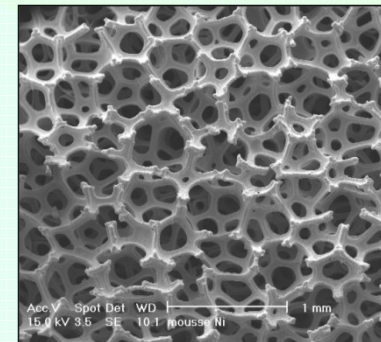
## Son principe



### 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.

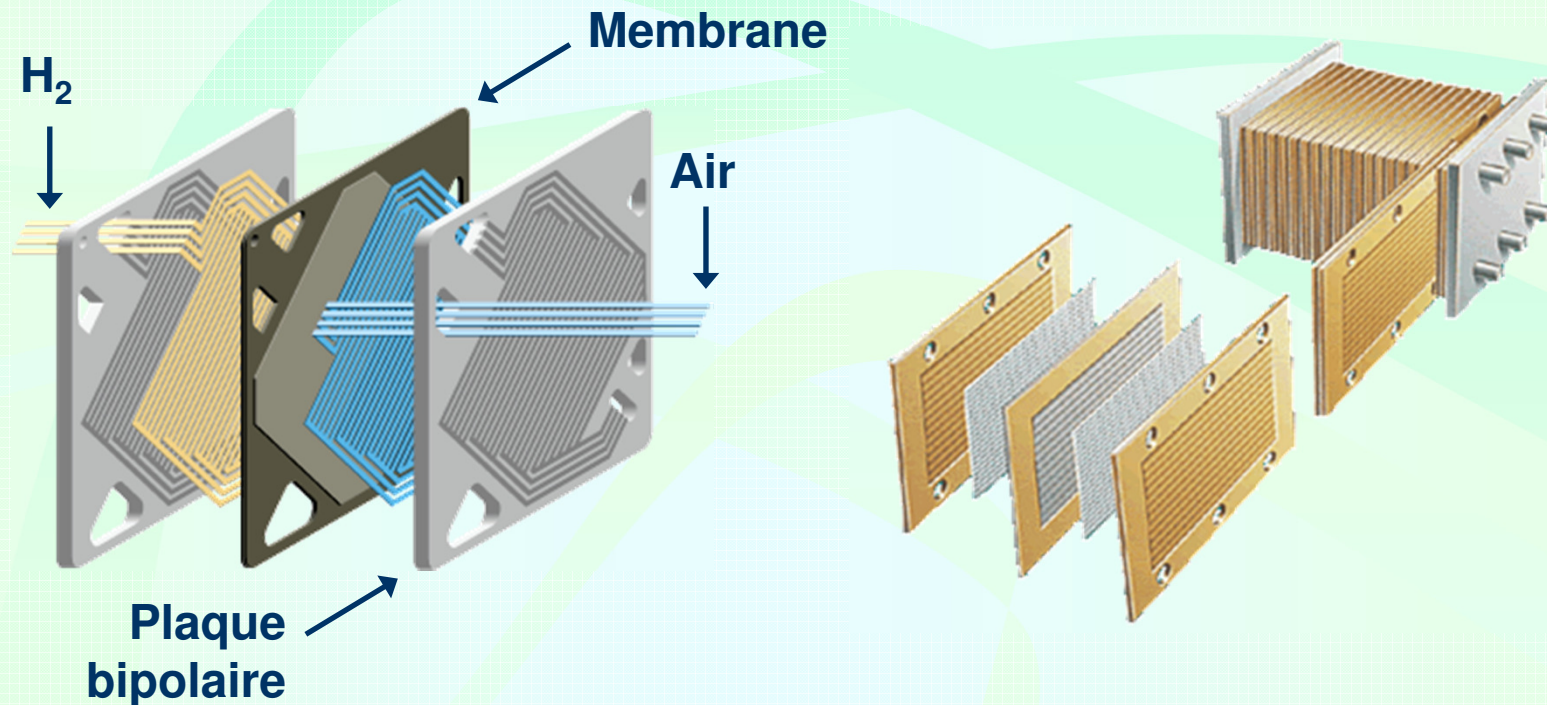
2

3

4

5

6



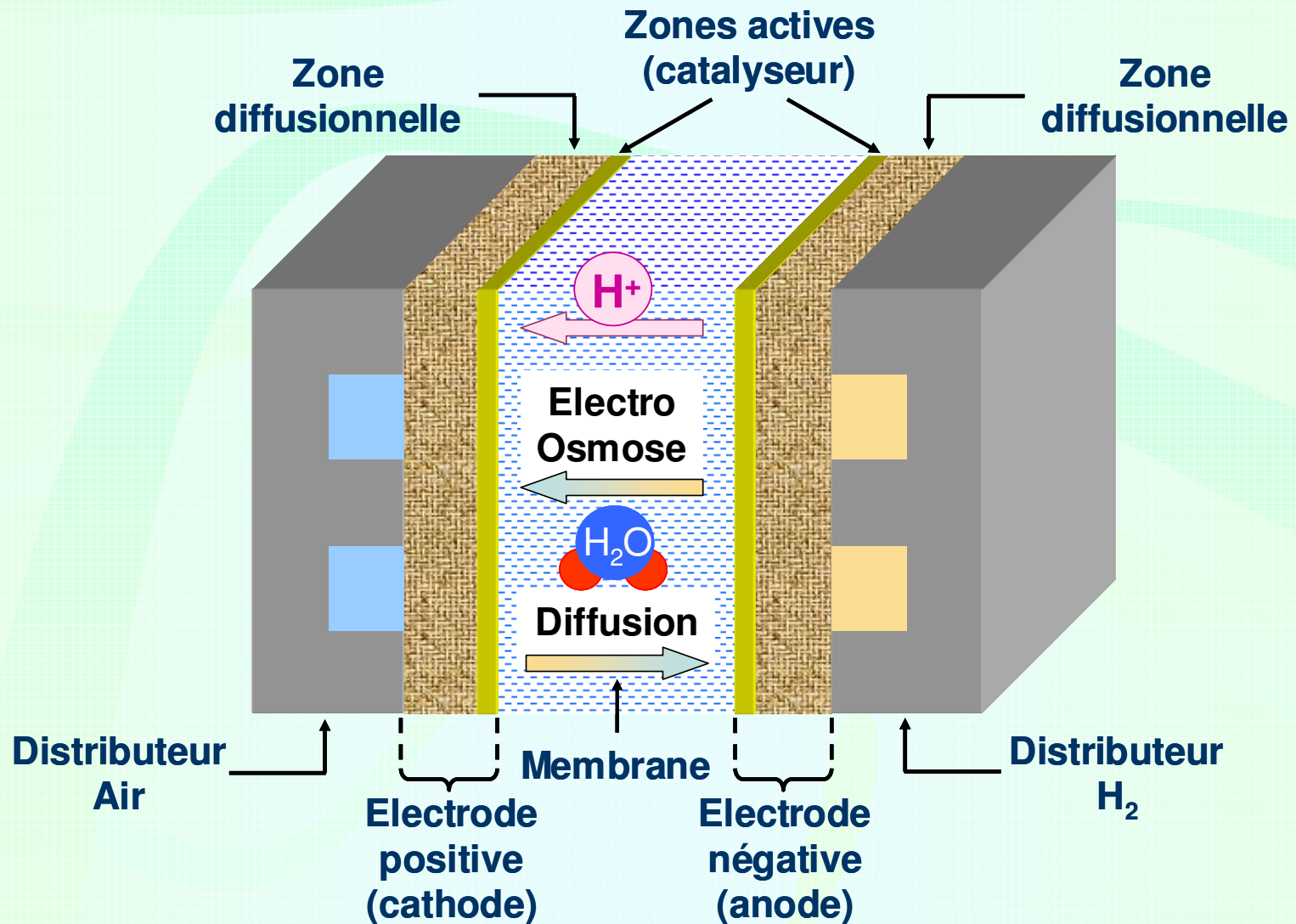
Une cellule

Un empilement de cellules  
(stack)

# La pile à combustible PEM

## Les différentes zones

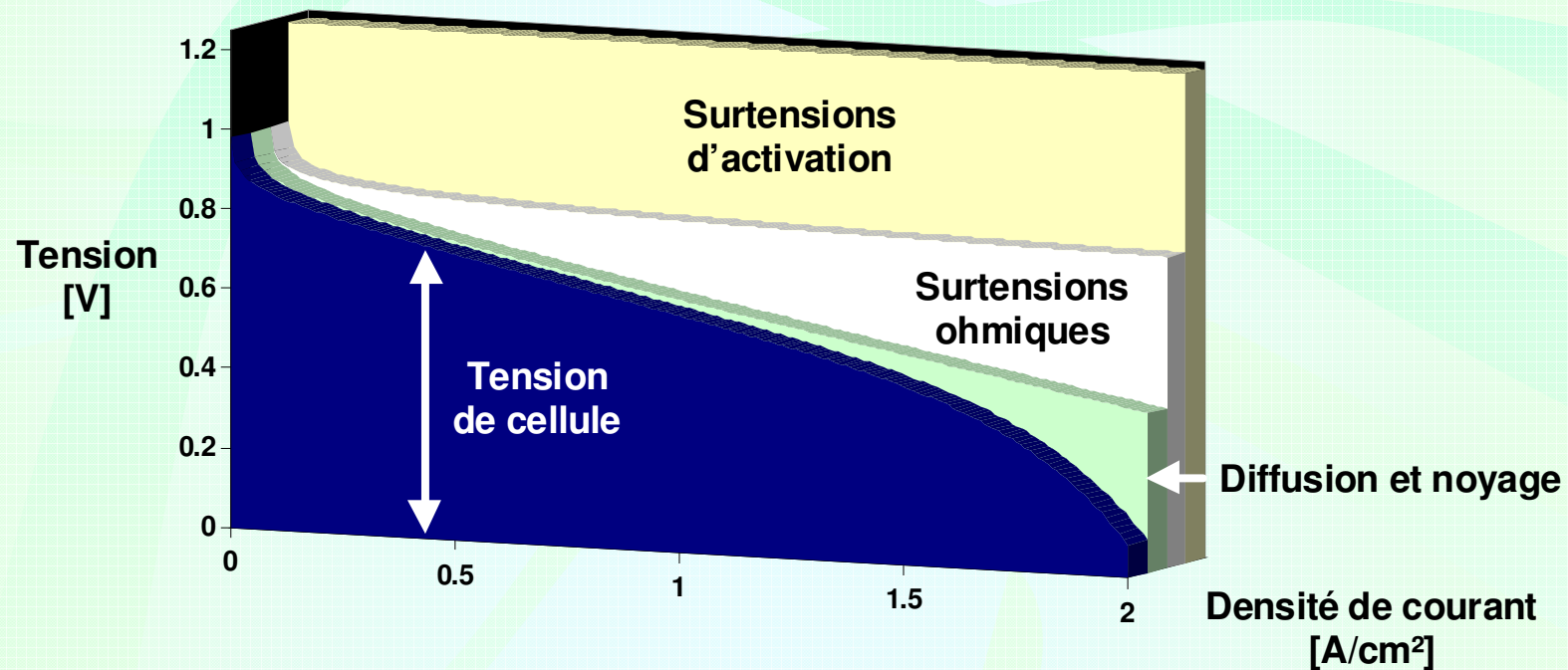
1  
2  
3  
4  
5  
6



# 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

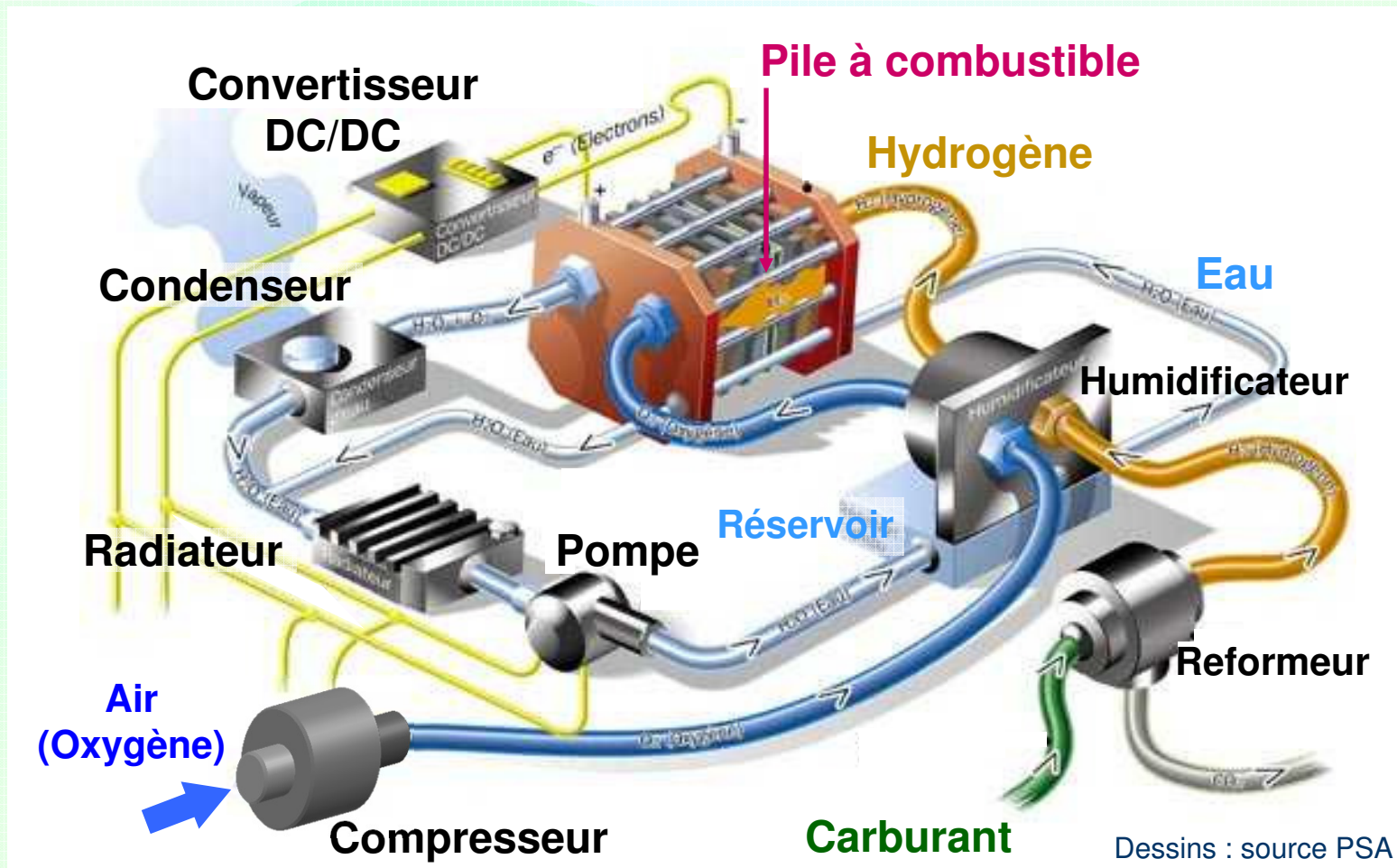


Exemple de courbe de polarisation d'une cellule ( $T = 80^{\circ}\text{C}$ )

# La pile à combustible PEM

## Le groupe électrogène à pile à combustible

1 GE à PAC = pile + organes auxiliaires



# 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 :

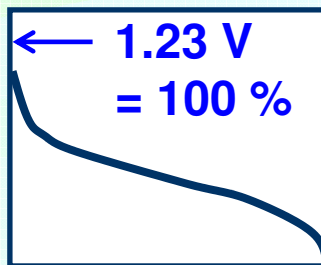
2

à 25°C  
eau liquide

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

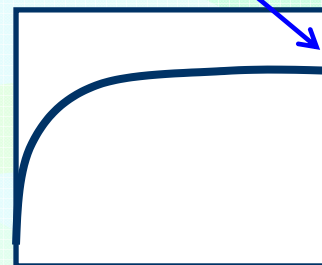
×

à 25°C  
eau liquide



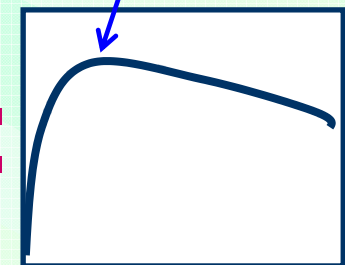
×

≈ 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	<b>Constantes de temps</b>			
4	<b>Distances</b>			
5	1 à 10 nm Particules catalyseur	100 à 300 $\mu\text{m}$ Epaisseur tissu constituant les électrodes	< 0.2 mm Epaisseur membrane	1 mm Largeur des canaux plaques bipolaires



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

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

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

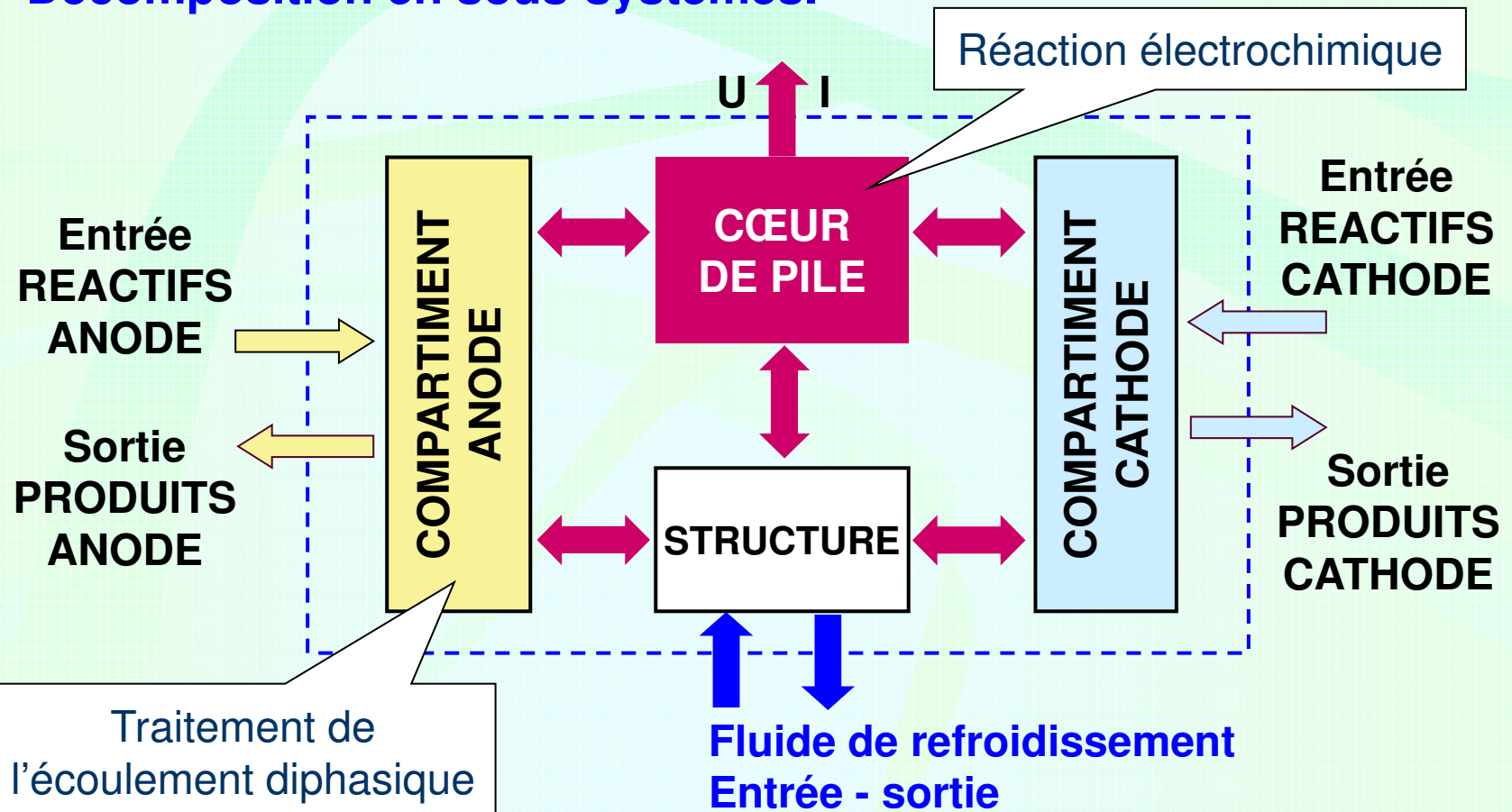
$$U(i) = E_{\text{rev}} - R_m i - \beta_1 T \ln\left(\frac{i}{i_0}\right) + \beta_2 T \ln\left(1 - \frac{i}{i_l}\right)$$

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

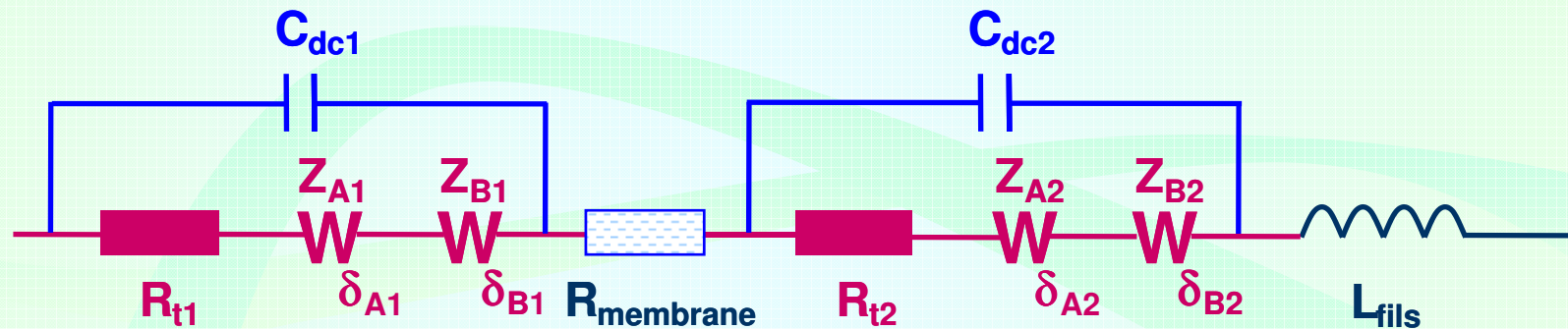
1 **Modèle dynamique à l'architecture modulaire,**  
 2 **destiné à la prédiction et à la compréhension des phénomènes.**  
 3 **Décomposition en sous-systèmes.**



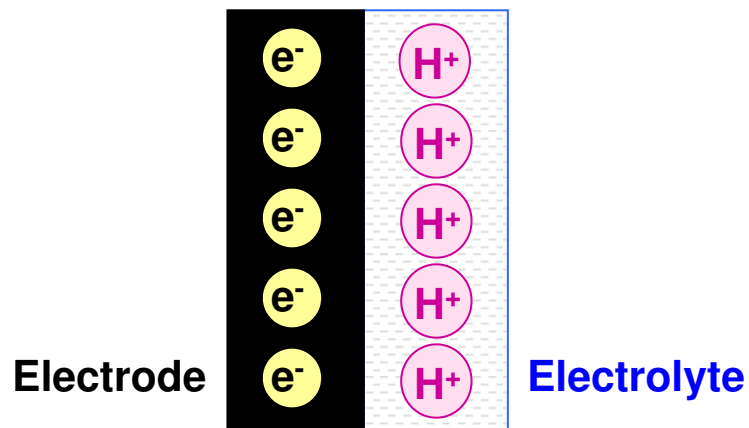
# Les modèles de PAC

## Le modèle fréquentiel des impédances

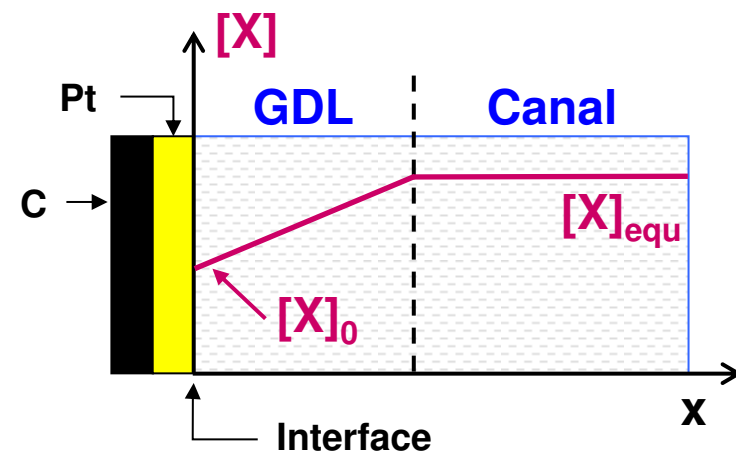
### Circuit électrique équivalent



### La double couche



### La diffusion



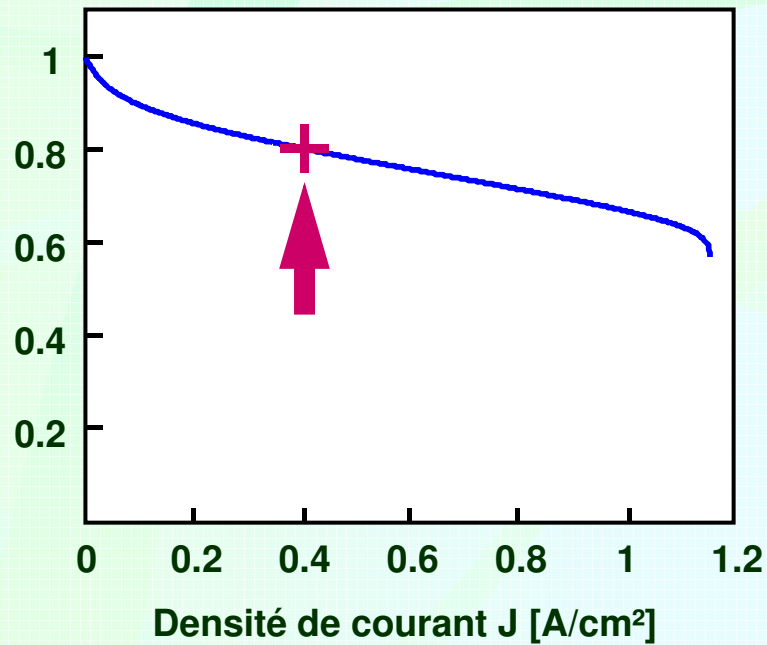
# Les modèles de PAC

## Diagrammes d'impédance théoriques

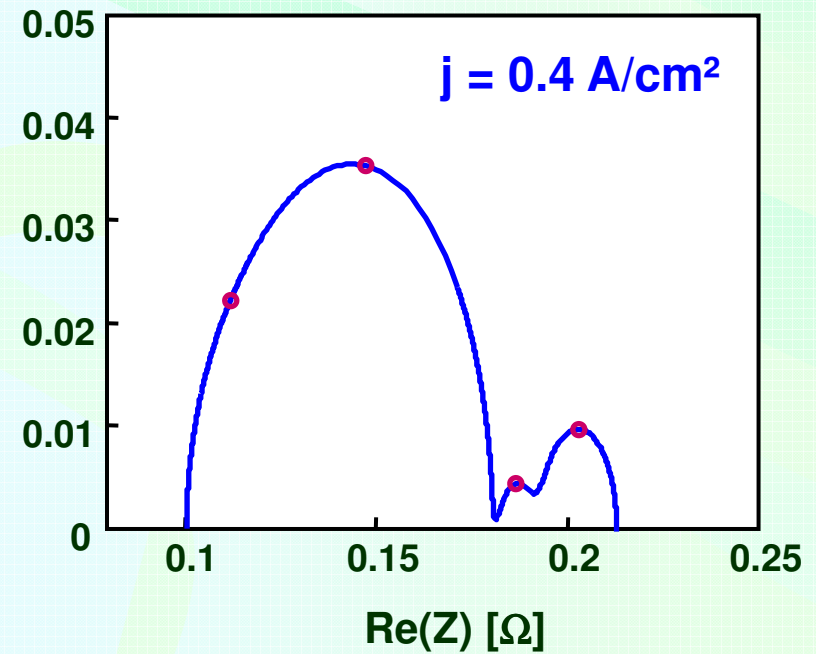
1 Le long de la courbe de polarisation :

2

Tension  
de cellule [V]



$-Im(Z)$  [ $\Omega$ ]



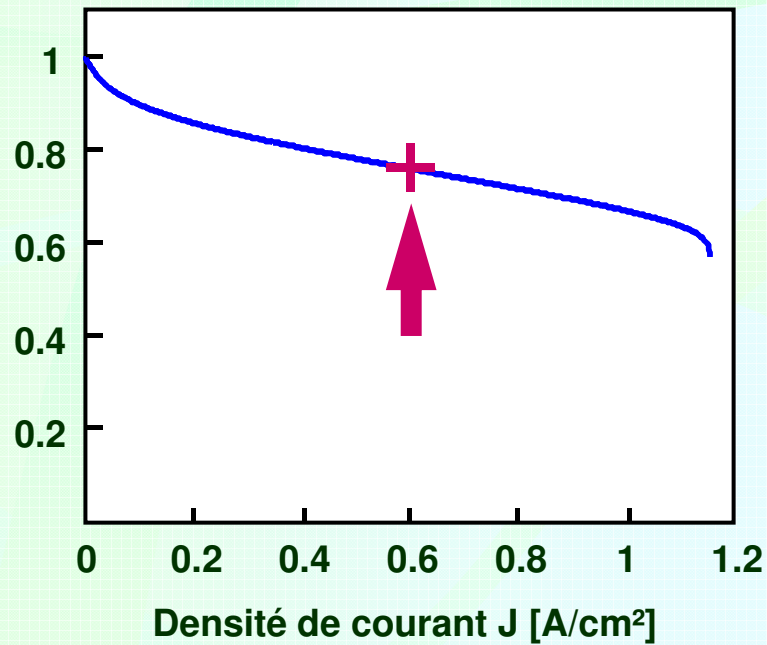
# Les modèles de PAC

## Diagrammes d'impédance théoriques

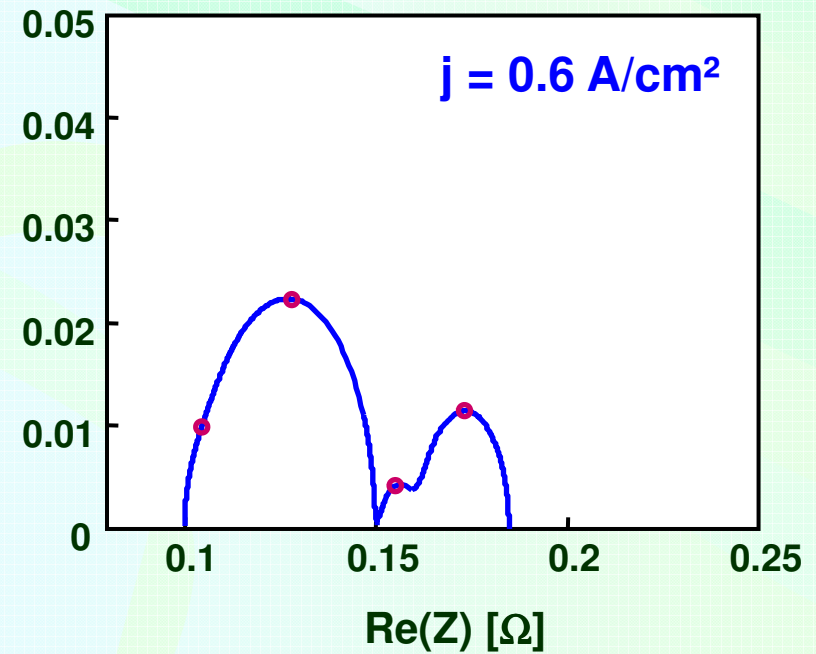
1 Le long de la courbe de polarisation :

2

Tension  
de cellule [V]



$-\text{Im}(Z)$  [ $\Omega$ ]



# Les modèles de PAC

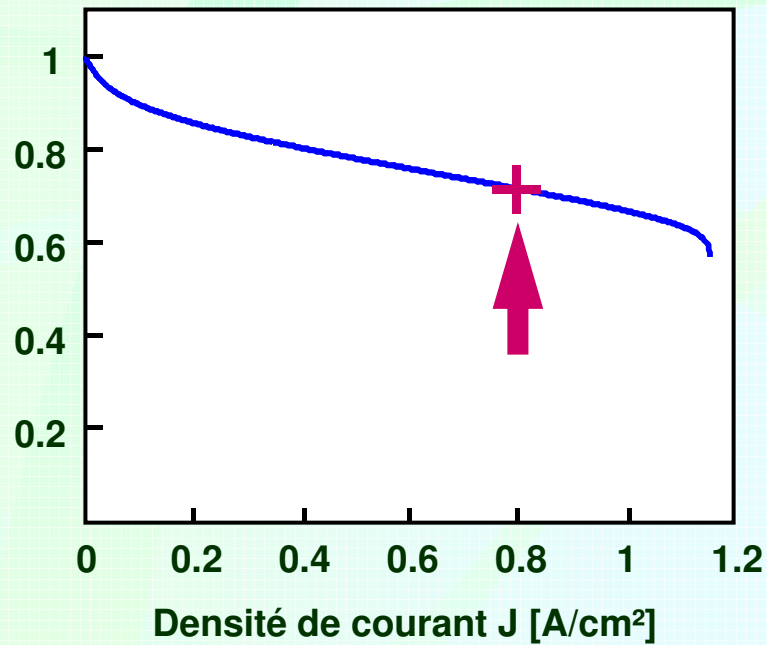
## Diagrammes d'impédance théoriques

1 Le long de la courbe de polarisation :

2

Tension  
de cellule [V]

3

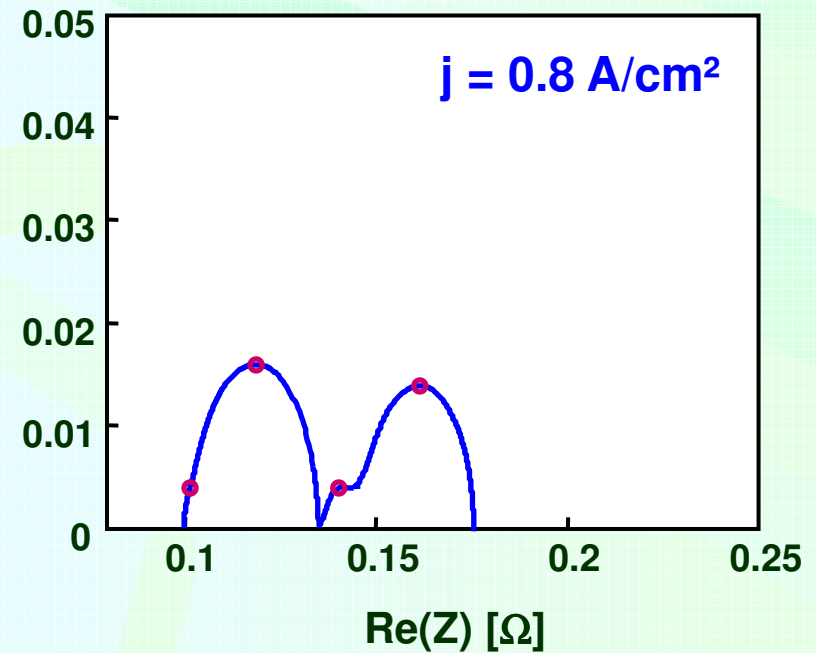


4

5

6

- Im(Z) [Ω]





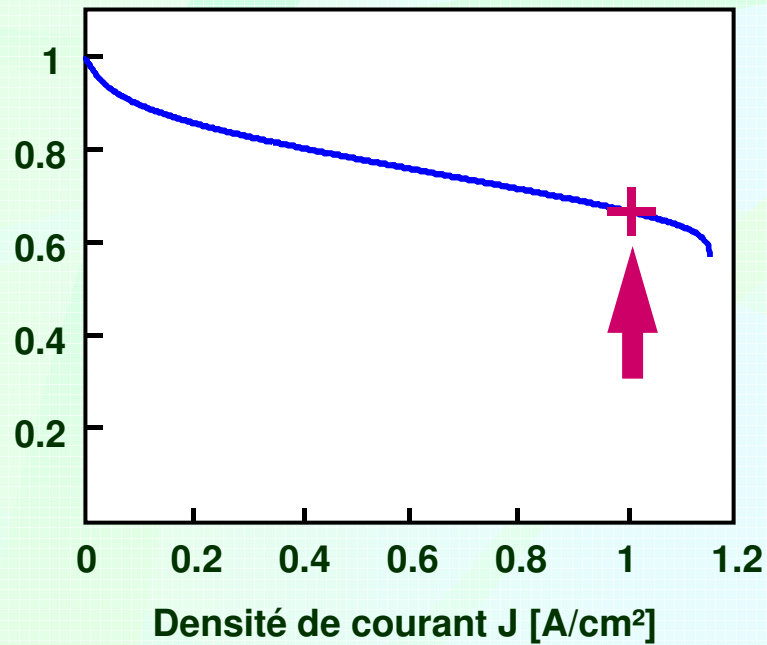
# Les modèles de PAC

## Diagrammes d'impédance théoriques

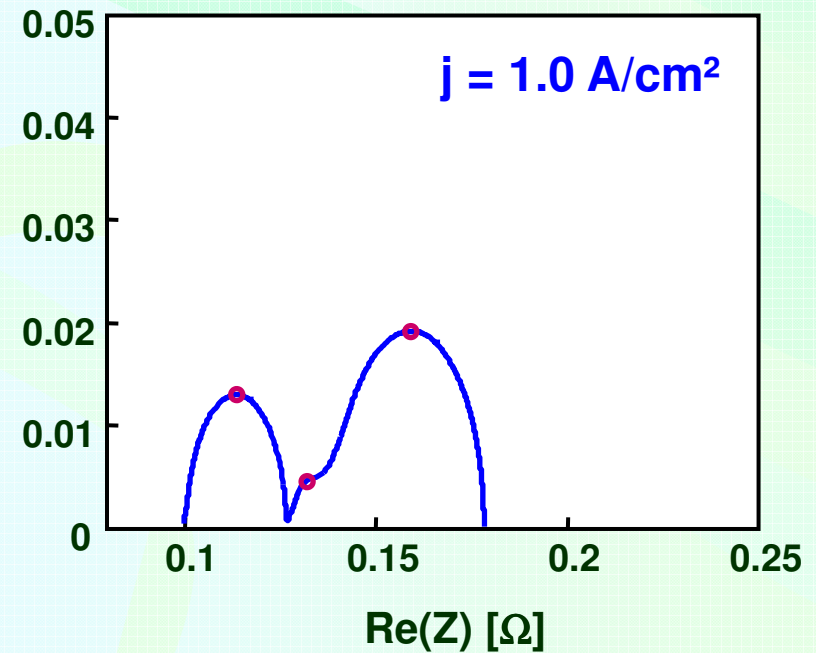
1 Le long de la courbe de polarisation :

2

Tension  
de cellule [V]



- Im(Z) [ $\Omega$ ]



# Les modèles de PAC

## Diagrammes d'impédance théoriques

1 Le long de la courbe de polarisation :

2

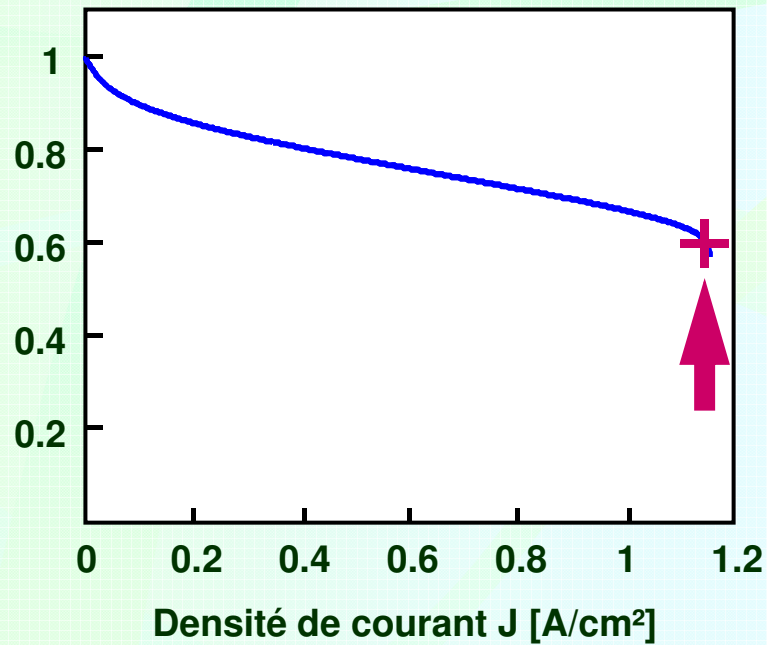
3

4

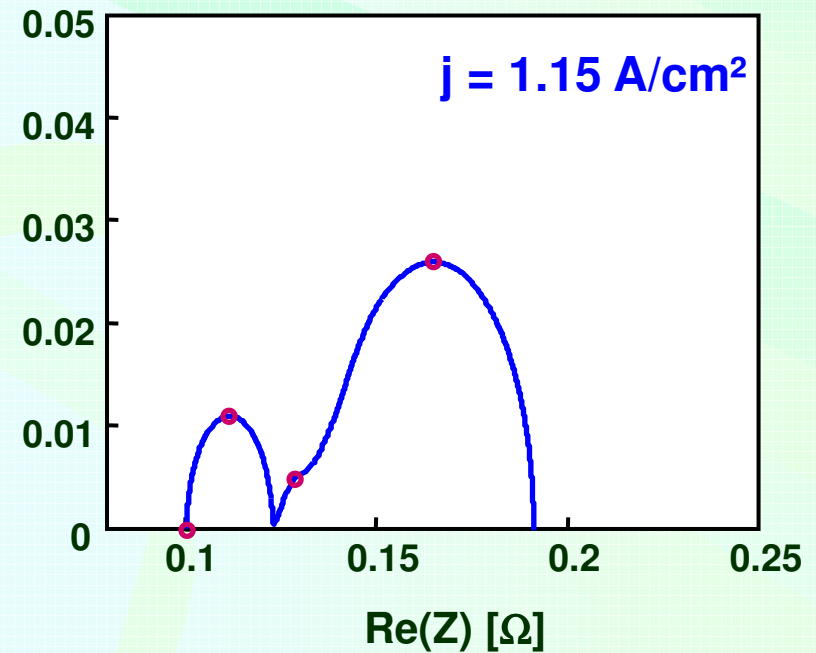
5

6

Tension  
de cellule [V]



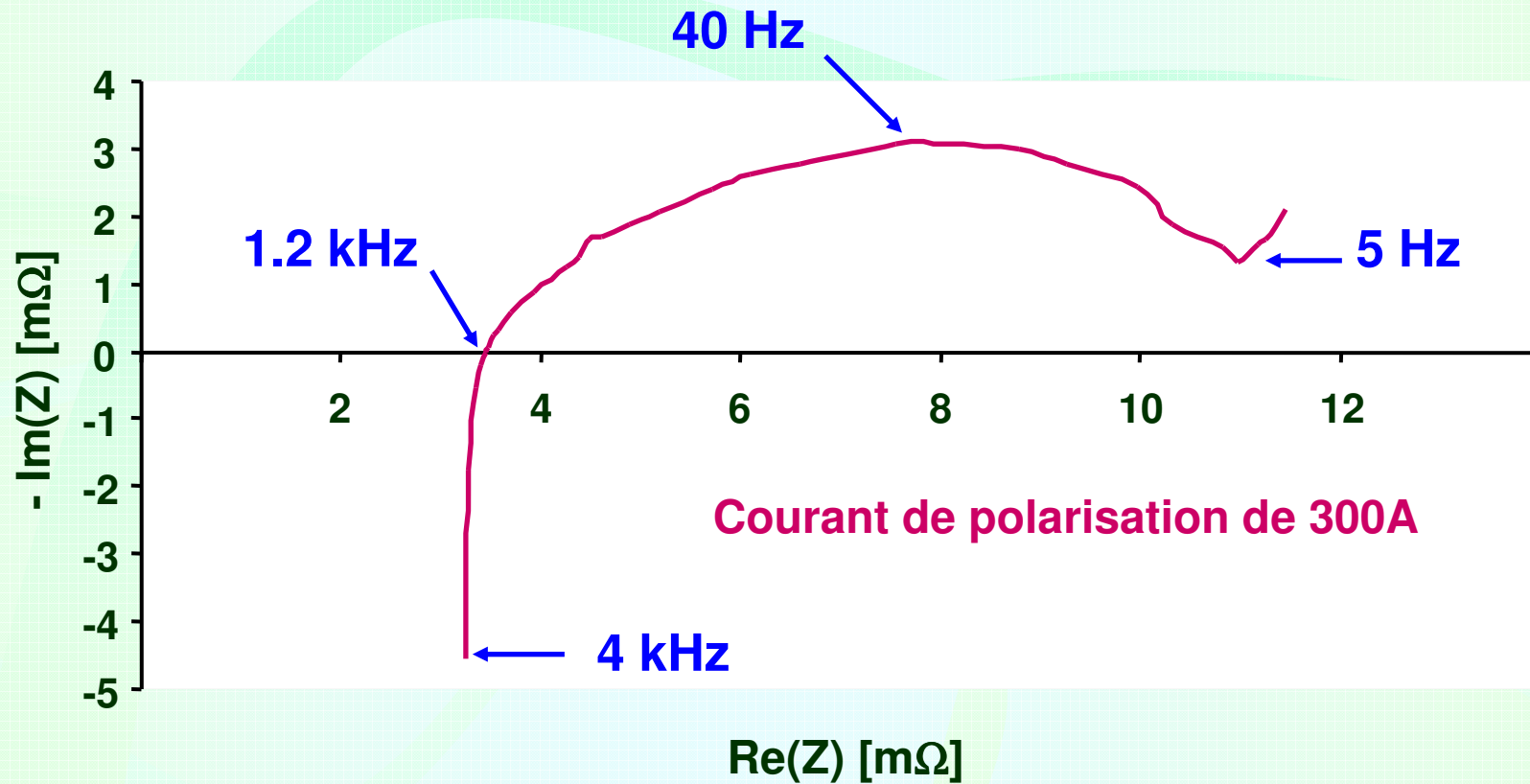
- Im(Z) [Ω]



# Les modèles de PAC

## Mesure d'impédance

Exemple de diagramme d'impédance dans le plan complexe :

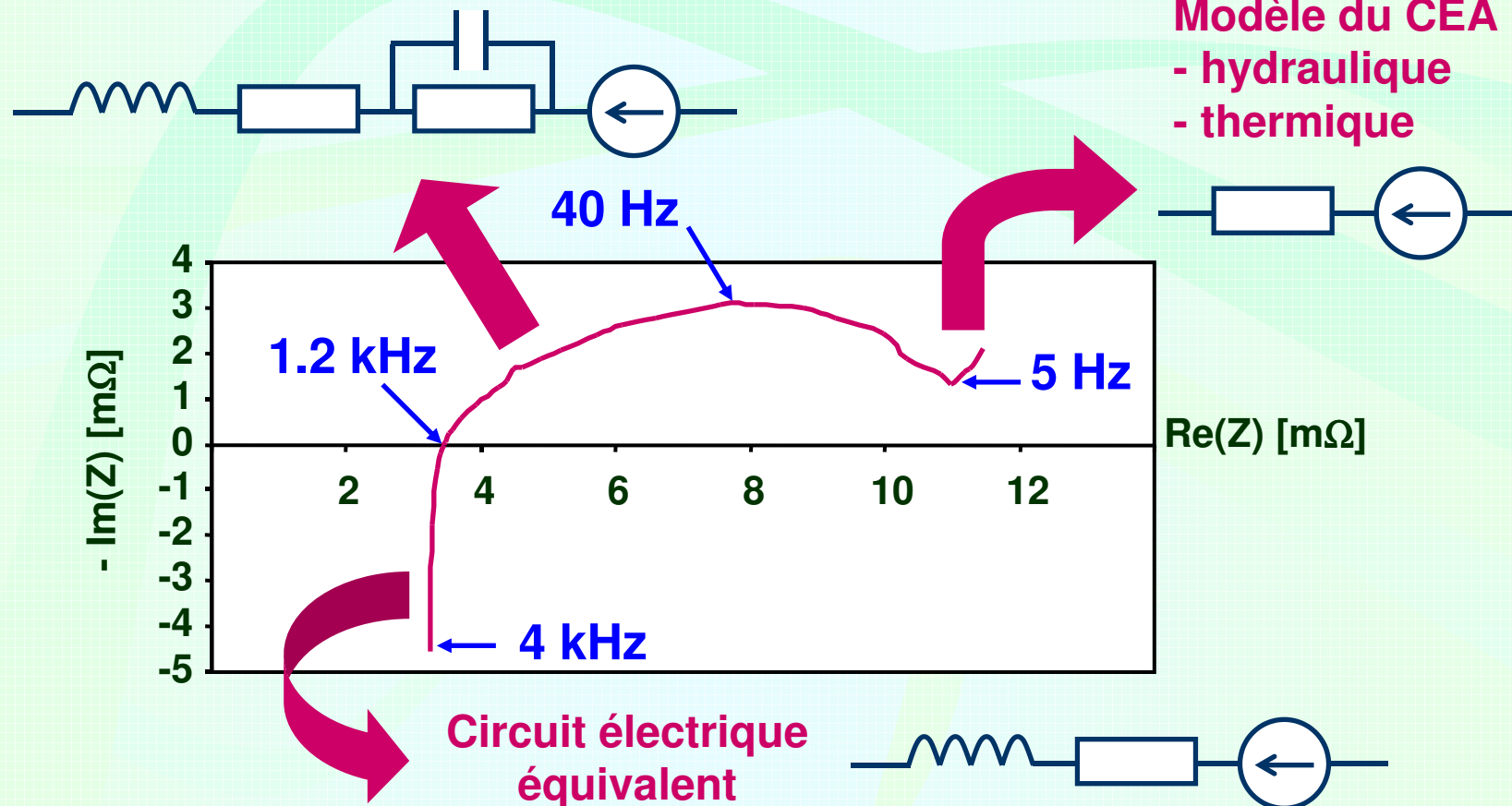


Mesures réalisées par Thierry Pascal au CEA

# 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.



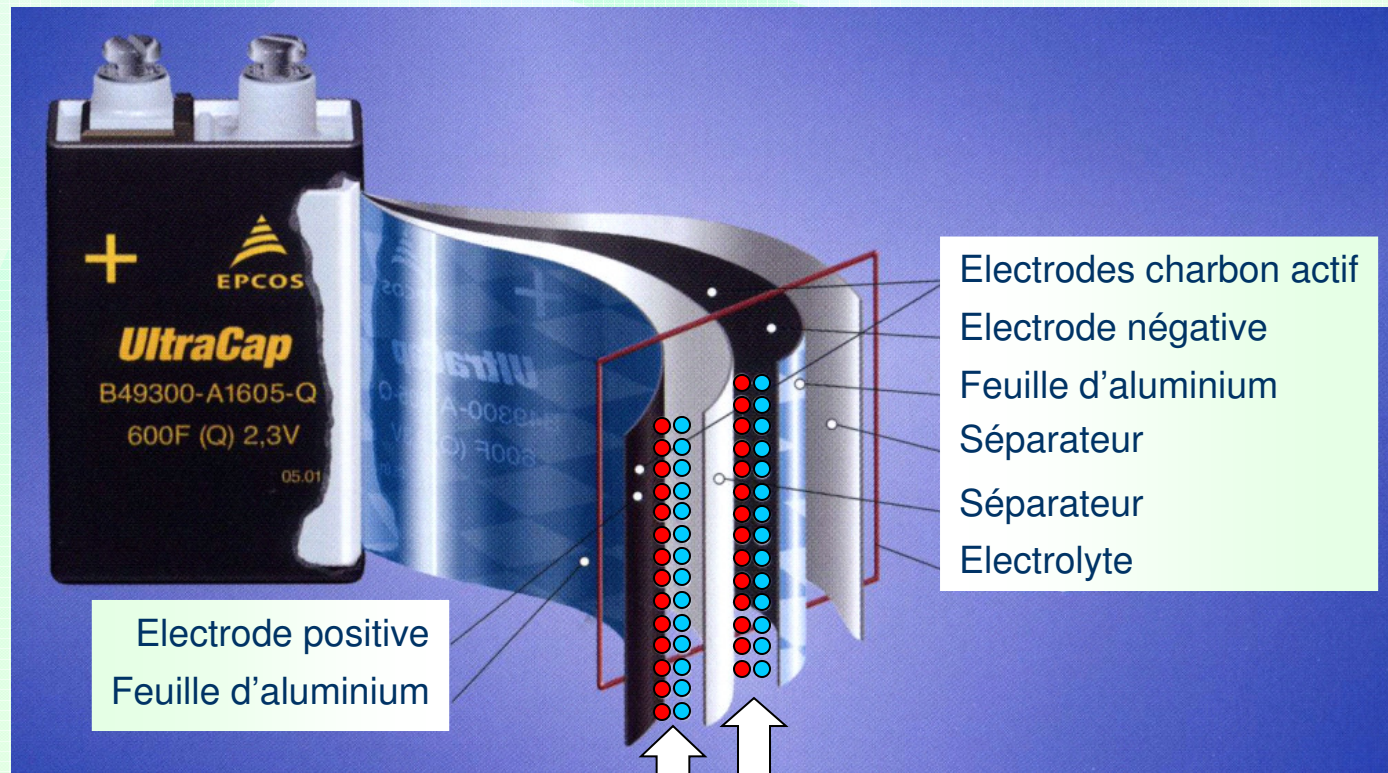
# Plan de la présentation

- 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

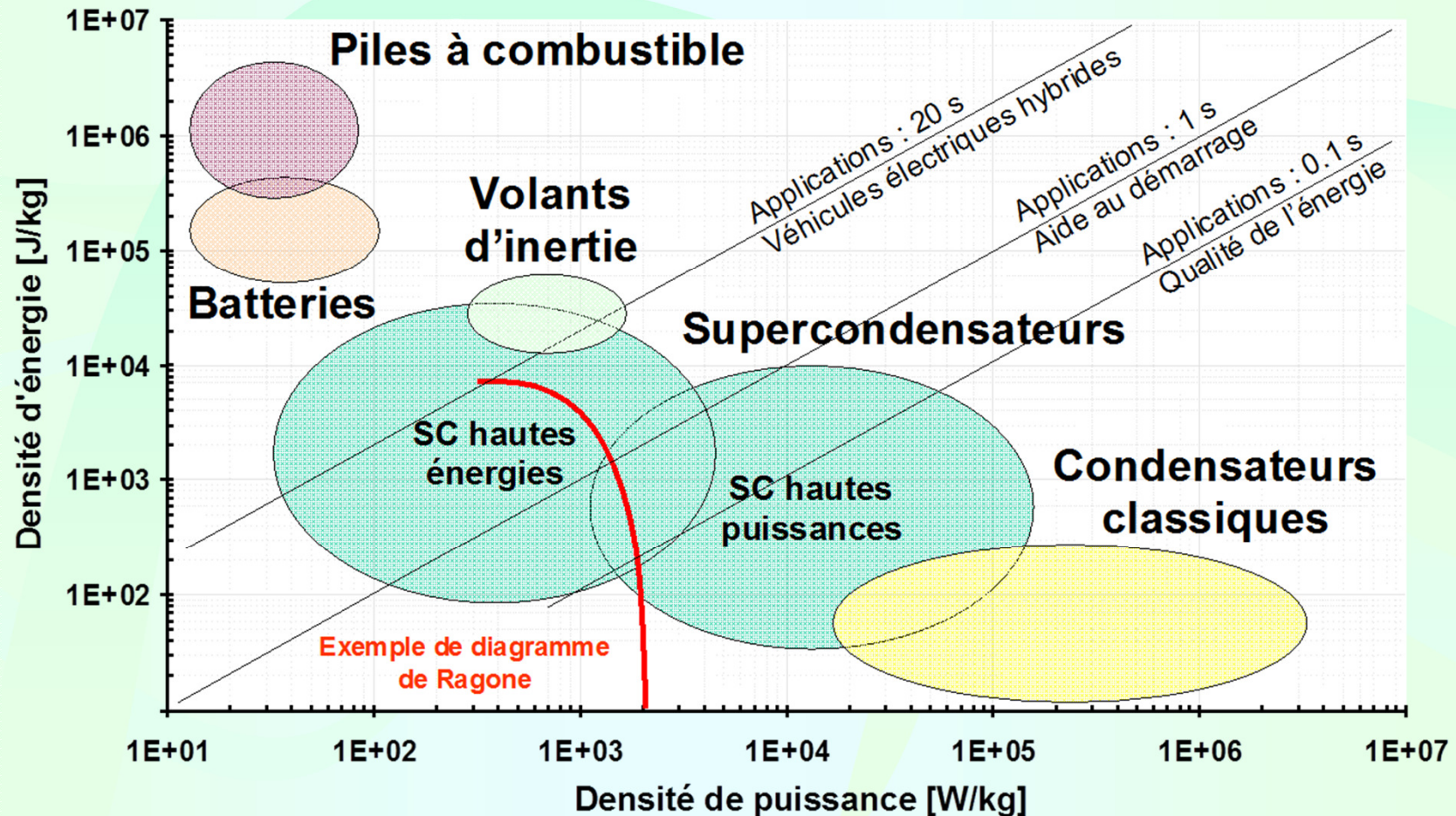
1 Technologie des électrodes métal/carbone associées à un électrolyte organique non aqueux.



# 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

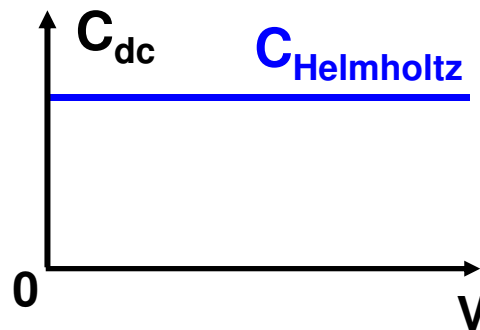
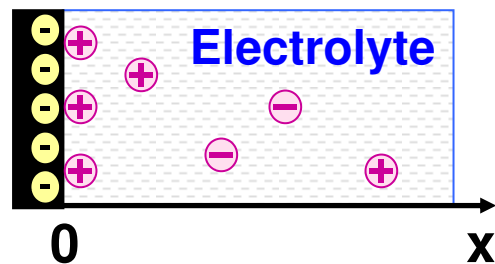
## La double couche des supercondensateurs

Il existe différents modèles :

1

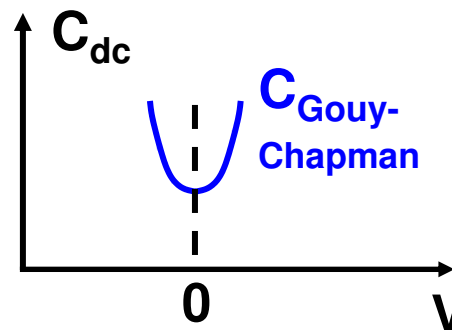
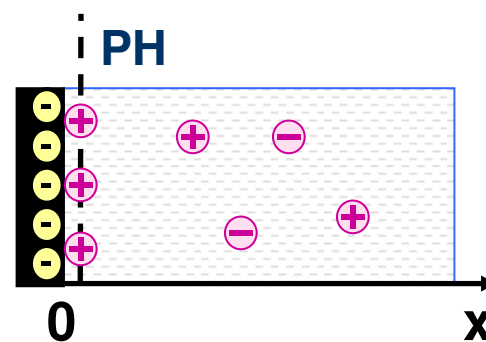
### Helmholtz

Electrode



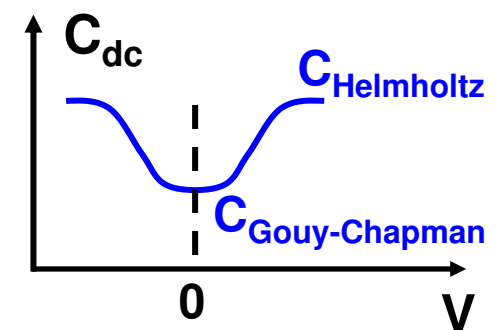
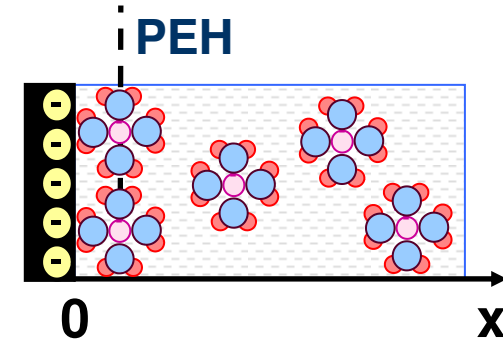
2

### Gouy-Chapman



3

### Stern



4

5

6



Dépendance de la capacité en fonction de la tension

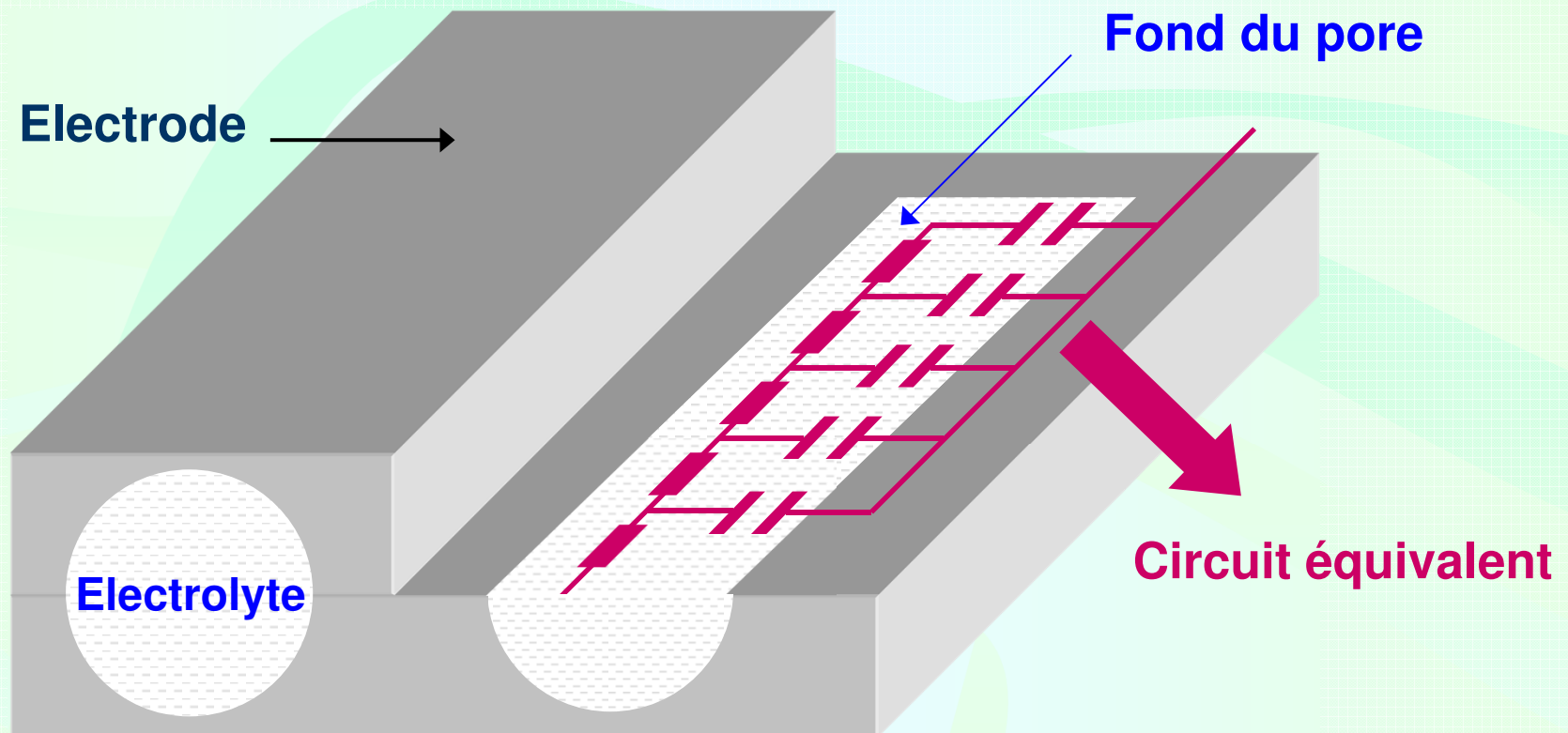


# L'hybridation du GE à PAC

## L'électrode poreuse des supercondensateurs

1  
2  
3  
4  
5  
6

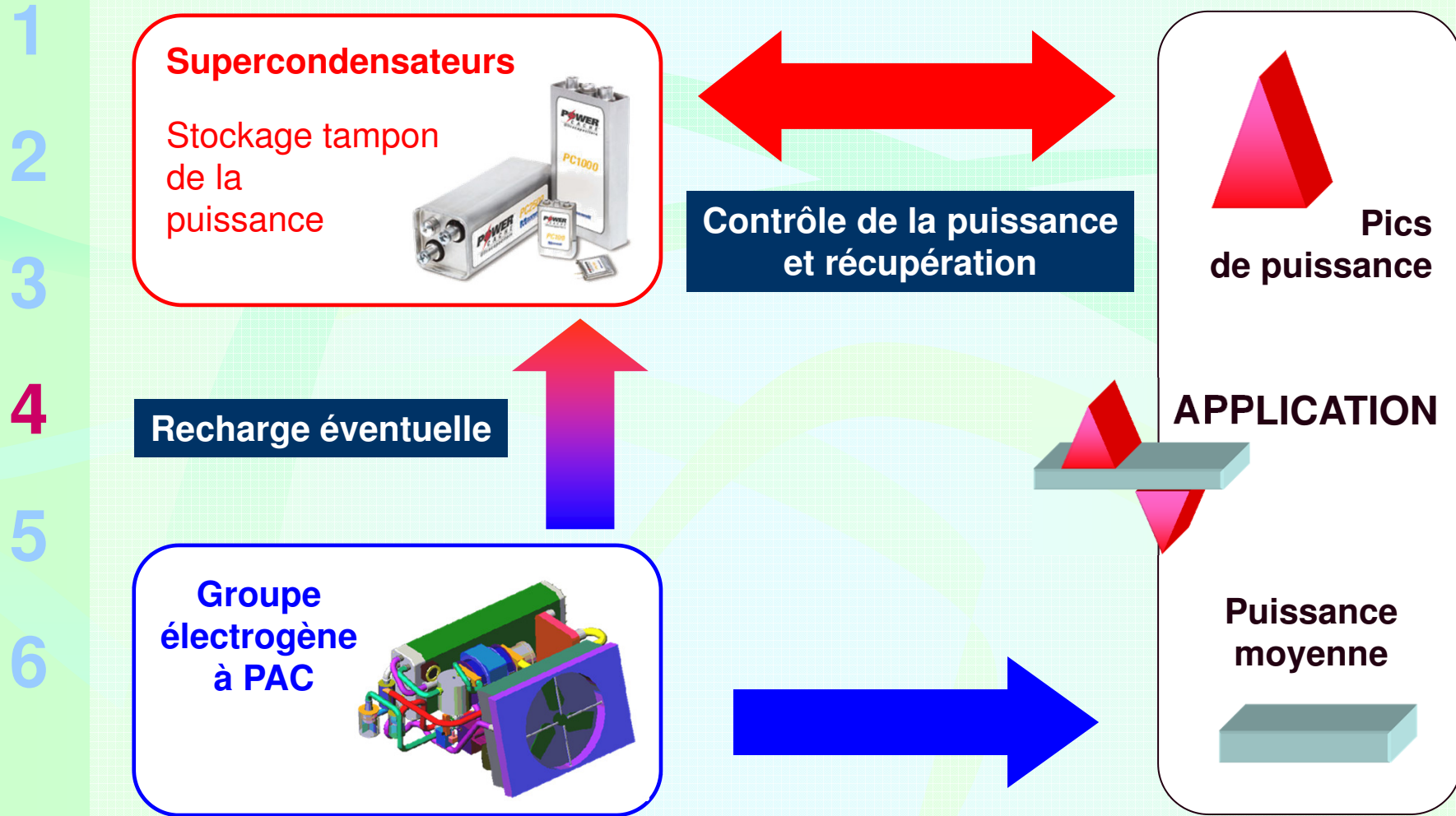
Comportement type ligne de transmission



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.

1

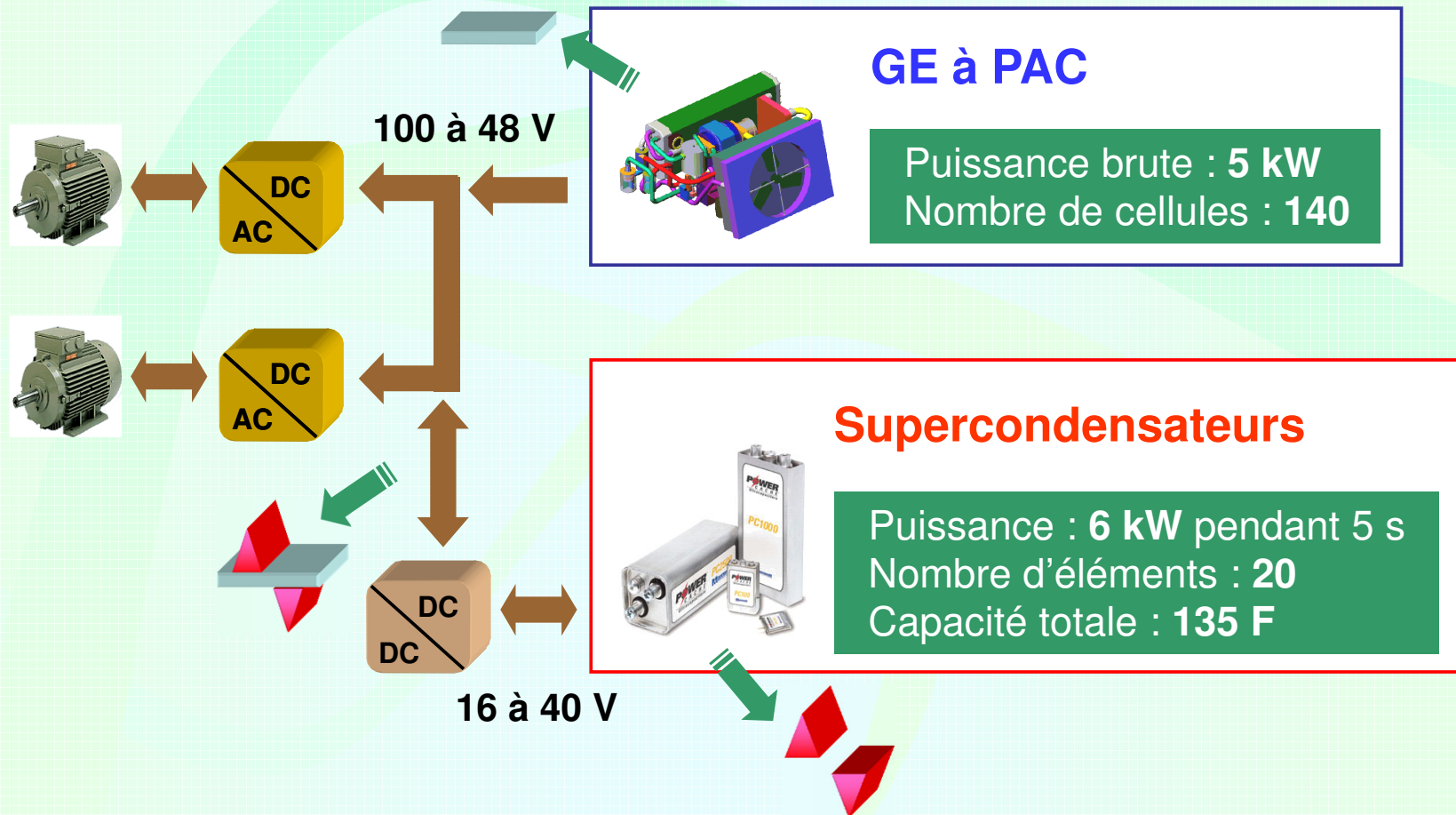
2

3

4

5

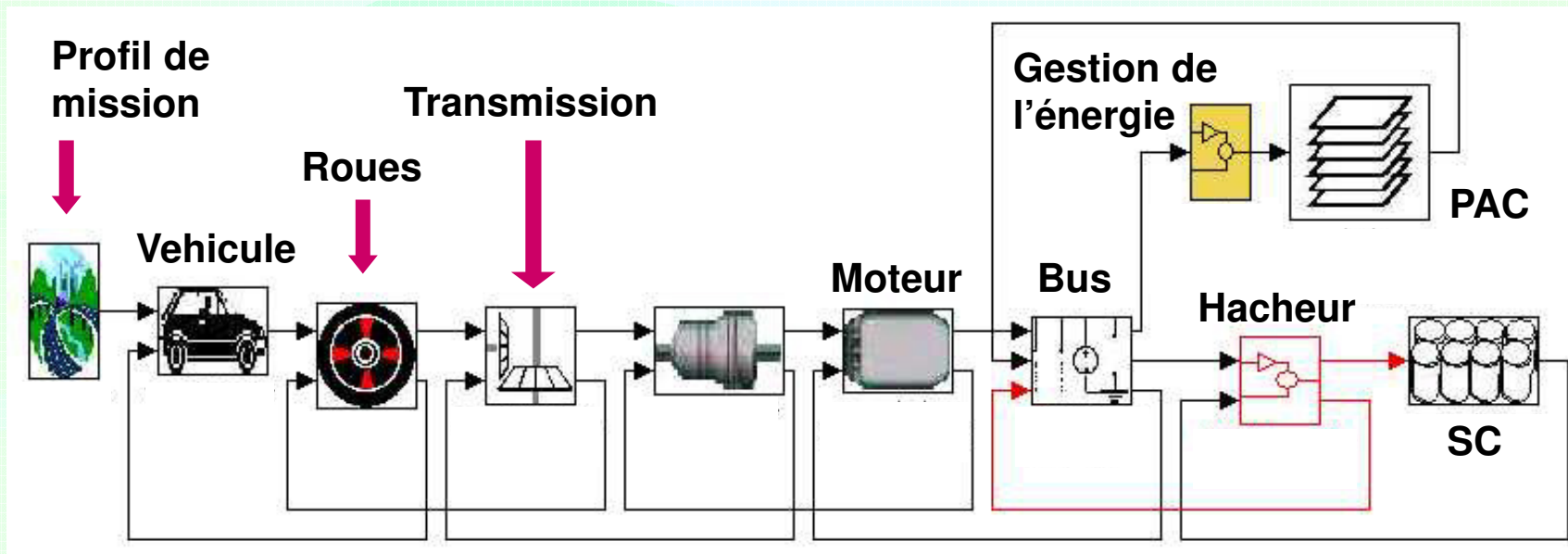
6



# L'hybridation du GE à PAC en simulation QS

## Le logiciel Advisor (NREL)

1 Modèles simplifiés quasi-statiques, semi-empiriques



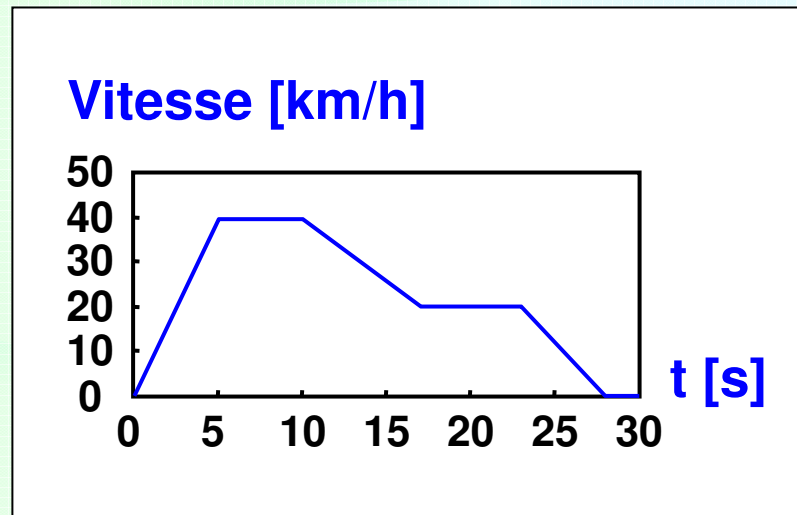
6 Logiciel particulièrement adapté pour la mise au point de stratégies de gestion de l'énergie dans les véhicules hybrides.

Dans l'environnement Matlab / Simulink.

# L'hybridation du GE à PAC en simulation QS

## Le logiciel Advisor (NREL)

1  
2  
3  
4  
5  
6

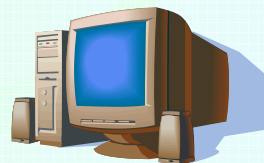


- vitesse effective
- consommation
- puissances
- grandeurs électriques
- etc

Profil de mission  
Caractéristiques du véhicule

Résultats

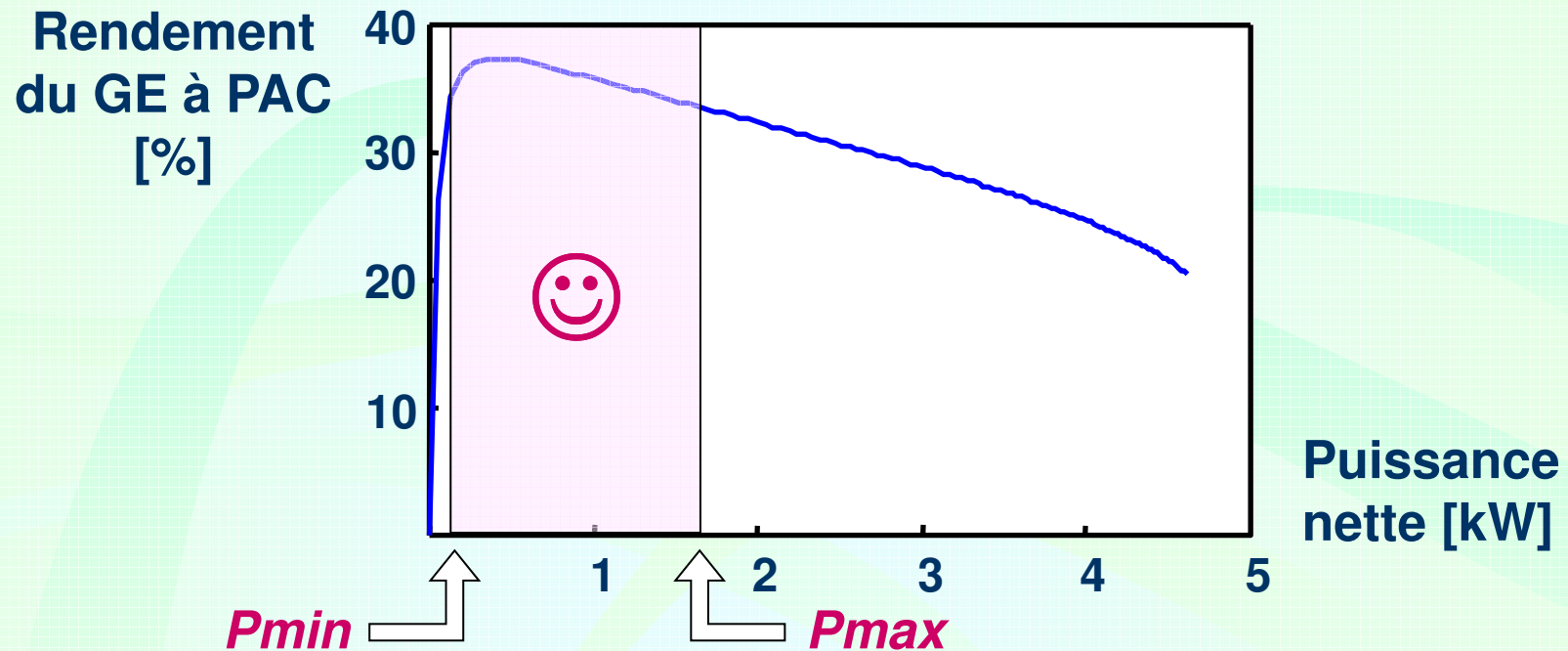
Simulation



# L'hybridation du GE à PAC en simulation QS

## Principe de la première stratégie

1  
2  
3  
4  
5  
6



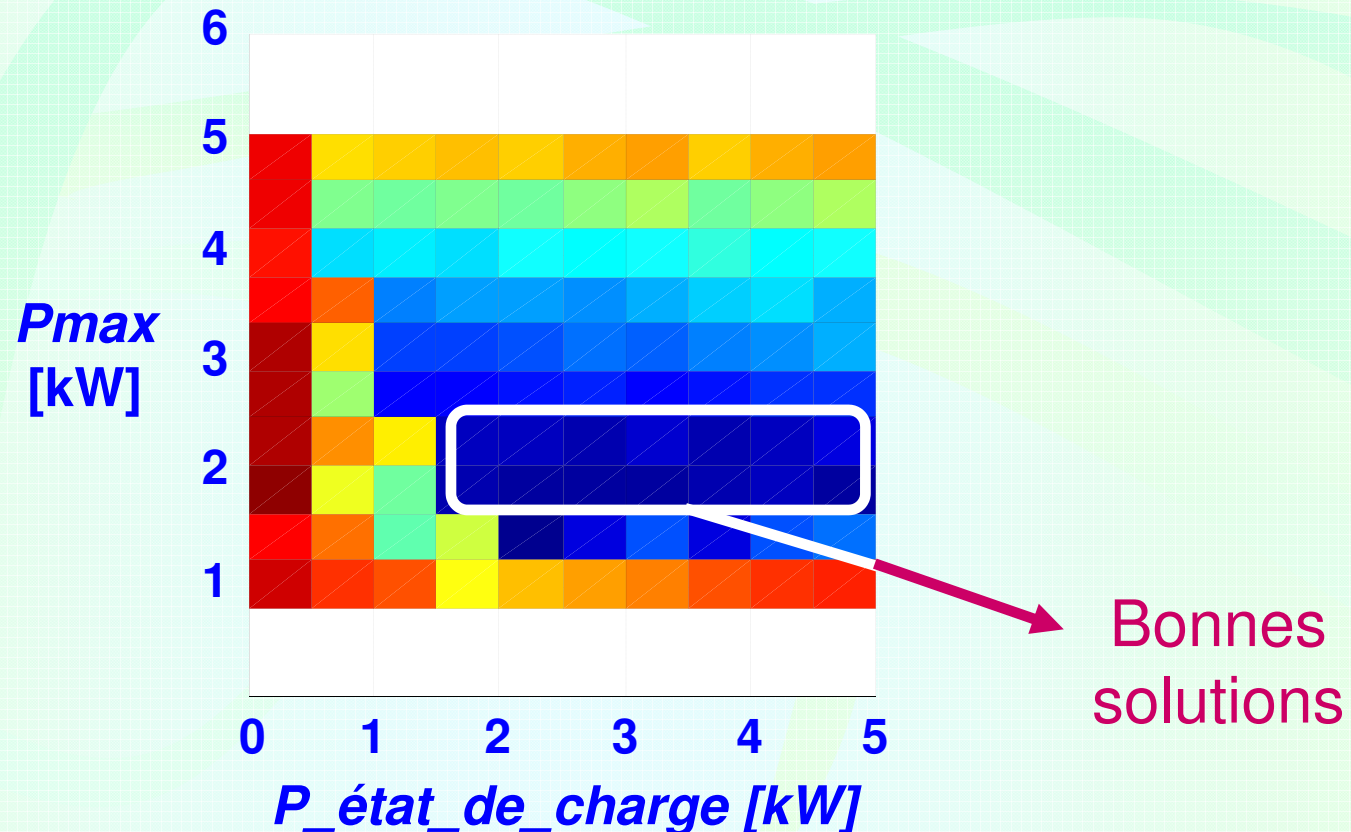
- Le GE à PAC doit fonctionner à charge partielle, là où le rendement est bon ( $P_{min}$ ,  $P_{max}$ )
- La puissance délivrée par le GE à PAC est ajustée de manière à réguler l'état de charge des supercondensateurs à 75% (variable  $P_{état\_de\_charge}$ )

# 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

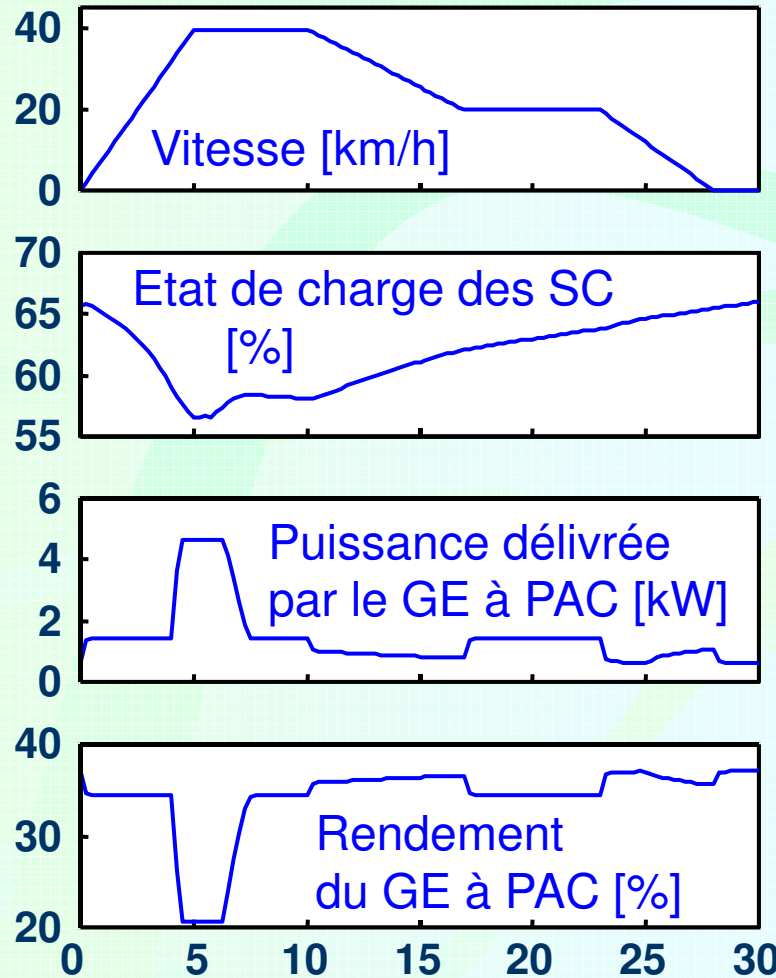
Réponses des routines affichées sous forme de surface :



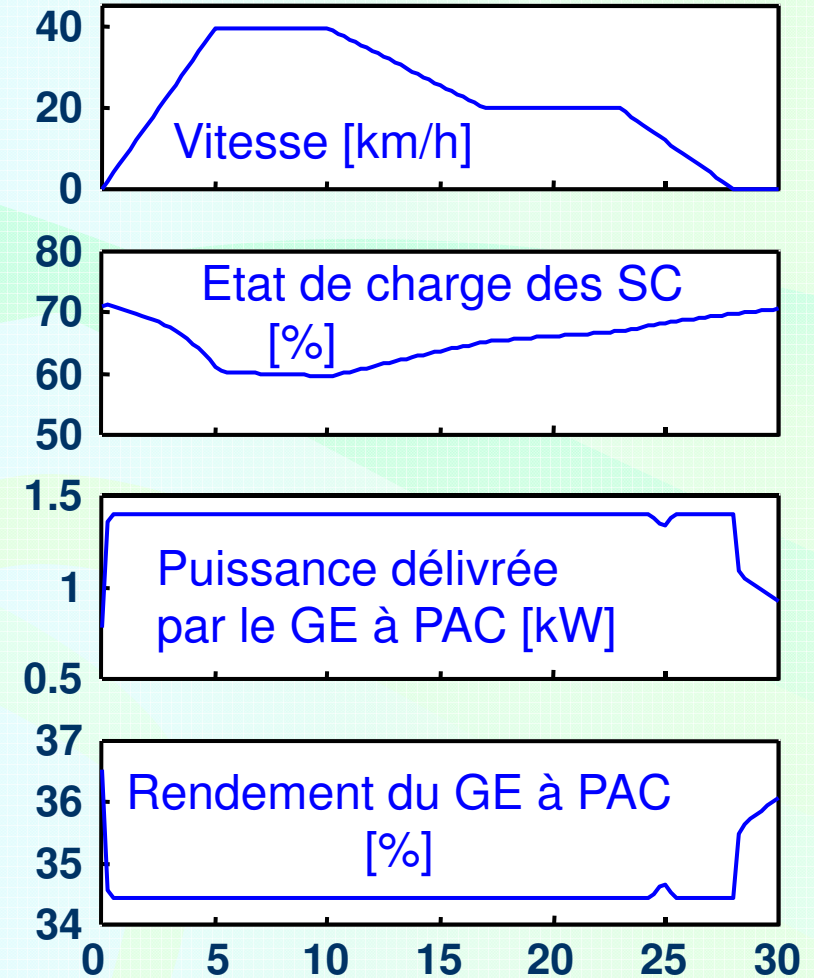
# L'hybridation du GE à PAC en simulation QS

## Exemple d'optimisation sur un profil de mission

1  
2  
3  
4  
5  
6



**Paramètres fixés sans optimisation**  
**Consommation : 0,88 g d'H<sub>2</sub>**



**Avec optimisation**  
**Consommation : 0,74 g d'H<sub>2</sub>**



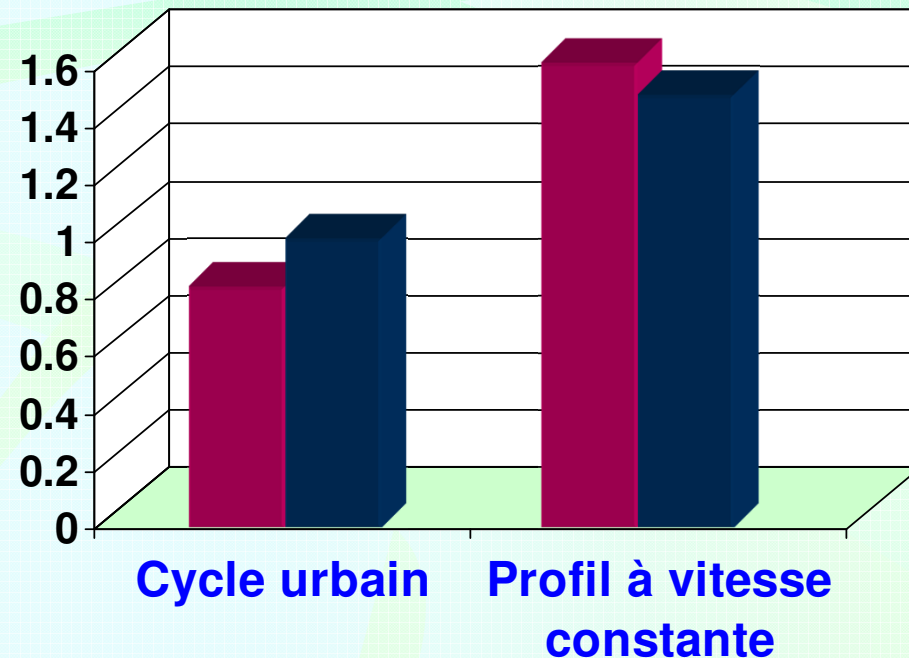
# L'hybridation du GE à PAC en simulation QS

## 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

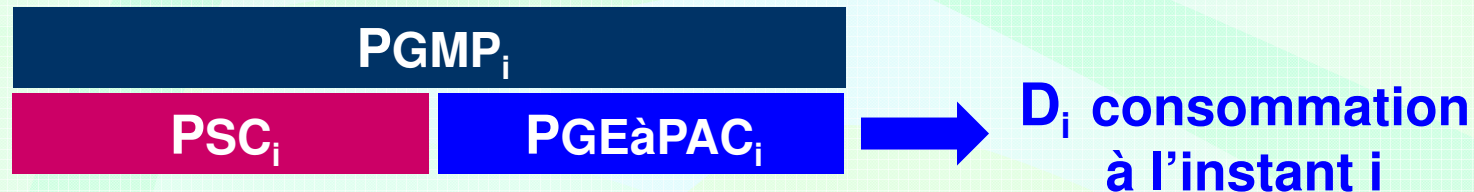
1

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 :

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

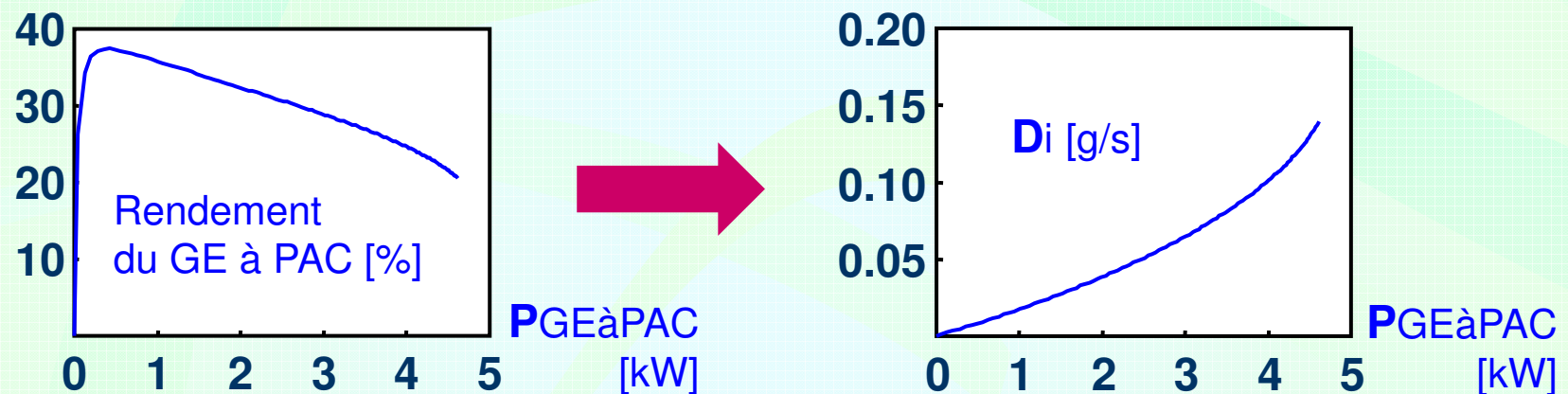
# L'hybridation du GE à PAC en simulation QS

## 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

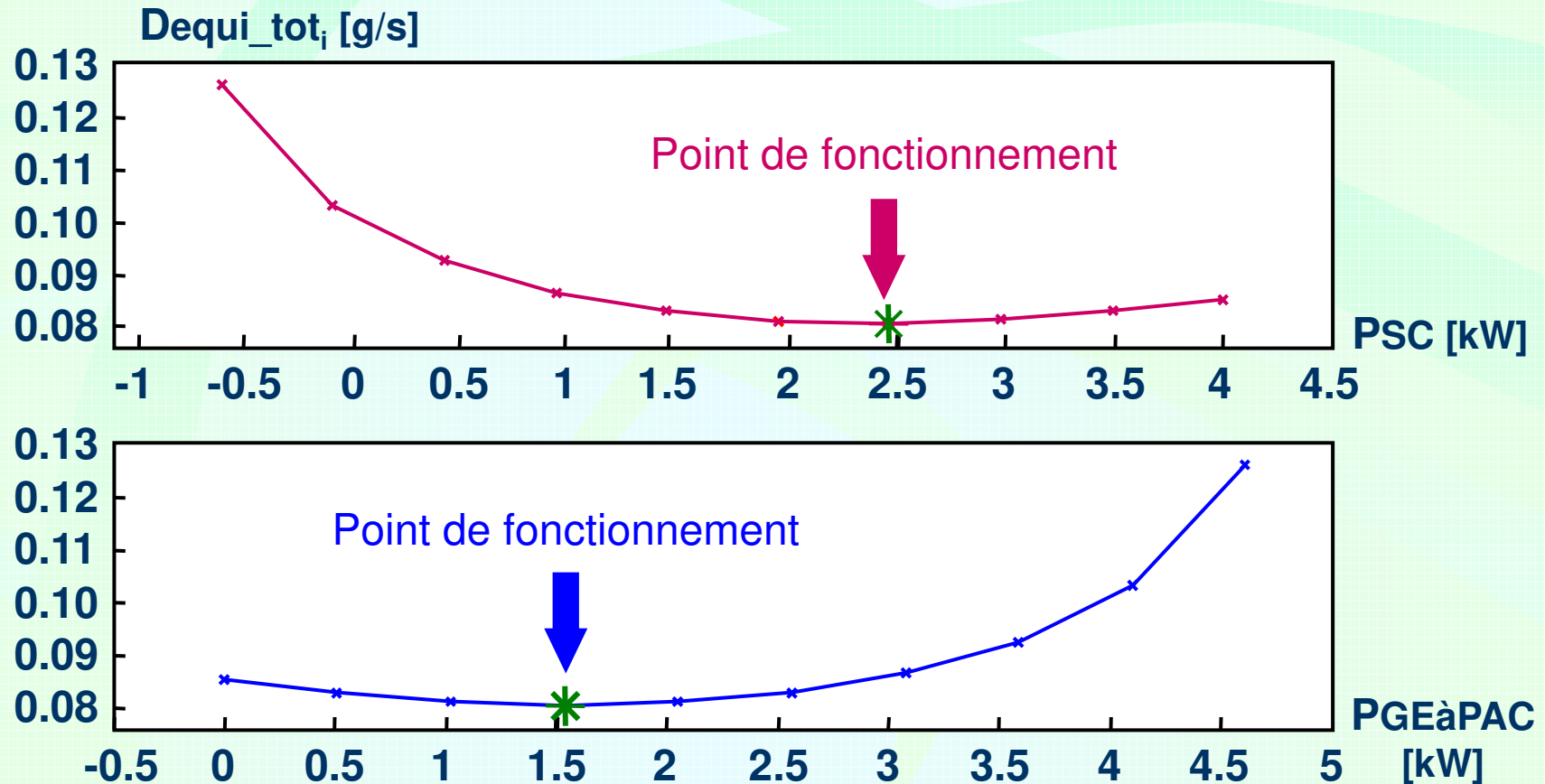
$Dequi\_SC_i = D_i(PGE\grave{a}PAC_{moy}) \times dt_{moy} / 0.9$  avec :

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

# 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 :

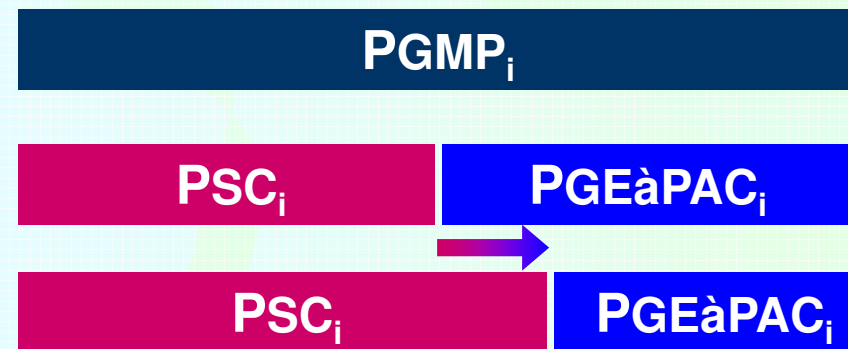
$$\text{Dequi\_tot\_min} = \min(\text{Dequi\_tot}_1) + \dots + \min(\text{Dequi\_tot}_n)$$

- 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

5 Distribution sans régulation



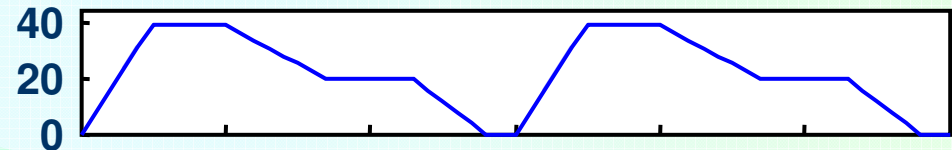
Distribution avec régulation

# L'hybridation du GE à PAC en simulation QS

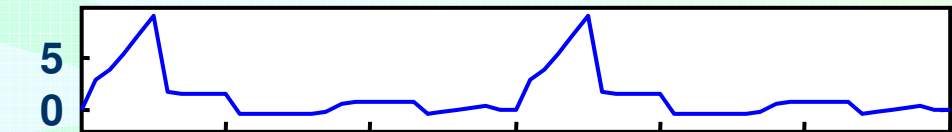
## Seconde stratégie - principe

1

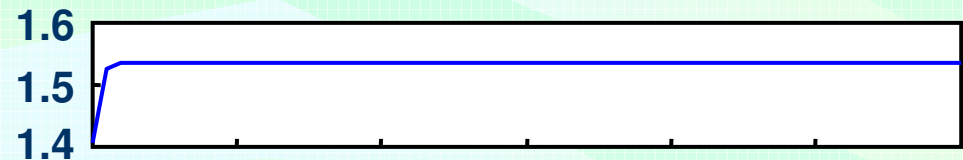
Vitesse [km/h]



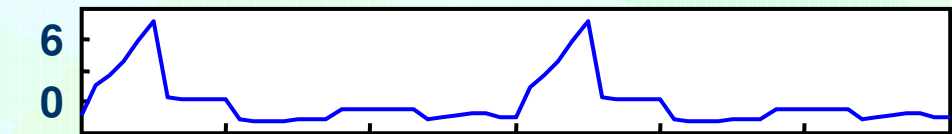
2

Puissance  
GMP [kW]

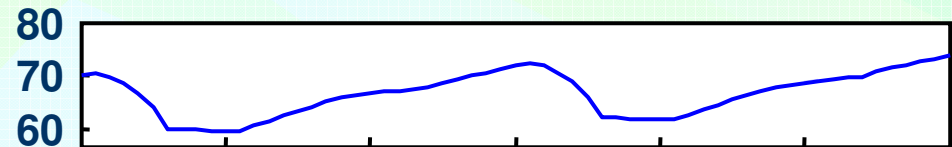
3

Puissance  
GE à PAC [kW]

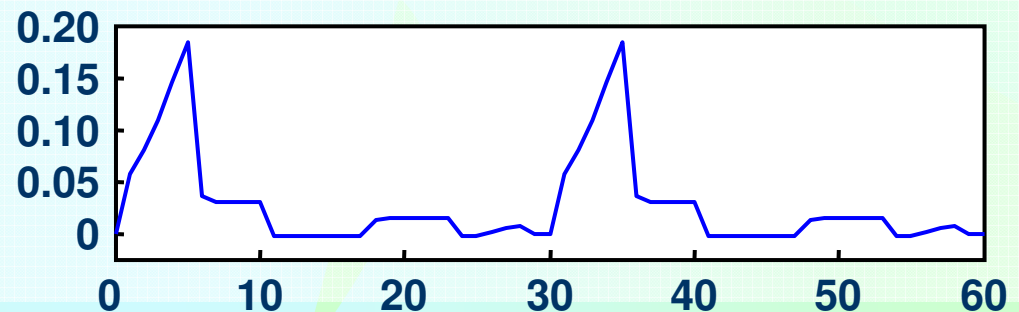
4

Puissance  
SC [kW]

5

Etat de charge  
des SC [%]

6

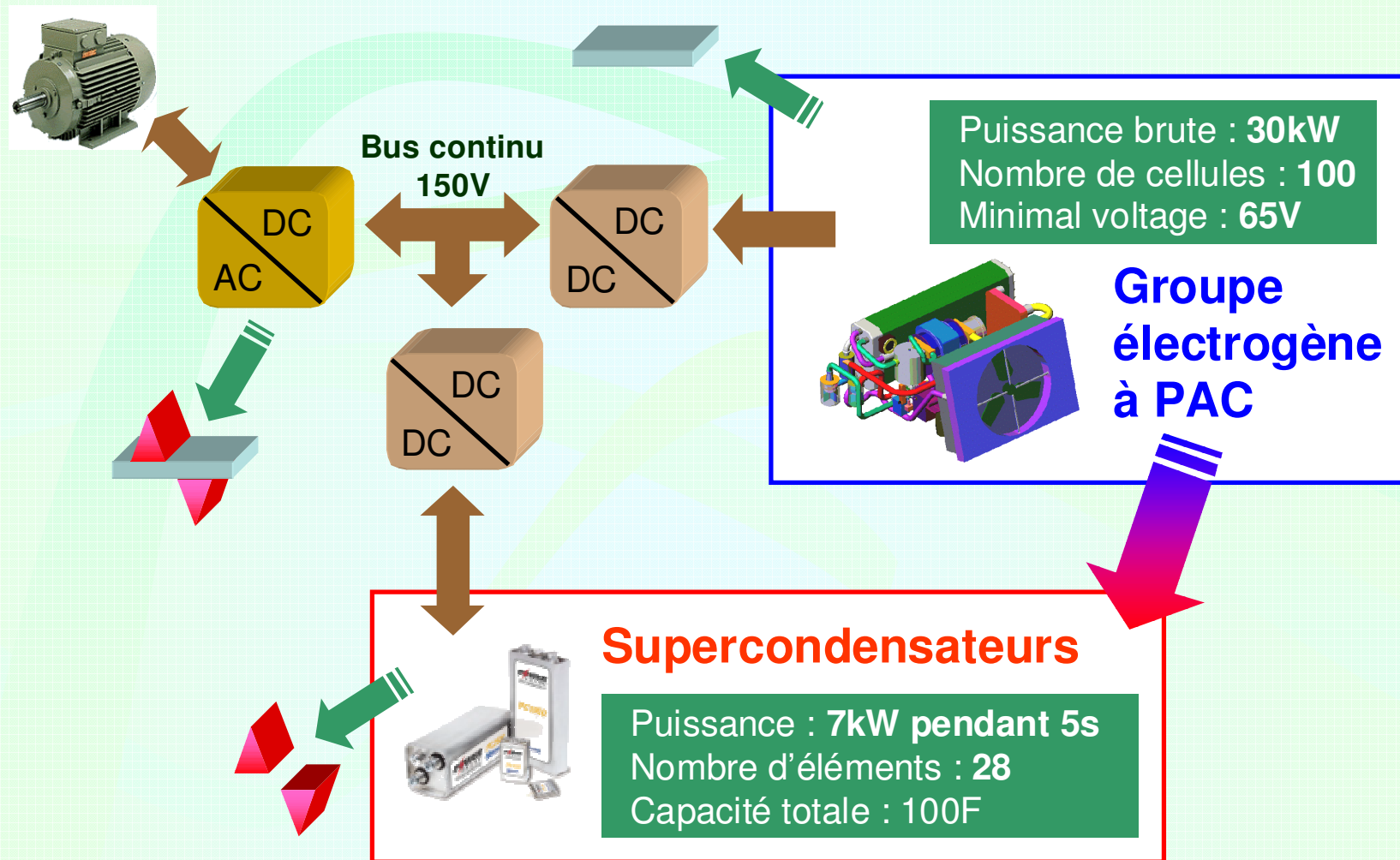
Consommation  
instantanée  
totale équivalente [g/s]

# L'hybridation du GE à PAC

## Simulation en dynamique

### ■ Architecture de la chaîne de traction :

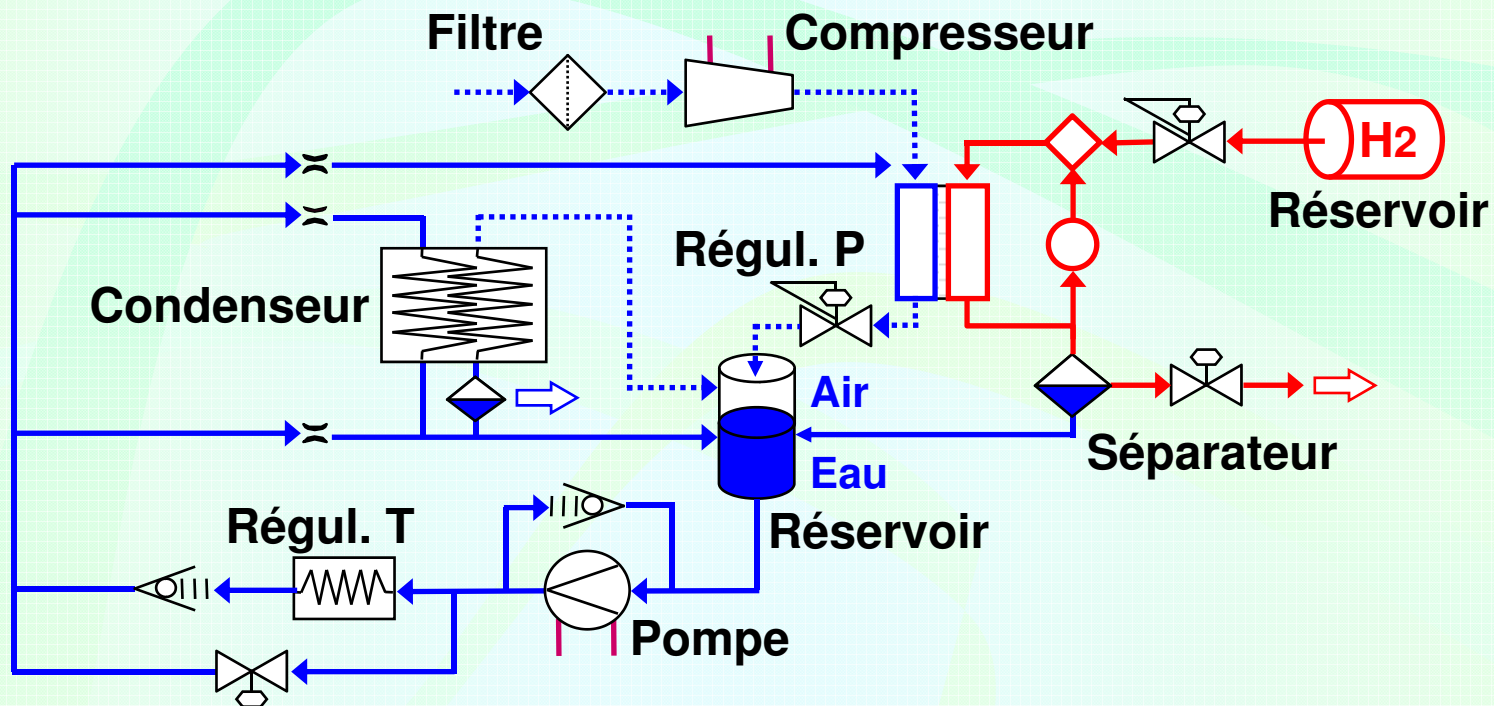
1  
2  
3  
4  
5  
6



# 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.

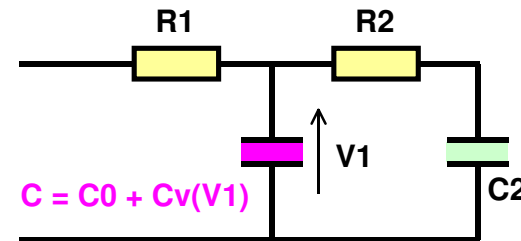
## Modélisation des autres éléments

1

### Supercondensateurs



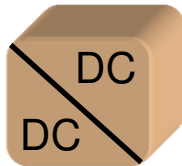
Circuit  
équivalent



2

3

### Convertisseurs



Modèle énergétique et thermique  
Calcul des pertes dans les IGBT

4

5

### Moteurs



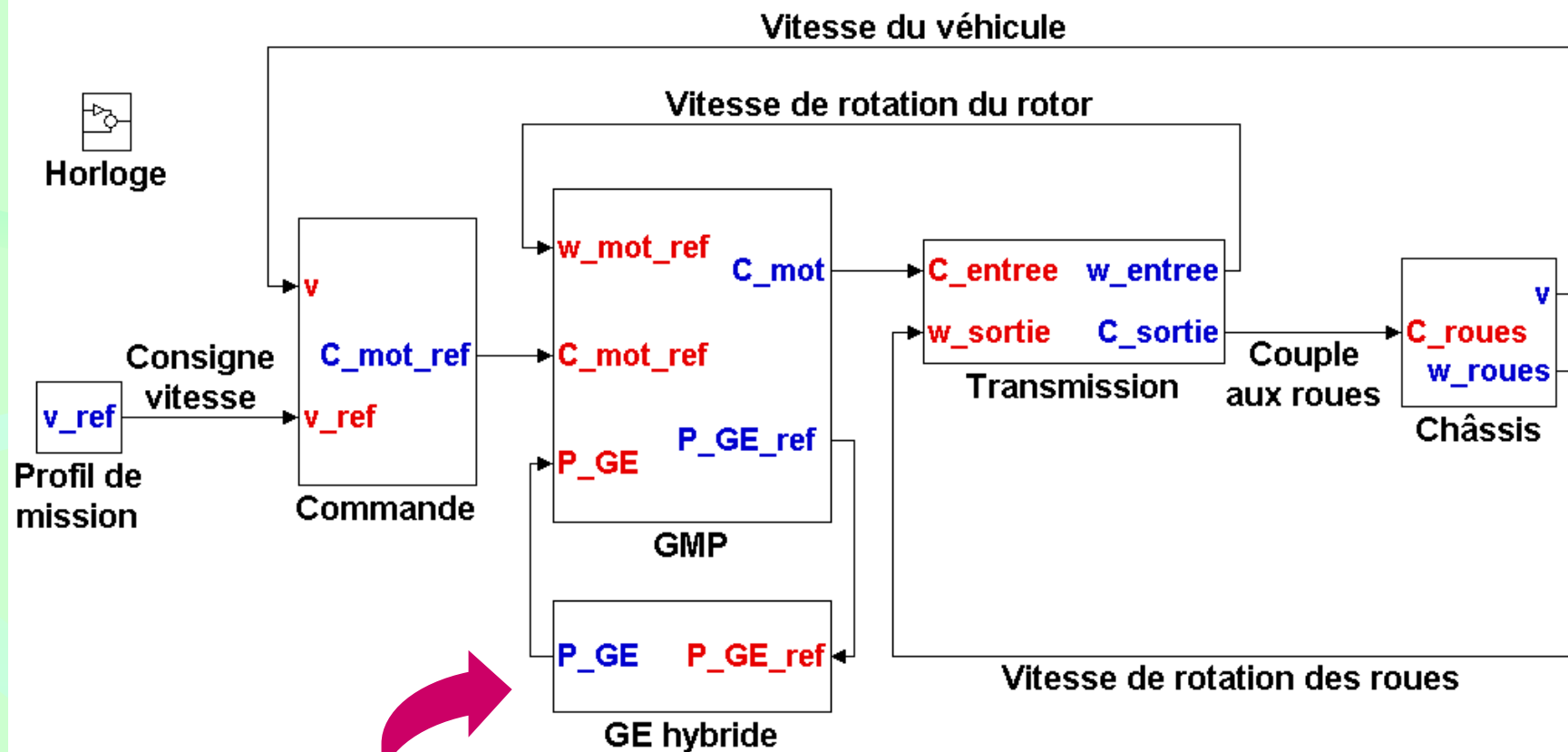
- Modèle quasi-statique construit à partir d'une cartographie
- Modèle dynamique MCC ou DC brushless

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

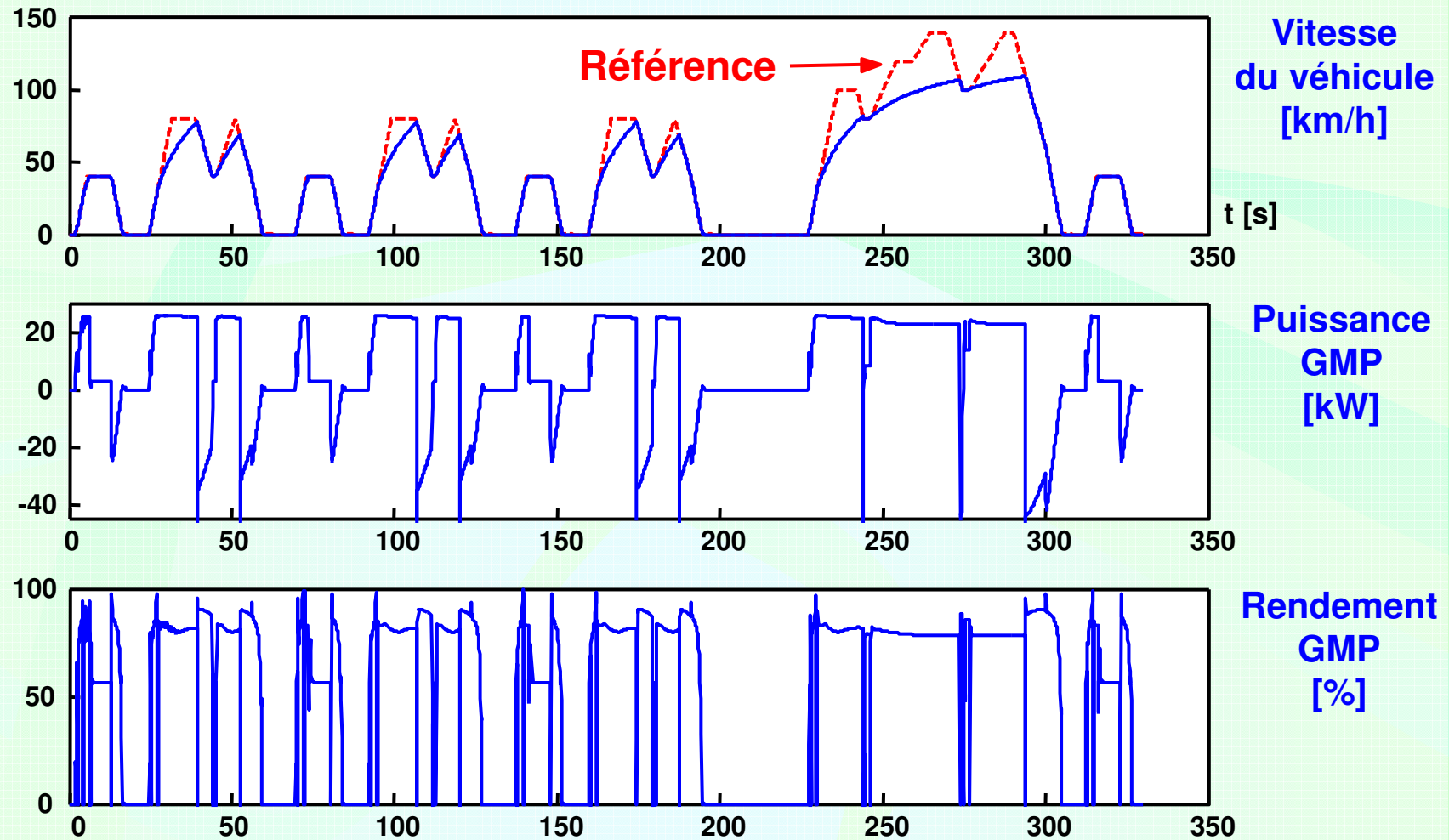


Stratégie développée à partir d'Advisor puis implantée dans notre outil de simulation

# 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

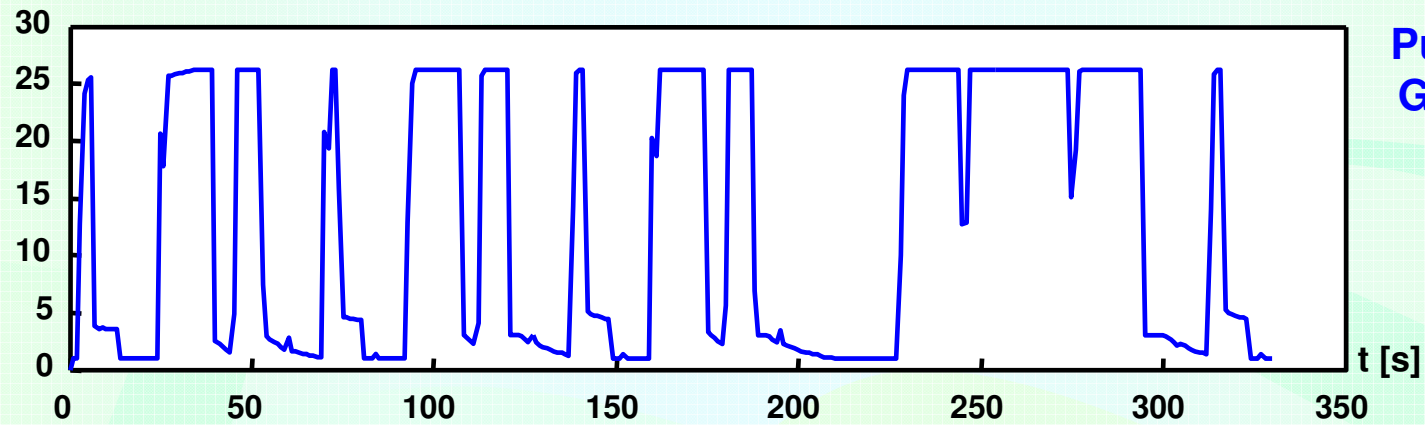
2

3

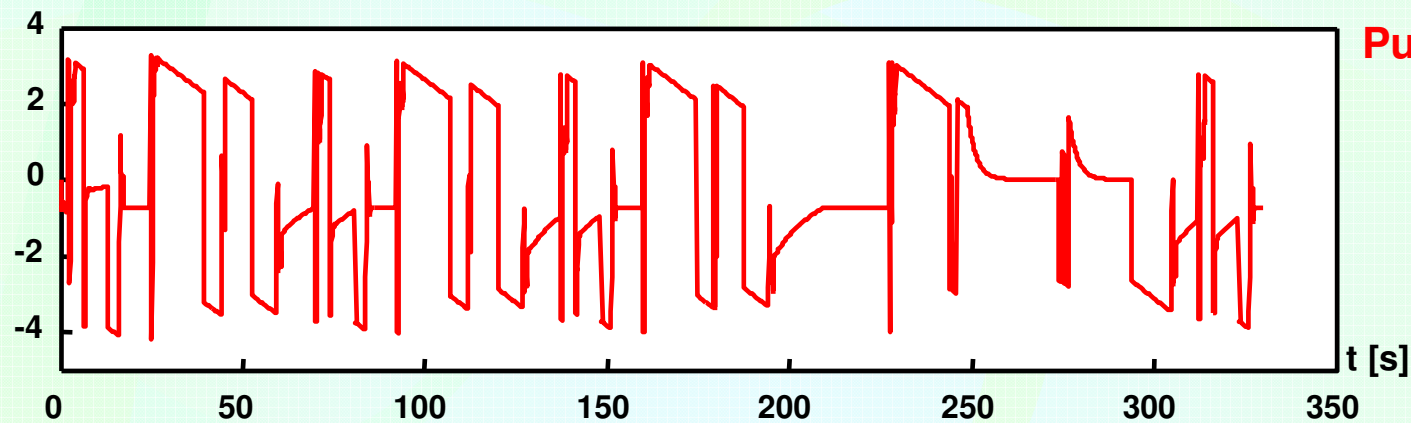
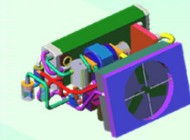
4

5

6



Puissance  
GE à PAC  
[kW]



Puissance SC  
[kW]

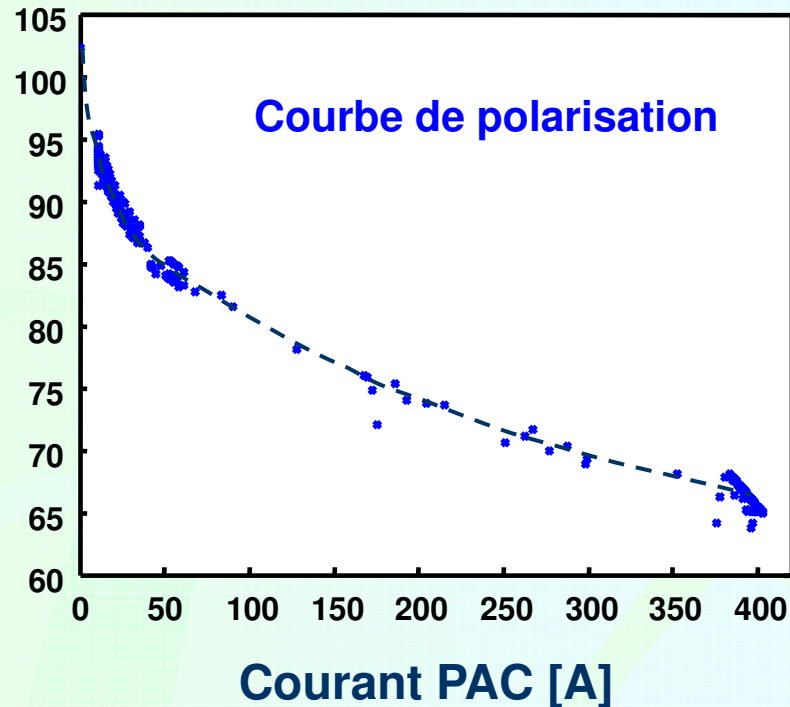


# L'hybridation du GE à PAC en simulation dyn.

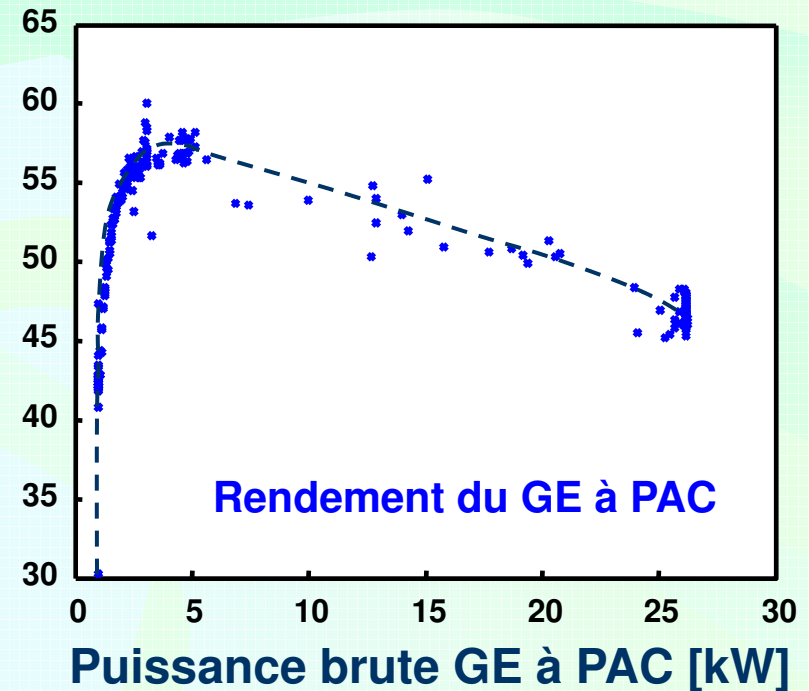
## Points de fonctionnement en dynamique

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

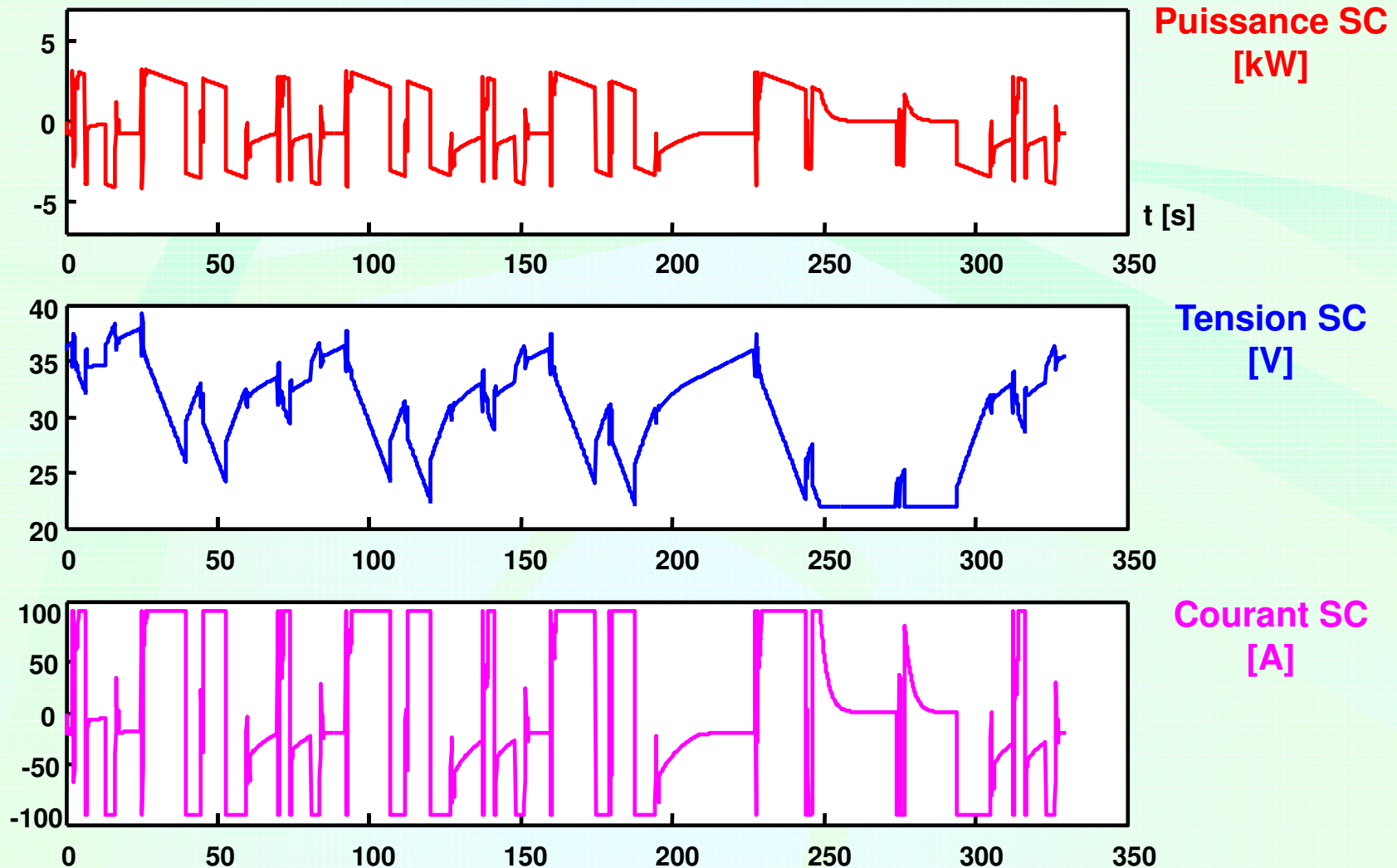
2

3

4

5

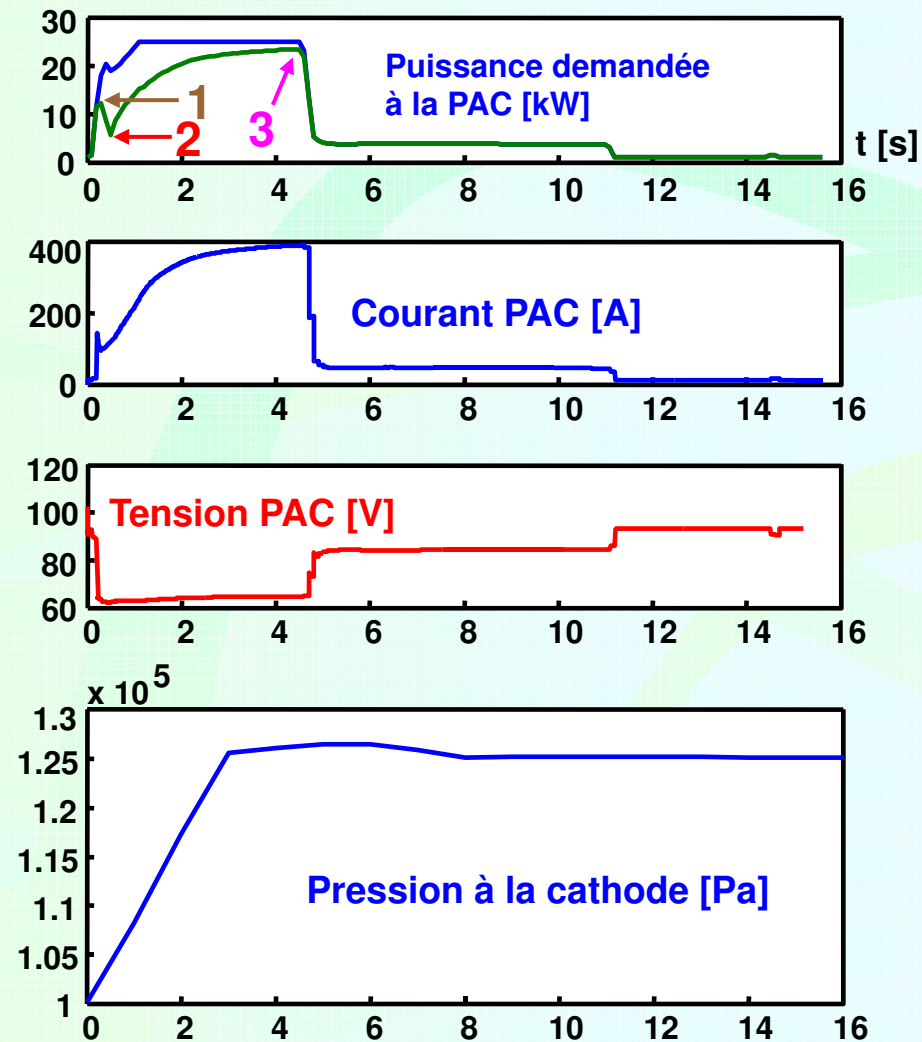
6



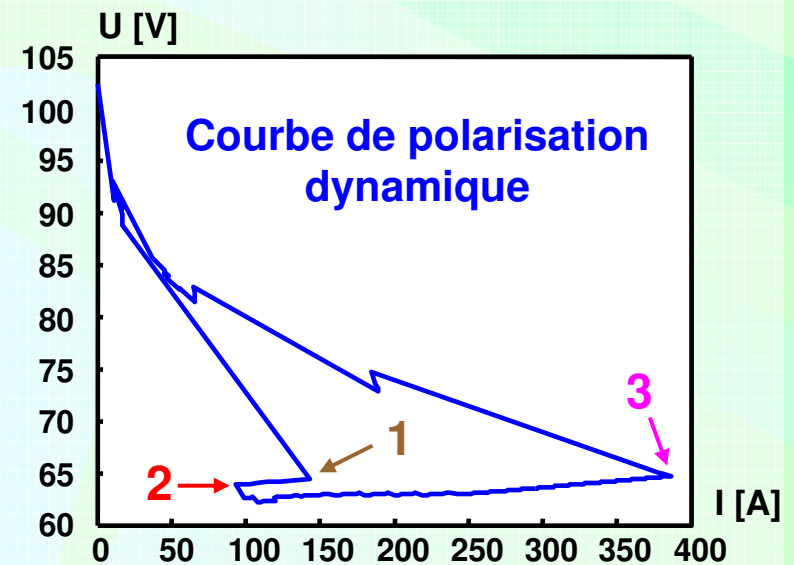
# L'hybridation du GE à PAC en simulation dyn.

## 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

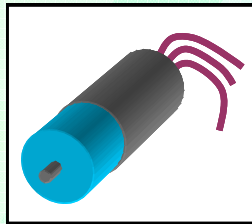
### Quelques caractéristiques :

Masse : 30 kg

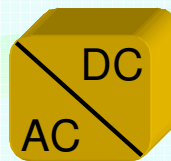
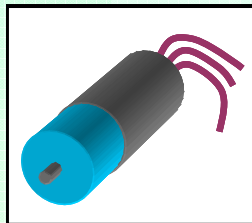
Vitesse maxi. : 0.8 m/s

Accélération maxi. : 1 m/s<sup>2</sup>

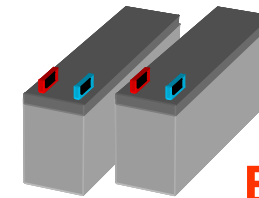
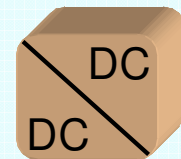
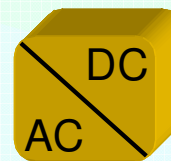
Moteur 1



Moteur 2

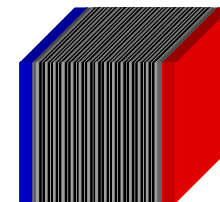


24 V



Batteries

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



PAC

Tension : 14 à 7 V  
Puissance : 240 W

1

2

3

4

5

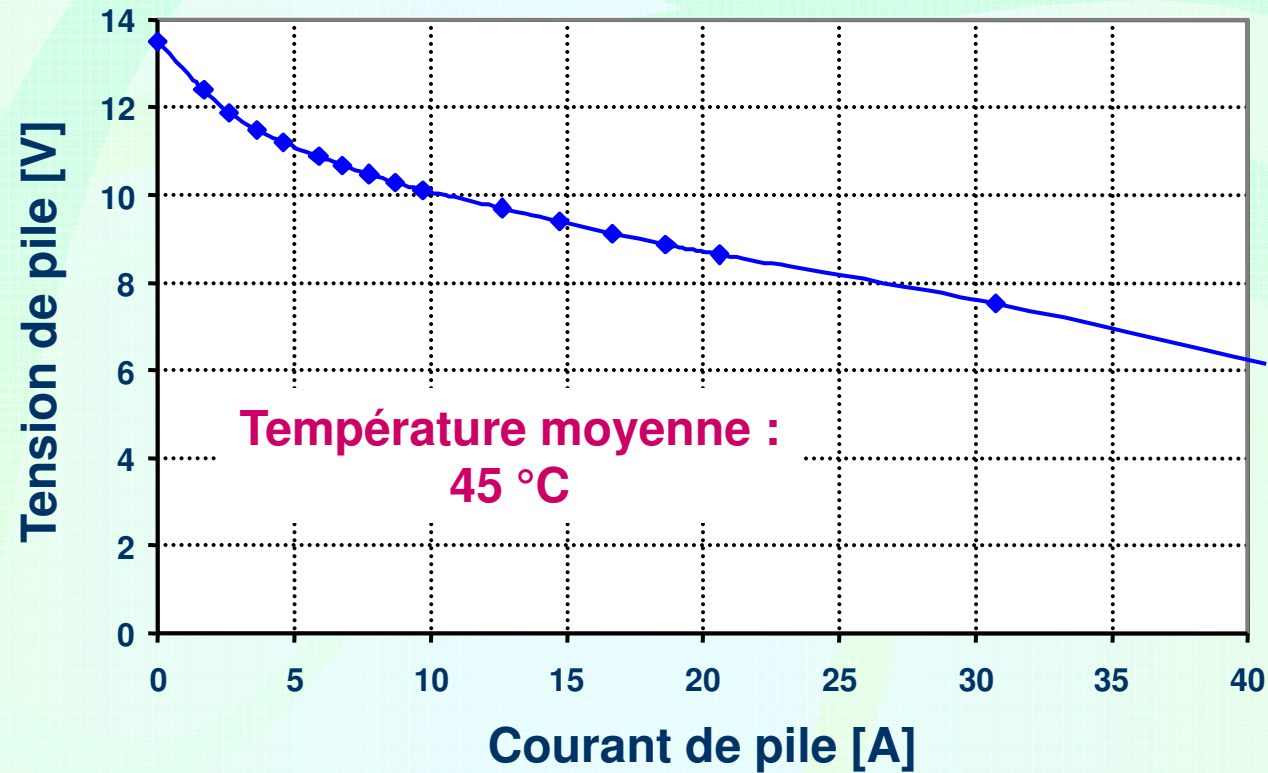
6

# Le démonstrateur RobotPAC

## Description de la pile PEM

1  
2  
3  
4  
5  
6

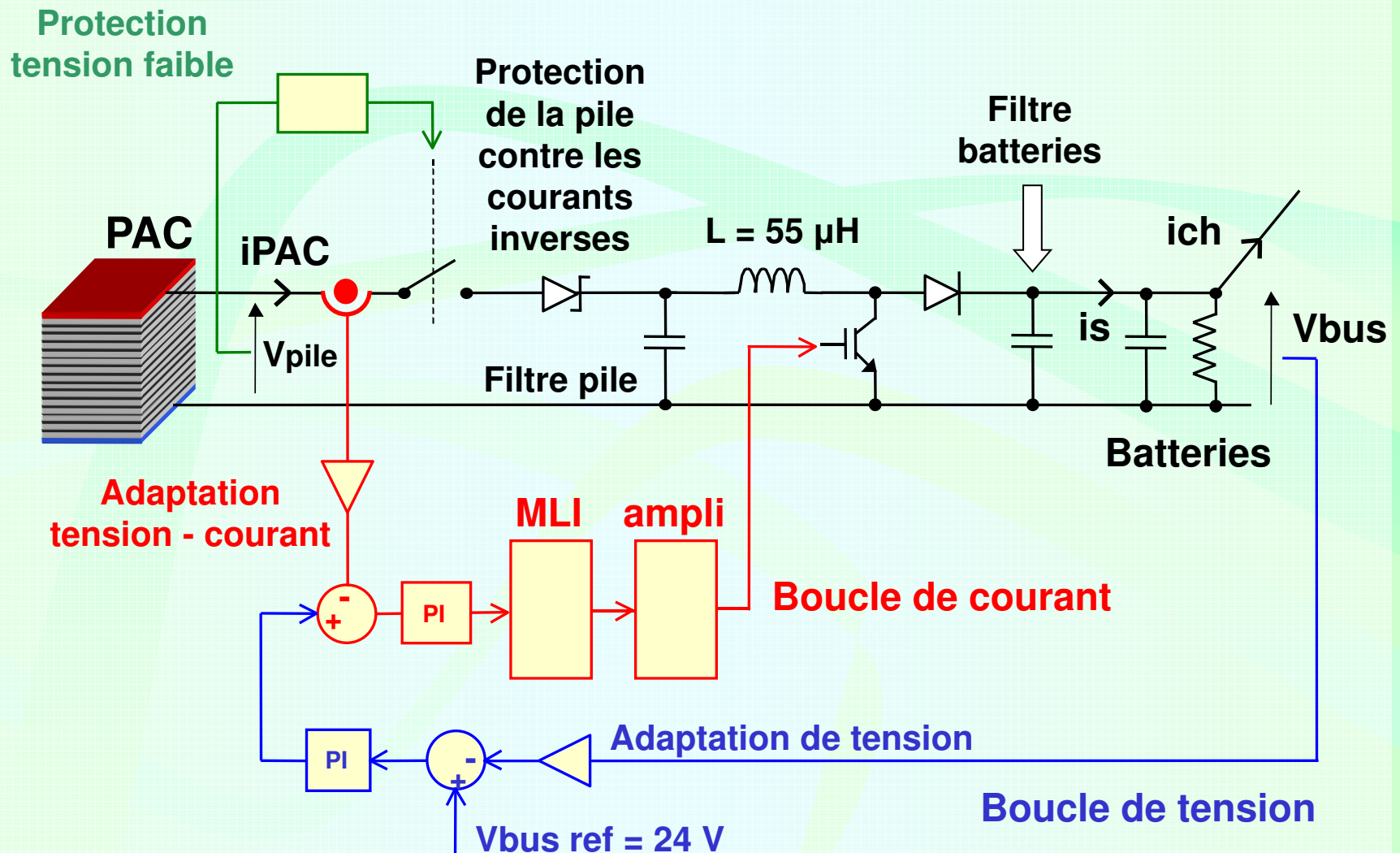
La pile est alimentée en oxygène et hydrogène purs sous 4 bars.  
La pile comporte 14 cellules de surface active 60 cm<sup>2</sup>.



# Le démonstrateur RobotPAC

## Interface électronique pile / batteries

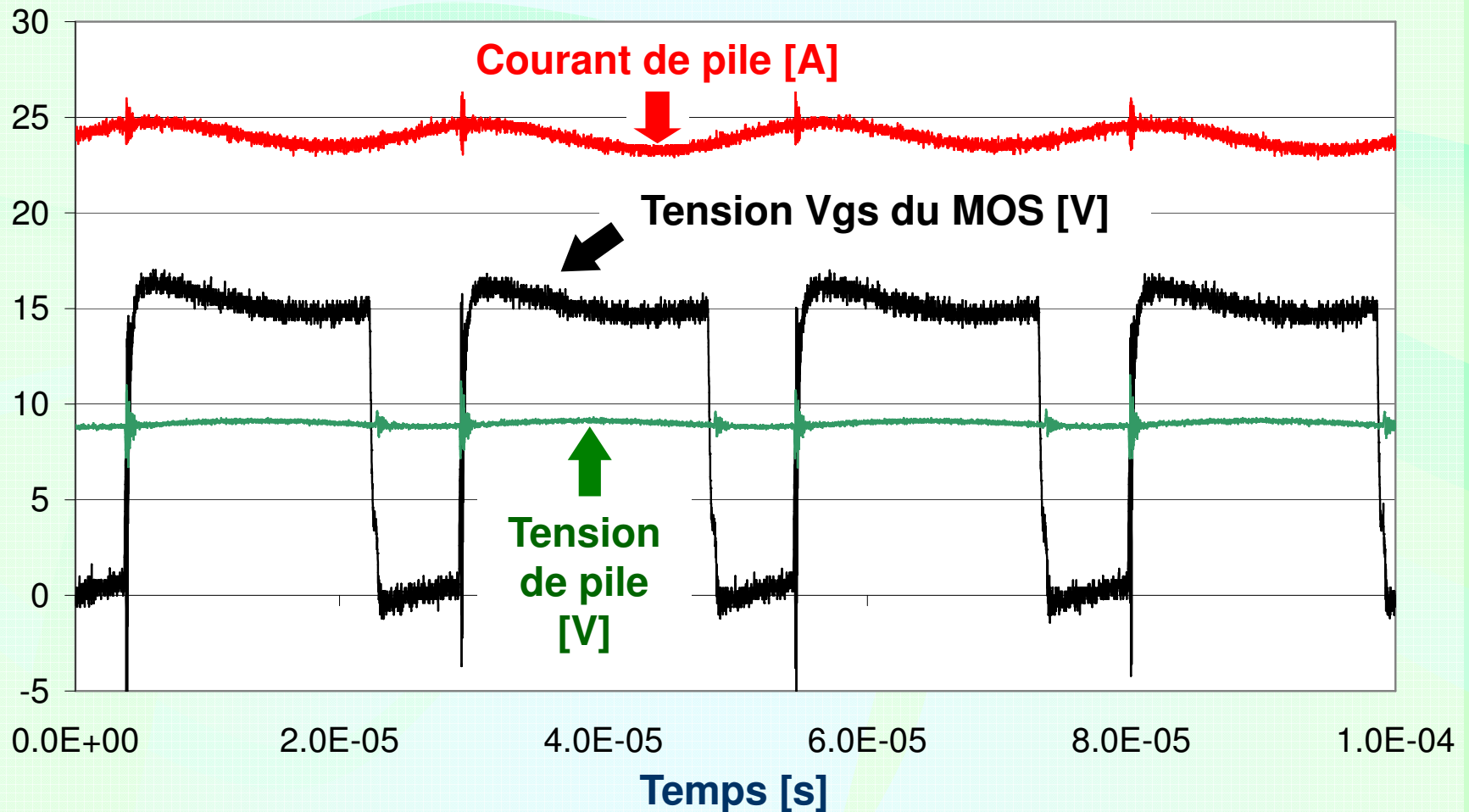
1  
2  
3  
4  
5  
6



# Le démonstrateur RobotPAC

## Formes d'ondes dans le circuit électrique

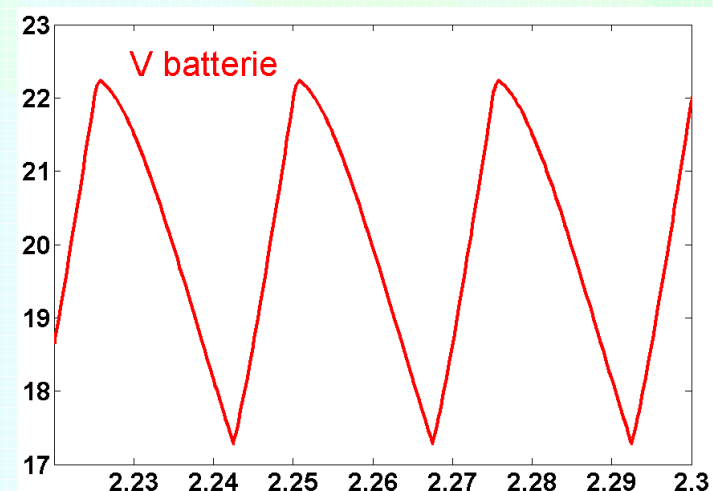
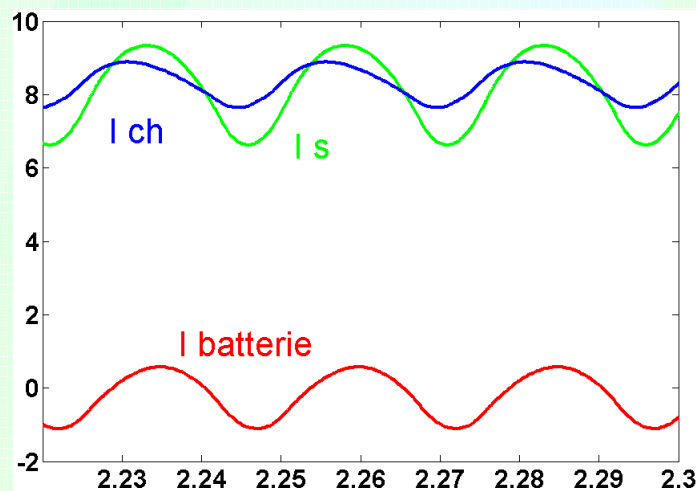
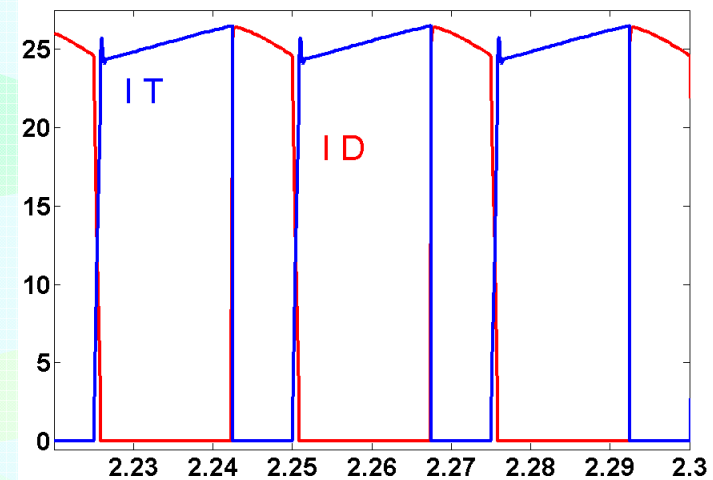
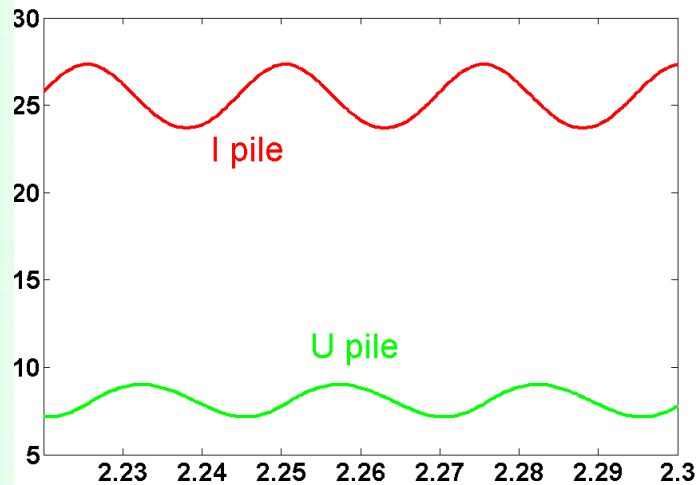
1 A la fréquence de 40 kHz :



# Le démonstrateur RobotPAC

## Modélisation de la chaîne de traction

A 40 kHz, modèle choisi pour la PAC :



1

2

3

4

5

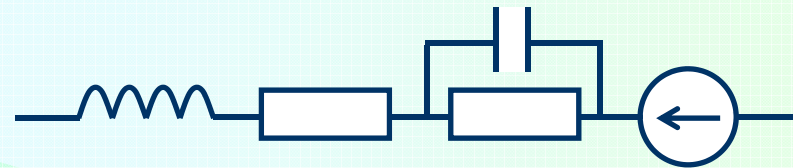
6

# Le démonstrateur RobotPAC

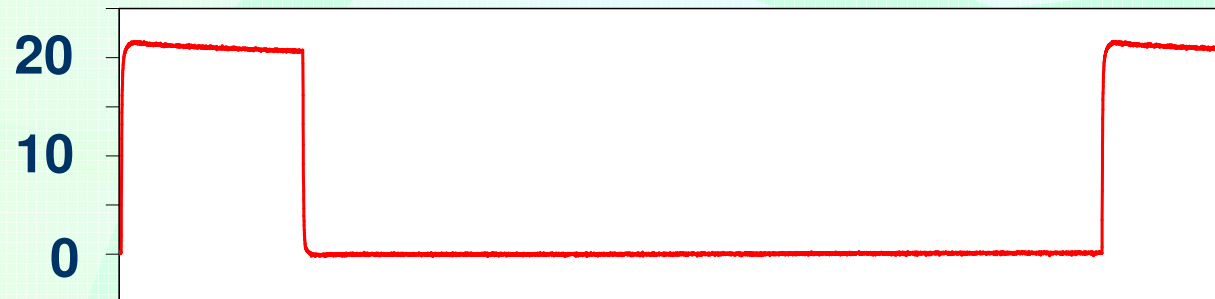
## Modélisation de la chaîne de traction

1

A 100 Hz, modèle de PAC :

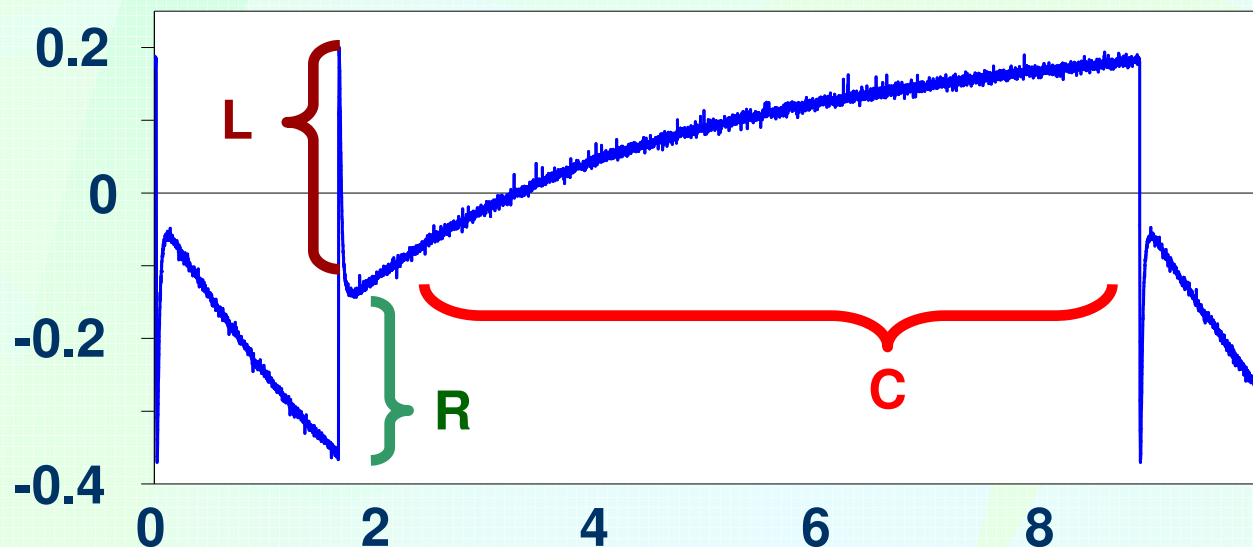


2



Créneaux  
de courant [A]

3



Tension  
Composante  
alternative [V]

4

5

6

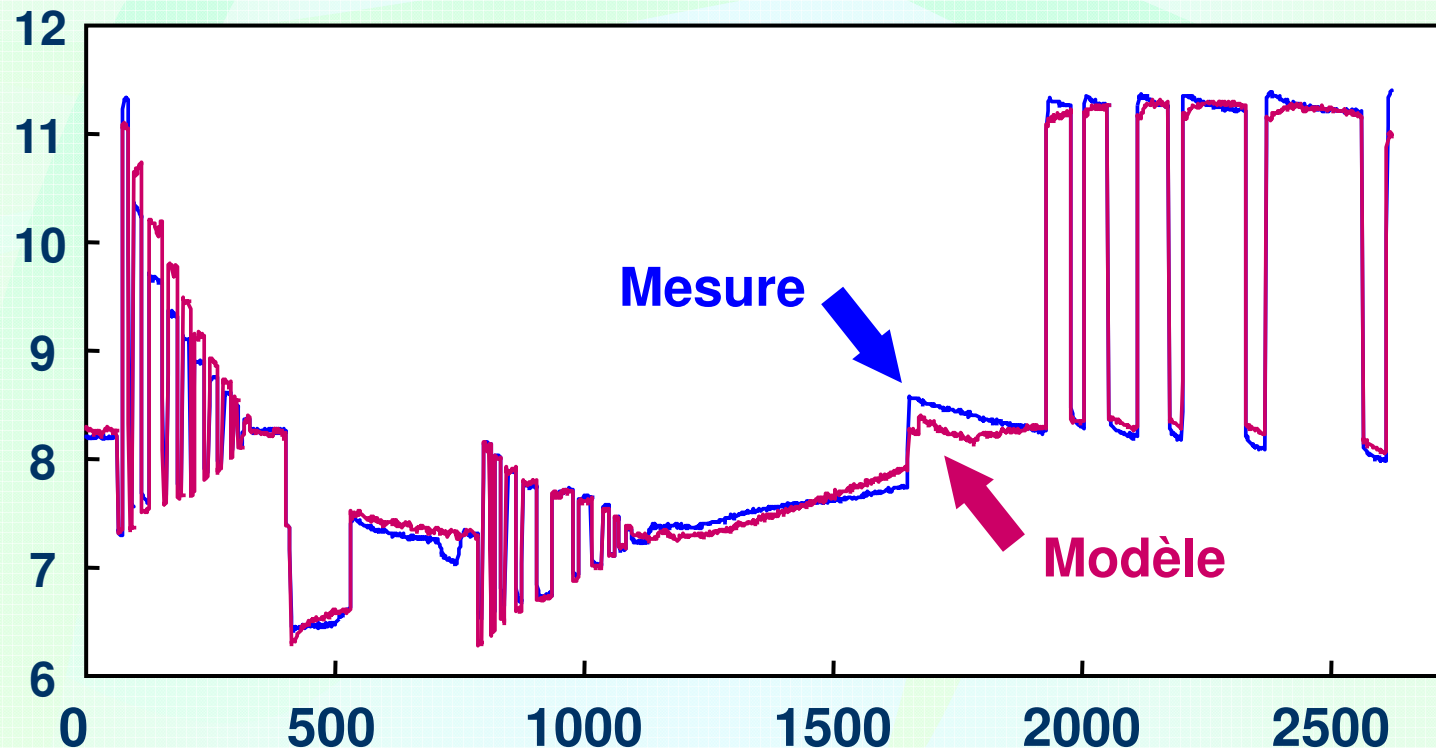
t [ms]

# 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



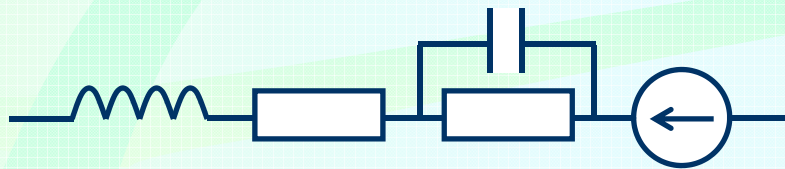


# Le démonstrateur RobotPAC

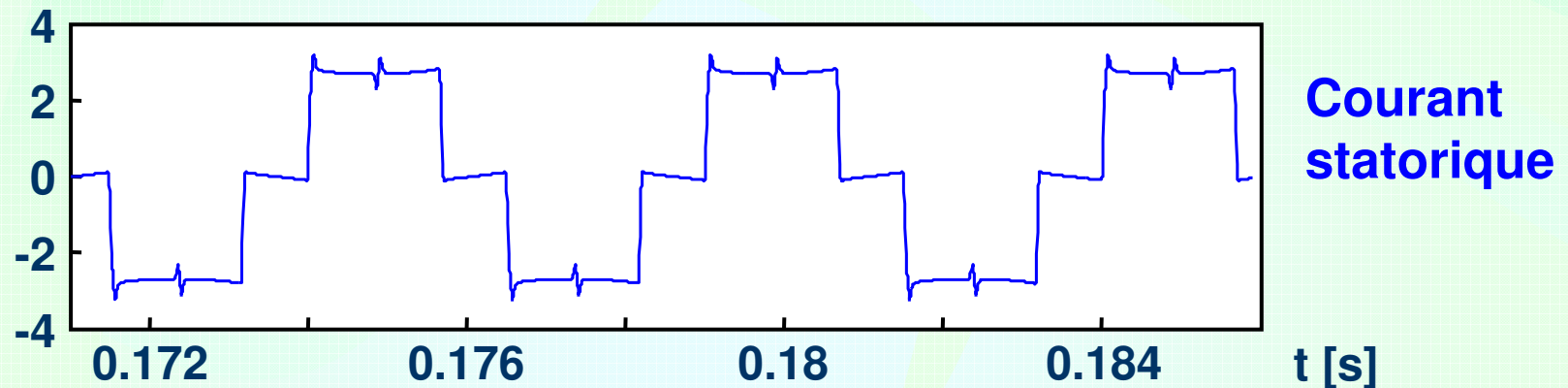
## Modélisation de la chaîne de traction

Pour la commande :

- Circuit électrique équivalent pour la PAC



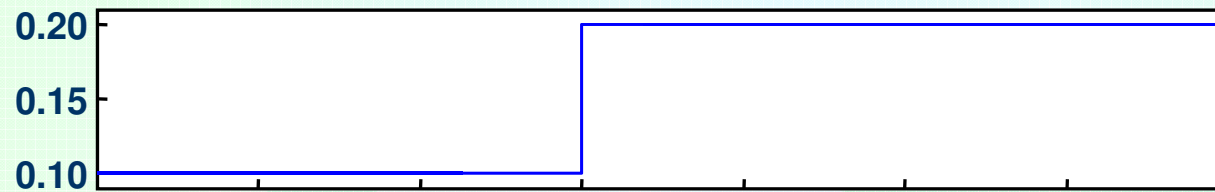
- Modèle moyen triphasé de moteur DC brushless



# Le démonstrateur RobotPAC

## Modélisation de la chaîne de traction

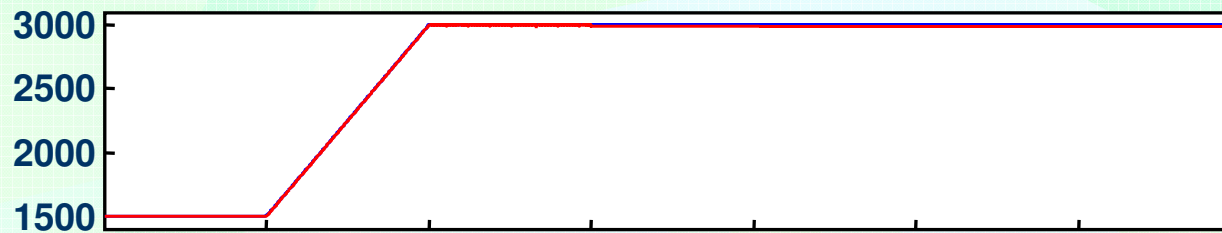
1



Consigne  
de couple  
[Nm]

2

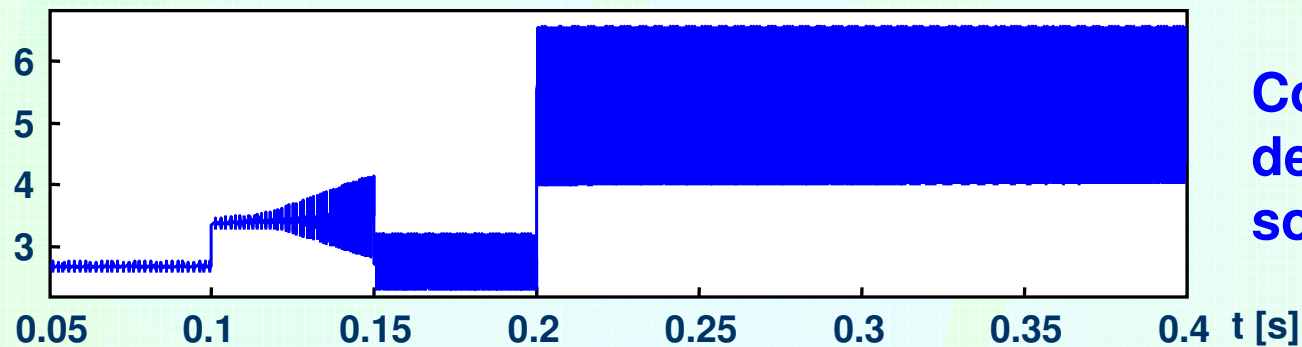
3



Consigne  
de vitesse  
[tr/min]

4

5



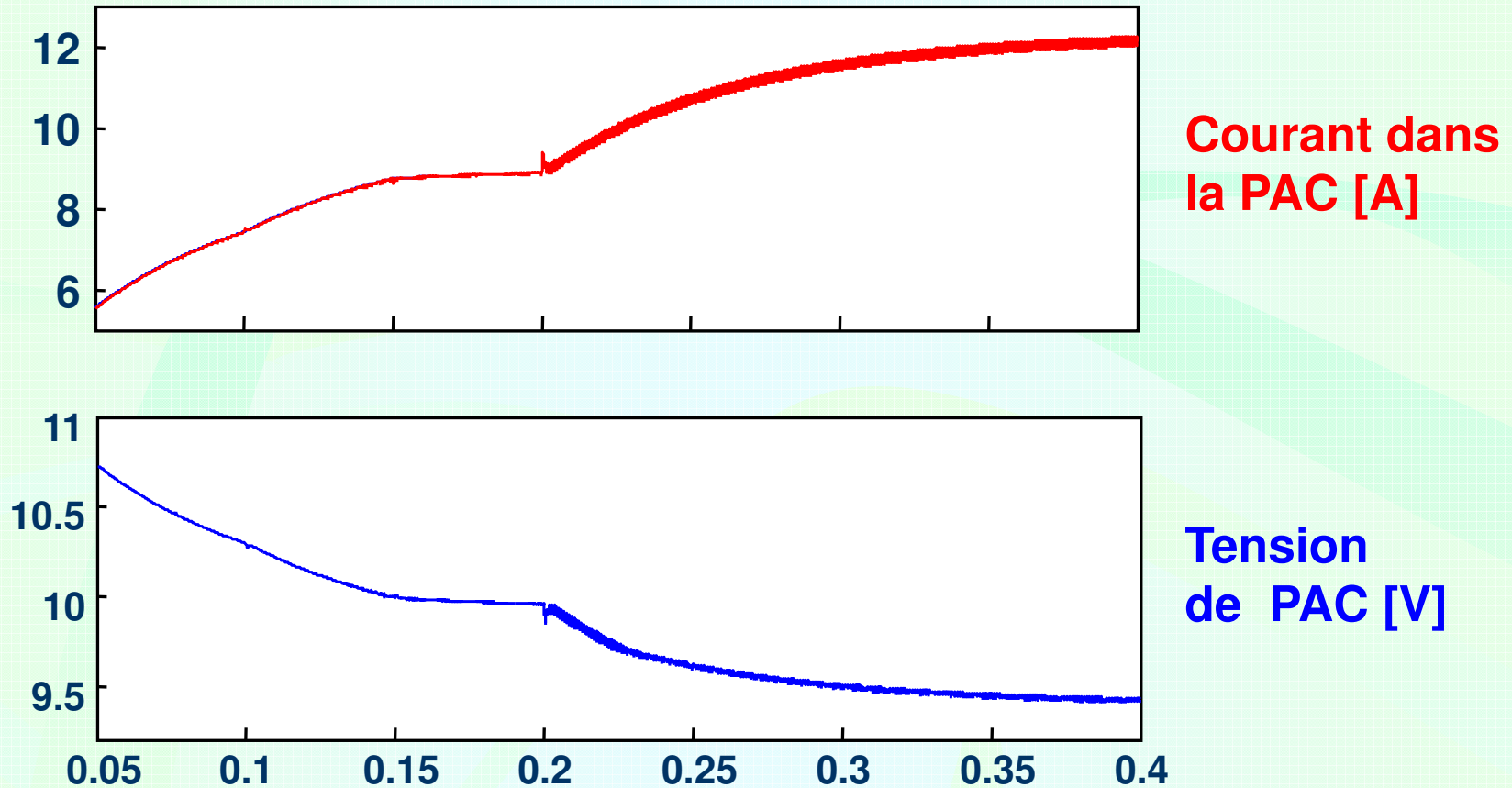
Courant [A]  
demandé à la  
source hybride

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**

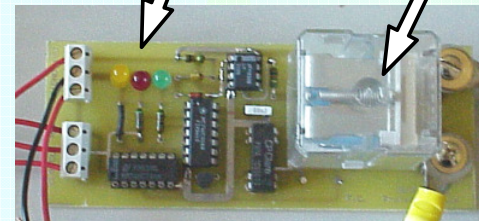
**LED**

**Relais de puissance**

6



**Convertisseurs DC/DC**

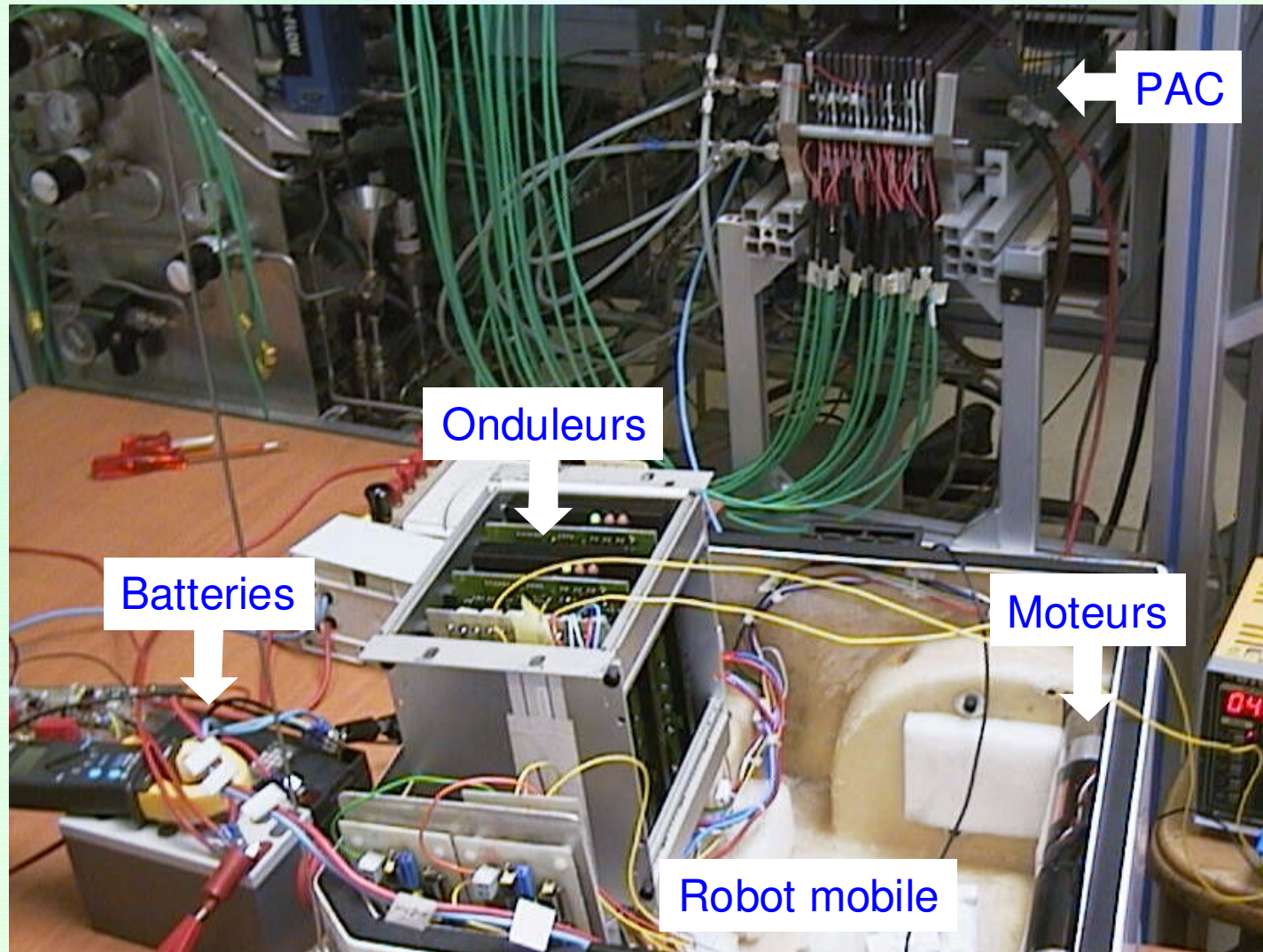


**Dispositif de sécurité**

# Le démonstrateur RobotPAC

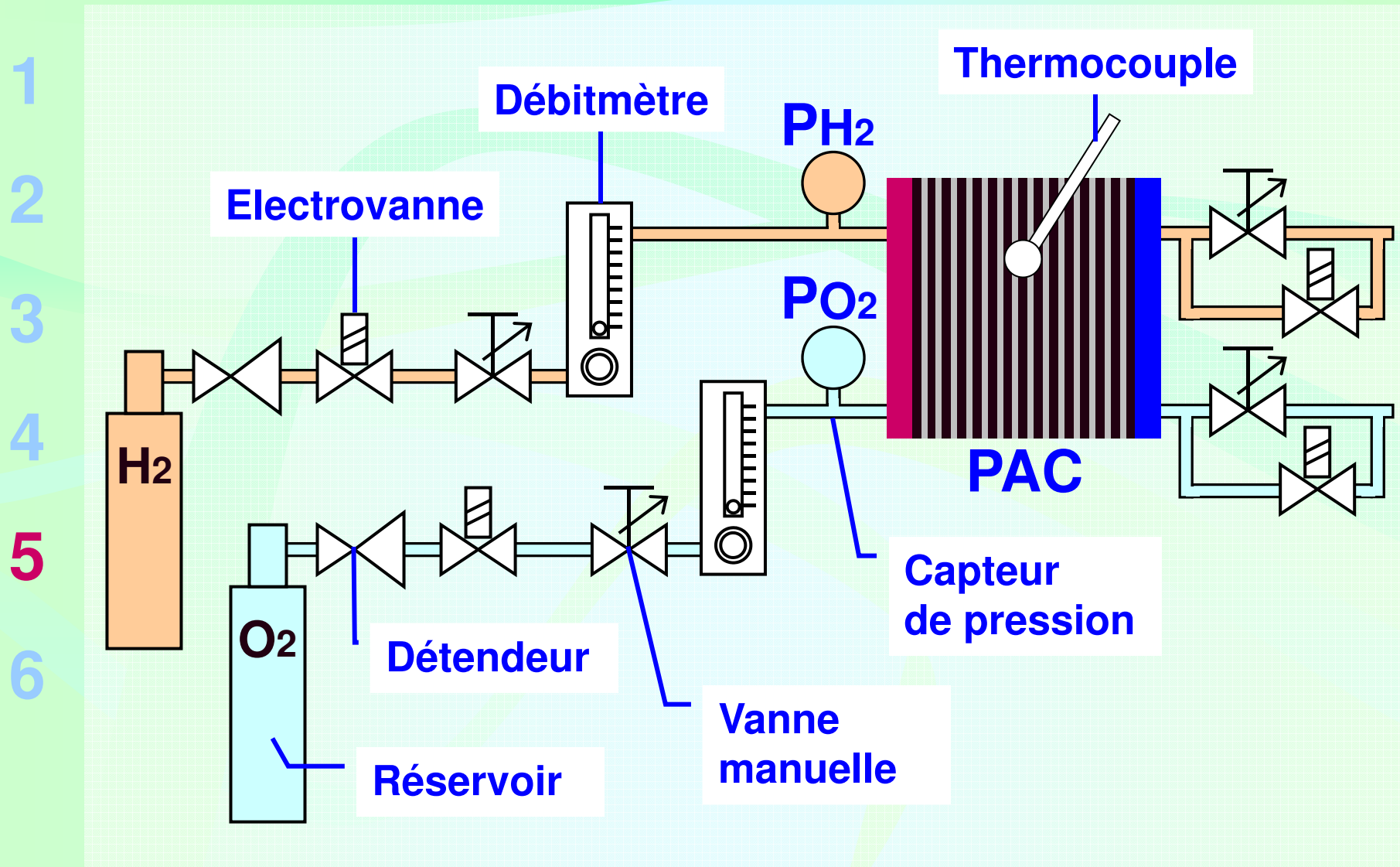
## Le banc d'essais au CEA

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 !

