



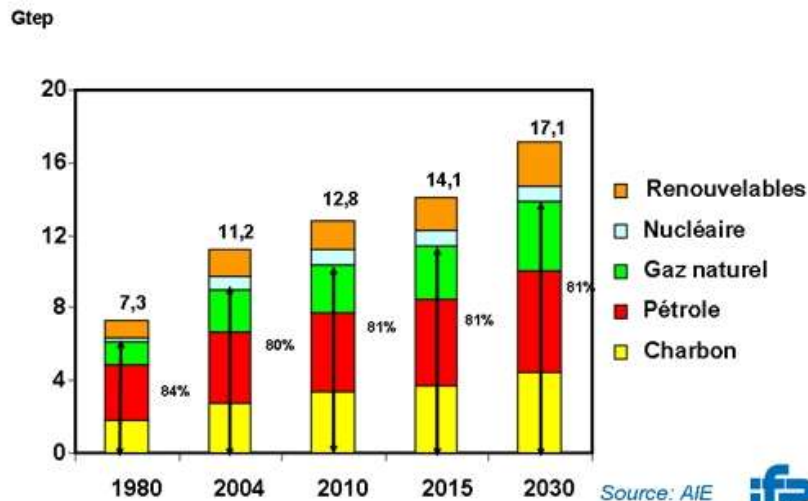
Gestion d'énergie d'un véhicule hybride
Une Application du contrôle optimal
Présentation Pôle 3 – 03/12/2009

- **Contexte**
- **Définition d'un véhicule hybride**
- **Problématique**
- **Contrôle optimal**
 - **Programmation Dynamique**
 - **ECMS**
- **PRISME**

● Pourquoi ?

– Demande énergétique croissante

- Développement économique et démographique
- Selon Agence Internationale de l'Énergie (AIE) : +1.6%/an, 17 Gtep (Gigatonnes équivalent pétrole) en 2030



3.7 milliards hab
5 milliards tep



1970

1.35 tep/hab

6 milliards hab
9.2 milliards tep



2000

1,5 tep/hab

8.2 milliards hab
17,1 milliards tep

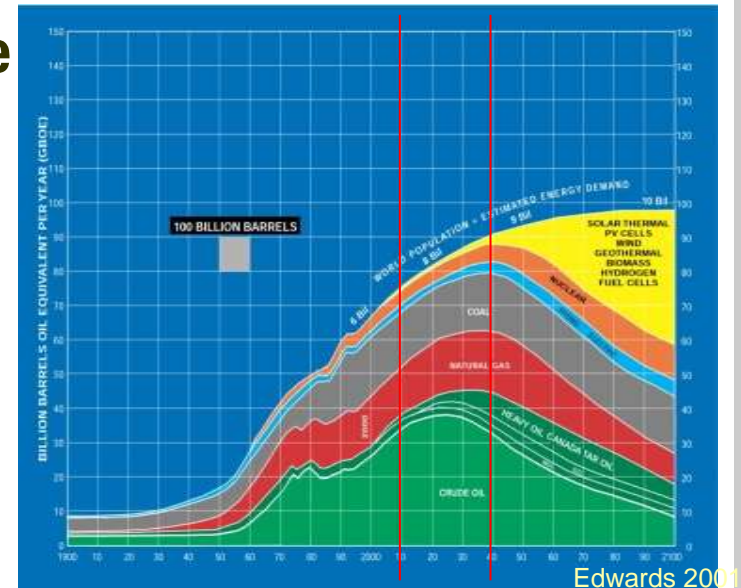
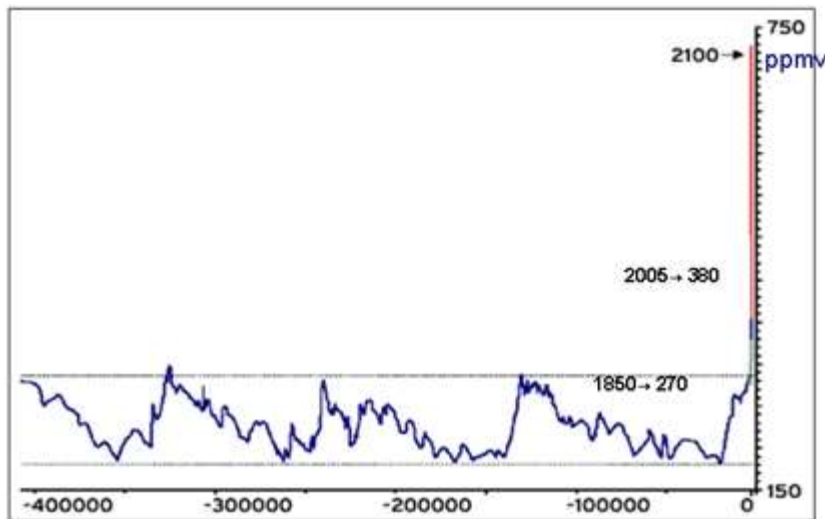


2030

2,1 tep/hab

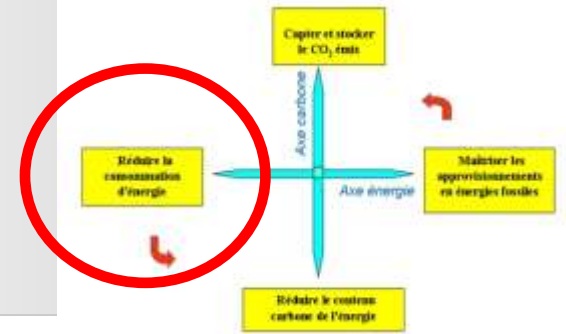
● Pourquoi ?

- Diminution des ressources fossiles
- Pollution – Gaz à effet de serre



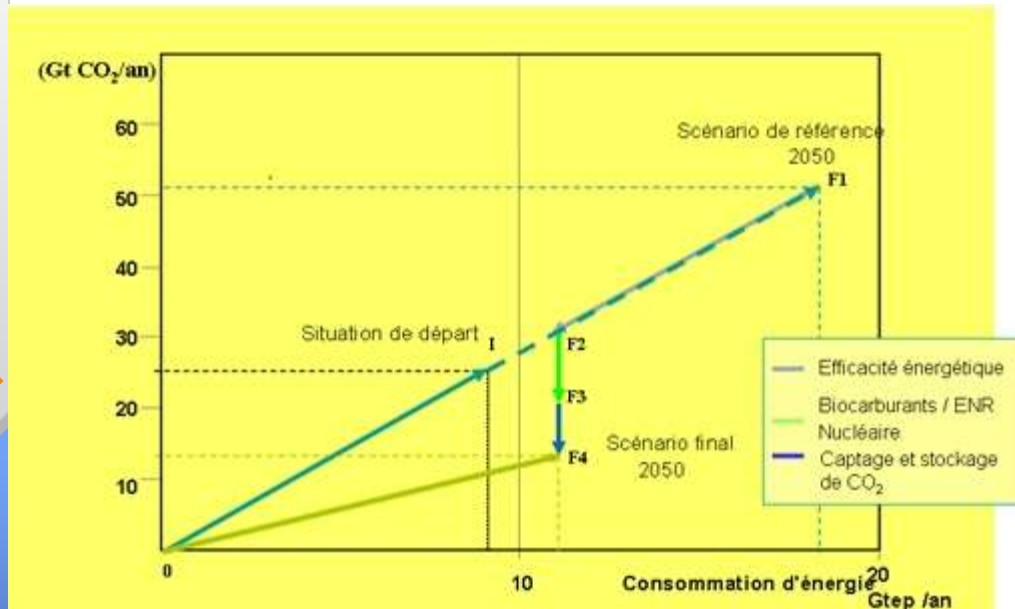
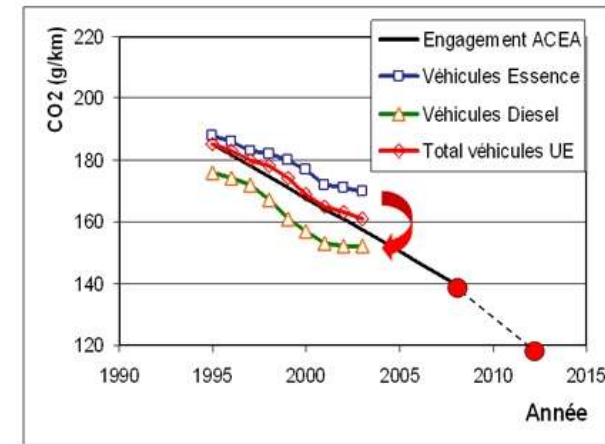
2010 - 2040

Contexte



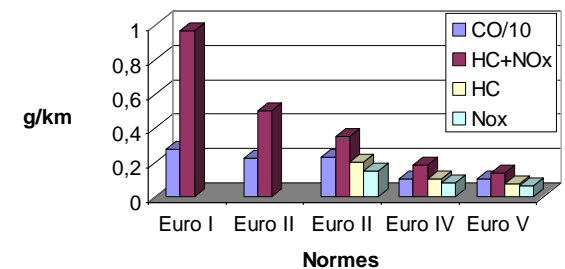
● Réduire les émissions, donc la consommation !

- Accords CO2 (France /4 → 2050)
- Règlements : émissions polluantes (NOX, CO, HC, PM)



Scénario avec +40% efficacité énergétique - IFP

Evolution des normes européennes de pollution



● Les moteurs à combustion

– 1^{er} défaut :

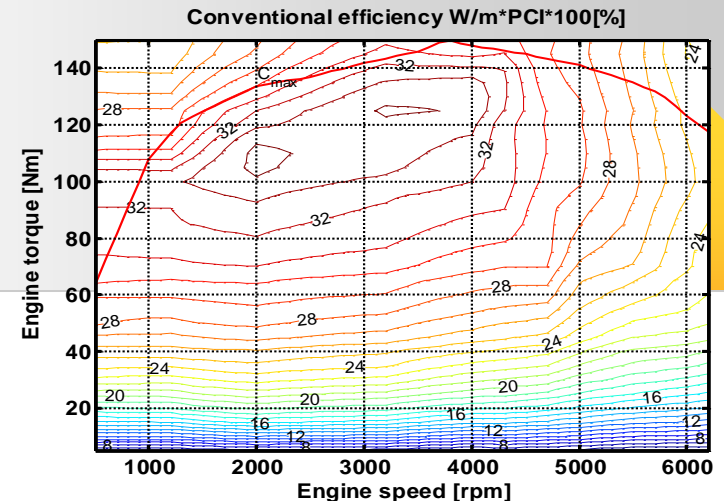
- Rendement maximum – uniquement à pleine charge
- $\frac{3}{4}$ de usage des voitures sont en faible charge

– 2nd défaut :

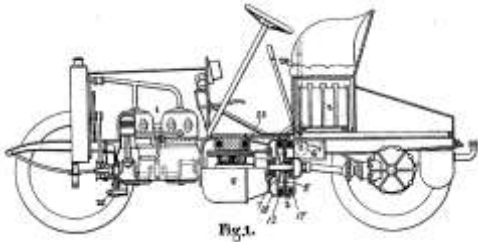
- Le cycle thermodynamique est irréversible
- Énergie cinétique du véhicule est perdu pendant le freinage

– Solution :

- Hybridation = stockage + récupération d'énergie
- Classiquement : Moteur thermique + moteur électrique + batterie



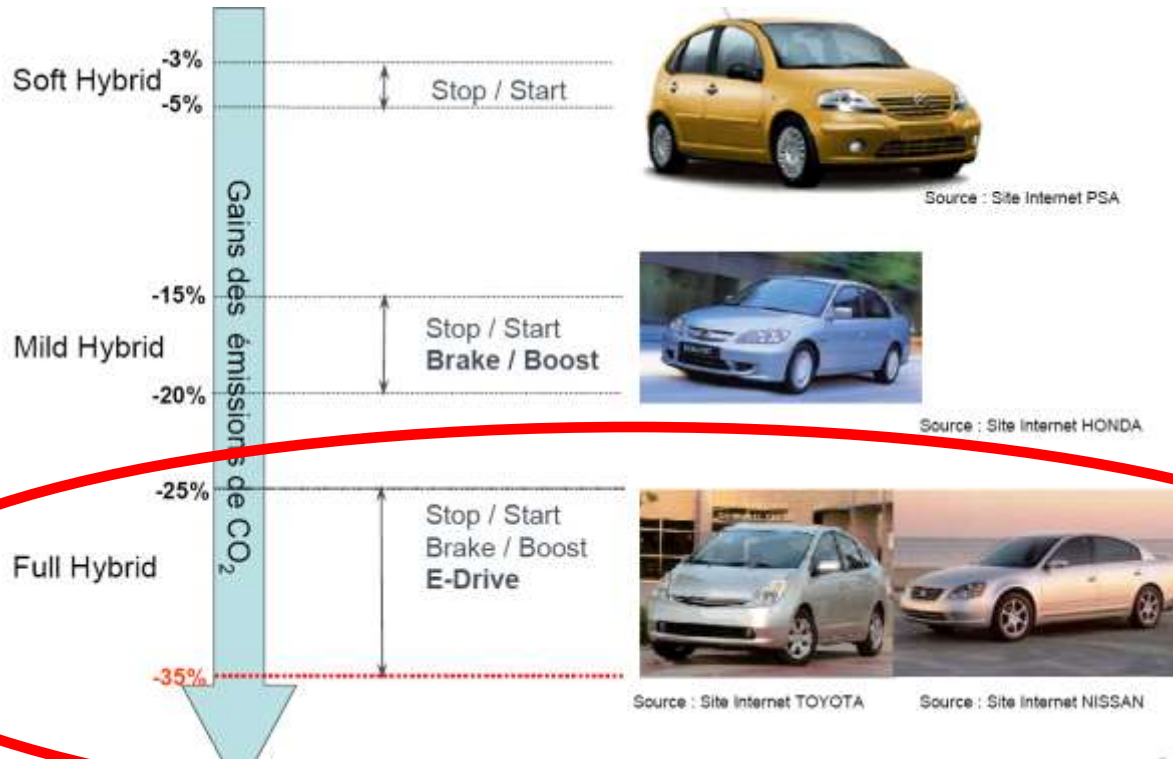
Véhicule hybride



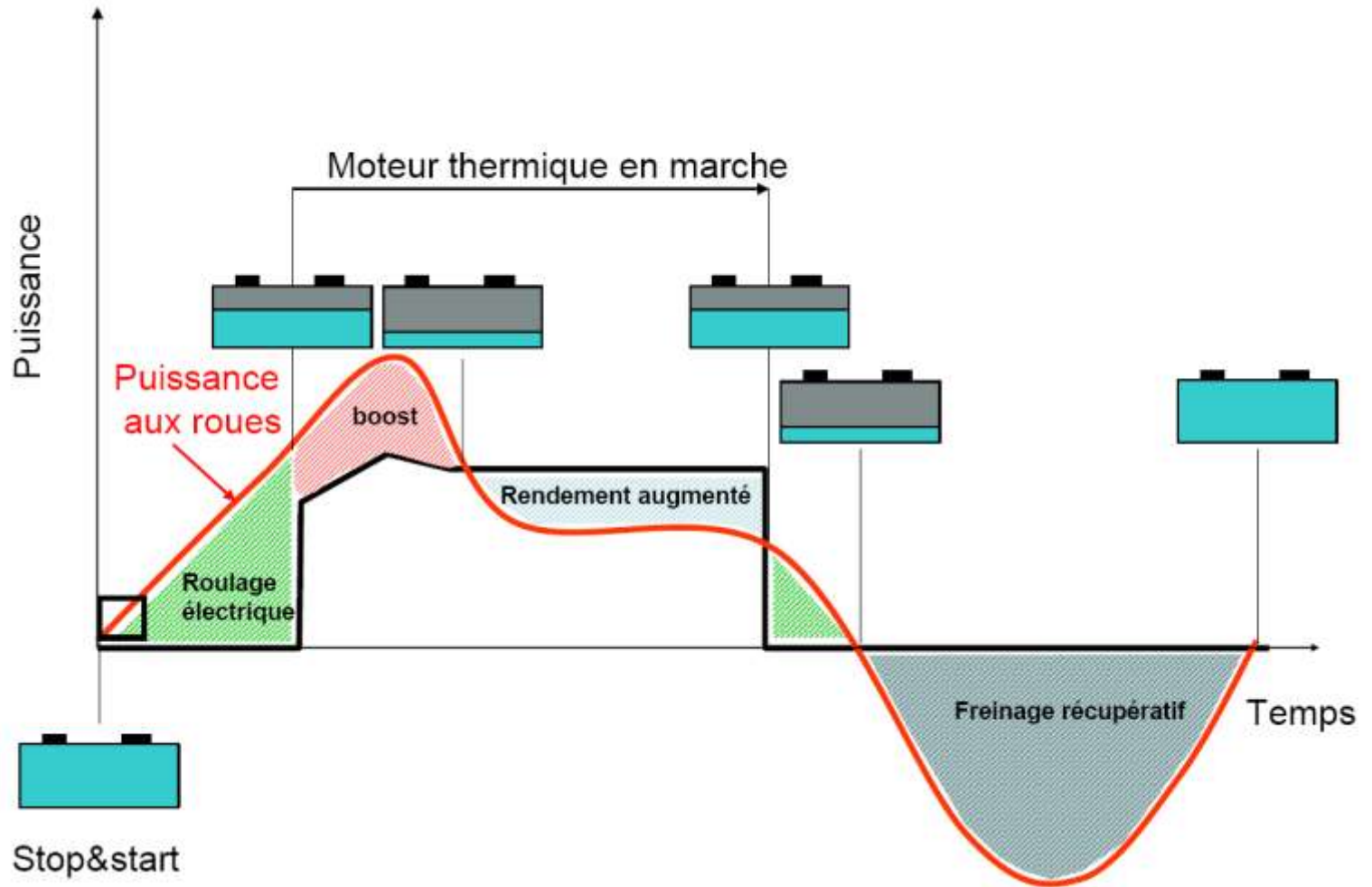
Henry Pieper's 1905 Hybrid Vehicle Patent



1899 by Porsche



Full Hybride exemple de roulage

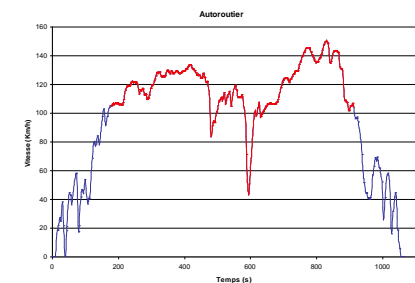
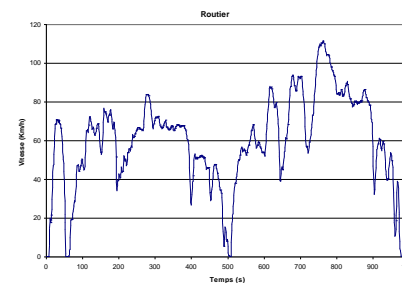
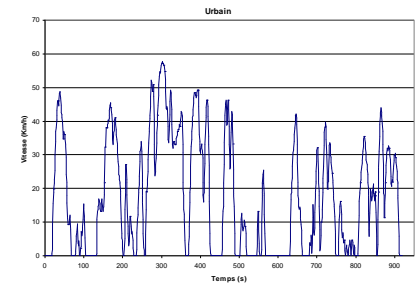
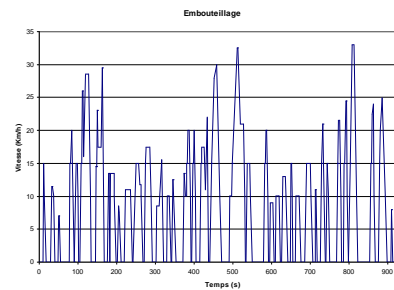
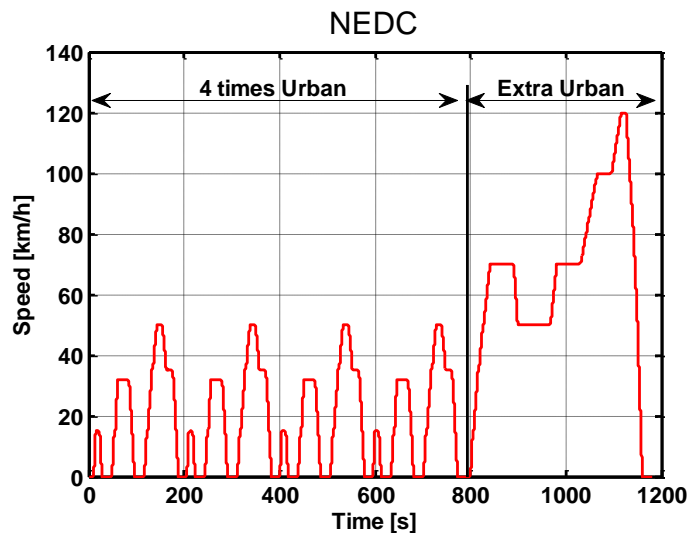


Contrôle Optimal - Problématique

- **Objectif : La meilleure loi de gestion d'énergie**
 - répondre à la demande du conducteur
 - utiliser de façon optimale les deux sources d'énergie (thermique et électrique)
 - gérer l'état de charge de la batterie (SOC)
 - pour minimiser la consommation de carburant (fossile).
 - Selon l'architecture il faut choisir de façon optimale :
 - Le mode de fonctionnement : électrique ou thermique (binaire)
 - La répartition électrique / thermique (ratio)
 - Le point de fonctionnement du moteur thermique
 - Le point de fonctionnement de la transmission

● Dans quelles conditions ?

- Cycle de roulage normalisé, Europe : NEDC
- Cycles de roulage + représentatifs, Europe : Artémis



Contrôle Optimal - Problématique

- **Minimiser la consommation sur un parcours donné**
 - **≠ Consommation instantanée minimale !**
- **2 cas d'étude :**
 - **Sur cycle connu parfaitement à l'avance du début à la fin**
 - Permet d'obtenir une référence
 - **Sur cycle inconnu à l'avance**
 - Cas réel de roulage dans un véhicule
- **Solutions exposées**
 - **Programmation dynamique sur cycle connu**
 - **Commande optimale ECMS sur cycle inconnu**

Contrôle optimal - formulation

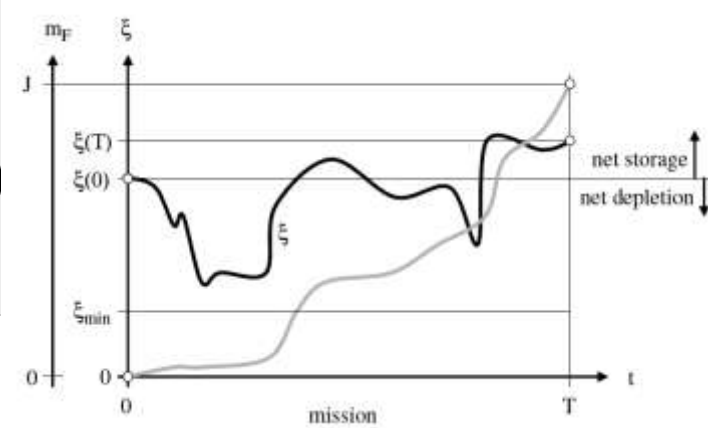
- **Soit $u(t)$: un vecteur de commande devant gérer les flux d'énergies des différentes sources.**
- **Dans le cas d'un hybride parallèle (composition des 2 sources thermique et électrique),**
 - **$u(t)$ est un scalaire**
 - **généralement défini comme le ratio de l'énergie électrique fournie sur l'énergie totale demandée, « power split ratio » :**

$$u(t) = \frac{P_E(t)}{P_T(t)}$$

Contrôle optimal - formulation

- **Soit $x(t)$: un vecteur d'état**
- **Pour un hybride électrique (batteries), il est réaliste de considérer une approche quasi-stationnaire**
 - **dynamiques moteur (thermique et électrique) et surtout batterie rapides à l'échelle du cycle de roulage**
 - **La dynamique véhicule est considérée pour générer la consigne de couple (vitesse véhicule \rightarrow couple)**
 - **Seule la dynamique de variation de l'état de charge de la batterie doit être considérée :**

$$\dot{x}(t) = f(t, u(t), x(t))$$



● Indice de performance

- **Consommation minimale sur l'ensemble du parcours, formulation générale :**
$$J = \int_0^T L(t, u(t), x(t)) dt$$

- **L(.) étant une fonction de coût, explicitement la consommation *ou une combinaison consommation émissions polluantes***

$$J = \int_0^T P_F(t, u(t), x(t)) dt$$

● Contraintes

- **« équilibrer » les phases de consommation et de récupération électrique, ne pas vider prématurément la batterie : « charge sustaining »**

$$J = \phi(x(T)) + \int_0^T L(t, u(t), x(t)) dt$$

● Contraintes

- La fonction $\phi(\cdot)$ peut prendre des forme très variables,
 - Par exemple si on souhaite retrouver le même état de charge final qu'initial on pénalise fortement un état final distant de l'état initial :

$$\phi(x(T)) = \begin{cases} w_{dis} (x(0) - x(T)), & x(T) > x(0), \\ w_{chg} (x(0) - x(T)), & x(T) < x(0), \end{cases}$$

ainsi à l'extrême si on souhaite retrouver exactement le même état de charge on choisira $\{w_{dis}, w_{chg}\} = \infty$

● Pour résumer

– **Une commande** $u(t) = \frac{P_E(t)}{P_T(t)}$

– **Une dynamique** $\dot{x}(t) = f(t, u(t), x(t))$

– **Un critère** $J = \phi(x(T)) + \int_0^T L(t, u(t), x(t)) dt$

– **Une contrainte** $\phi(x(T)) = \begin{cases} w_{dis}(x(0) - x(T)), & x(T) > x(0), \\ w_{chg}(x(0) - x(T)), & x(T) < x(0), \end{cases}$

Contrôle optimal – Programmation Dynamique

● Programmation Dynamique : principe de R. Bellman

« une suite de commandes optimales est telle que, quels que soient l'état et l'instant considérés sur une trajectoire optimale, les commandes ultérieures constituent pour le problème ayant cet état et cet instant comme éléments initiaux une suite de commande optimale »

- **Nécessite un maillage du temps et des états,**
 - le temps de calcul augmentant linéairement avec le temps
 - exponentiellement avec le nb de variables d'état.
- **Viable ici pour :**
 - des cycles de roulage à temps fini et « court » (1200s)
 - Une seule variable d'état ($x(t)$ – état de charge batterie)

Contrôle optimal – Programmation Dynamique

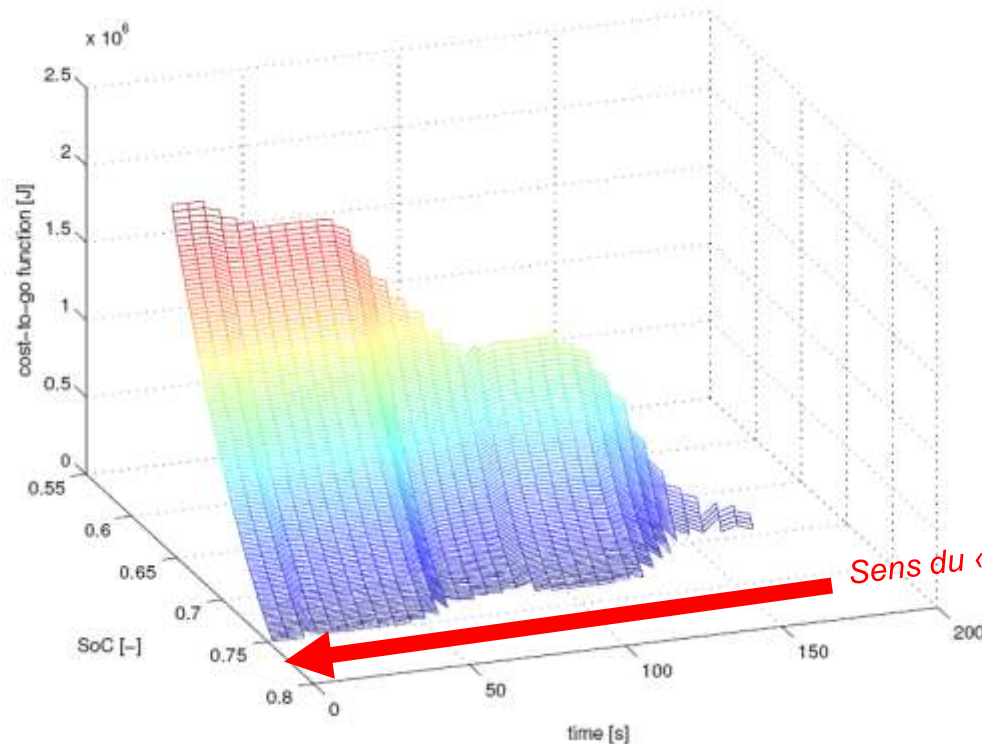
- **Fonction de « coût pour aller » (« cost to go ») : $\Gamma(\cdot)$**
 - **Sur une trajectoire optimale, avec un pas Δt :**
 - **coût pour passer d'un point $(t, x(t))$ à un point final à l'instant T .**

$$\Gamma(t, x(t)) = \min_u \{ \Gamma(t + \Delta t, x(t) + f(t, x(t), u(t)).\Delta t) + L(t, u(t)).\Delta t \}$$
 - **Condition « initiale » fixée par :** $\Gamma(T, x(T)) = \phi(x(T))$
 - **approche « backward » (de la fin au début), récursive, donne :**

$$u(t, x(t)) = \arg \min_u \{ \Gamma(t + \Delta t, x(t) + f(t, x(t), u(t)).\Delta t) + L(t, u(t)).\Delta t \}$$
 - **On obtient l'ensemble des chemins optimaux.**
 - **Gros avantage approche HJB : gain de temps de calcul par rapport à une approche naïve explorant tous les chemins possible du maillage.**

Contrôle optimal – Programmation Dynamique

Exemple de cost-to-go function $\Gamma(\cdot)$ pour un véhicule de type class A HEV sur le cycle ECE, soit $T=196$ s, $x(T)=0.7$, $\Delta T=1$ s, et un pas de discrétisation en x de 0.01% de la pleine charge. La contrainte finale (état de charge final) est de 0,7. On voit que cette contrainte est atteignable pour un état de charge initial compris entre 0,753 et 0,648.



Contrôle optimal – Programmation Dynamique

● **Limitations :**

- **Interpolation ou approximation du au maillage**
- **Nécessité de connaître le cycle dans son intégralité**
- **Solution optimale pour un cycle donné et une condition donnée**
- **Temps de calcul / T / nb d'états**
- **Des perspectives :**
 - **Reconnaissance de situations + prédiction (GPS, radar, ...)**
 - **Solutions « pré-programmées », Apprentissage (RN, ...)**
 - **Approche stochastique**

Contrôle optimal – Hamiltonien

- **Existe-t-il une solution équivalente applicable en temps réel ?**
- **Principe du type commande optimale (Pontryaguine) :**

– **Pb « primal » (DP) → Pb « dual » équivalent.**

$$\min_u \left\{ J(x, u(t)) = \phi(x(T)) + \int_0^T L(t, u(t), x(t)) dt \right\}$$



$$H(t, x, u, \lambda) = L(t, u(t), x(t)) + \lambda(t) \cdot f(t, x(t), u(t))$$

$$u(t) \text{ est solution de } \frac{\partial H}{\partial u} = 0$$

$$\dot{\lambda} = -\frac{\partial H}{\partial x}(x, u, \lambda, t)$$

*L(.) fonction de coût
indépendante de x état
de charge,*

– **hamiltonien à minimiser à chaque pas de temps**

- **L'évolution de $\lambda(t)$ est donnée par :**

$$\dot{\lambda}(t) = -\lambda(t) \frac{\partial}{\partial x} f(t, x(t), u(t))$$

- **Dans le cas des hybrides électriques (HEV) à batteries, l'approximation suivante est valide :**

$$\dot{x}(t) \approx f(t, u(t))$$

- **Influence négligeable de l'état de charge sur les paramètres internes de la batterie (tension et résistance interne en particulier)**

- Ainsi $\lambda(t)$ reste constant sur la trajectoire optimale :

$$\dot{\lambda}(t) \approx 0$$

- Le problème est alors réduit à trouver une valeur de λ_0 qui approxime $\lambda(t)$ pour un parcours donné.
- En particulier imposer par la contrainte finale à l'instant final T :
$$\lambda(T) = \frac{\partial \phi(x(T))}{\partial x(T)}$$

- Une expression plus « liée à l'application » mais

équivalente est alors : $H(t, s(t), u(t)) = P_F(t, u(t)) + s(t)P_Q(t, u(t))$

- Facteur d'équivalence énergie « fuel » P_F / énergie charge électrique batterie P_Q

Contrôle optimal – Hamiltonien

- **Le facteur $s(t)$ « converti » une puissance électrique en un équivalent « de carburant » supplémentaire nécessaire pour maintenir l'état de charge de la batterie (« charge sustaining »)**
- **Appelée ECMS**
 - « *Equivalent-consumption minimization strategies* »
- **Dans ce cas il advient qu'il faut simplement trouver $s(t)$ à chaque pas**
 - **Nombreuses solutions étudiées**

● ECMS

- $S(t) = \text{cste}$: sous optimale
- $S(t) = f(\text{soc})$: prise en compte de contrainte de charge
- **Maintien soc, feedback ECMS** : $S(t) = kp^*(\text{soc}(t) - \text{soc}(0)) + S(0)$
- $S(t)$ « adaptif » - pattern recognition
- $S(t)$ « prédictif » - Telemetry ECMS

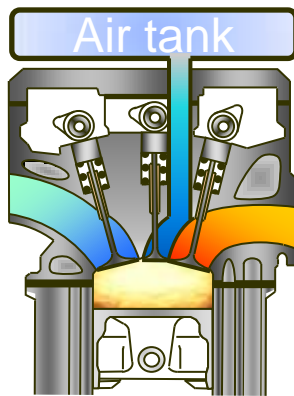
Activités du thème - PRISME

- **Thèse Andrej IVANCO : soutenance le 16/12/2009**
 - « Evaluation de stratégies de gestion d'énergie pour une motorisation Hybride pneumatique »
 - DP, ECMS, Pattern Recognition, RN
 - Algorithme de création de cycles artificiels mais représentatifs pour la validation de stratégies
- **Thèse Maxime DEBERT – CIFRE Renault 01/10/2008**
 - Conception de stratégies optimales en temps réel de répartition des flux d'énergies thermique et électrique dans un véhicule hybride

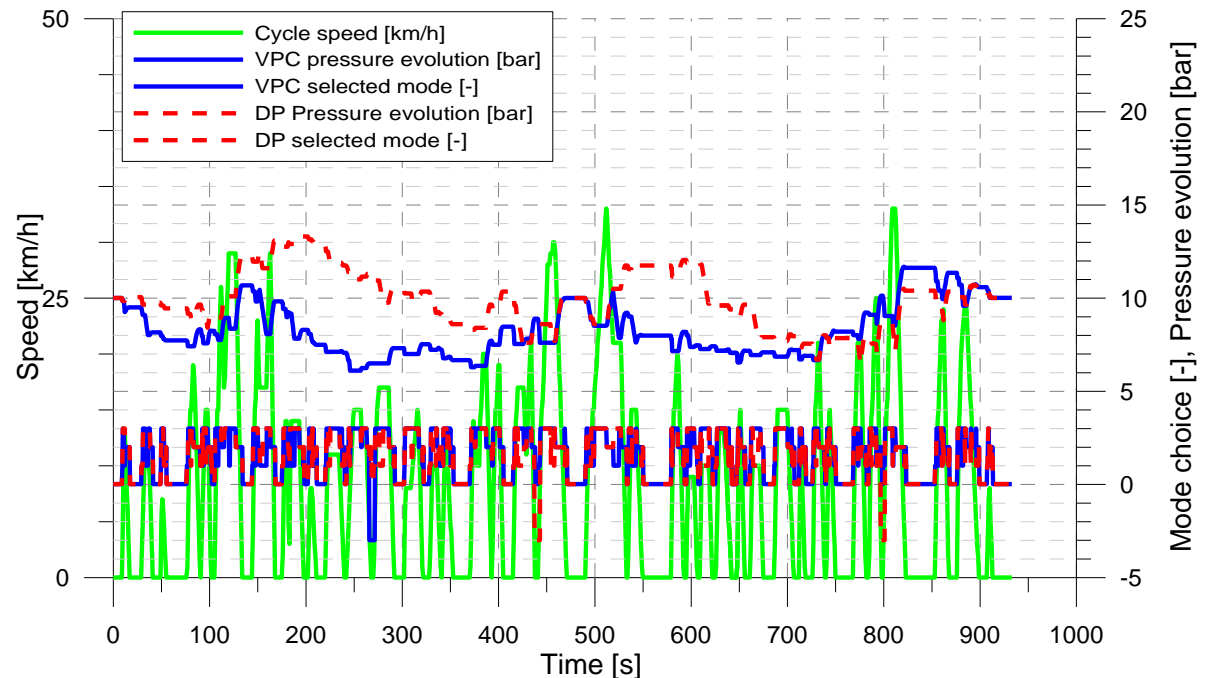
Activités du thème - PRISME

- **Thèse Julien LESCOT – Bourse IFP 01/10/2009**
 - « **Contrôle de supervision des systèmes de propulsion avec récupération d'énergie à bord – hybrid²** »
 - **Hybride 2D : Moteur thermique – moteur électrique – conversion pertes thermique en énergie électrique.**

● Hybride pneumatique



3 modes principaux
 Une commande « binaire »

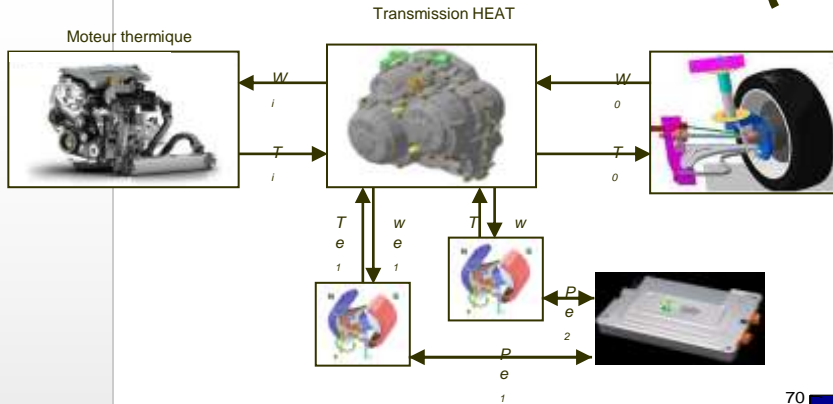


Jusqu'à 40% de gain de conso.

90% efficacité
 VPC+DPR / DP

Quelques résultats- PRISME

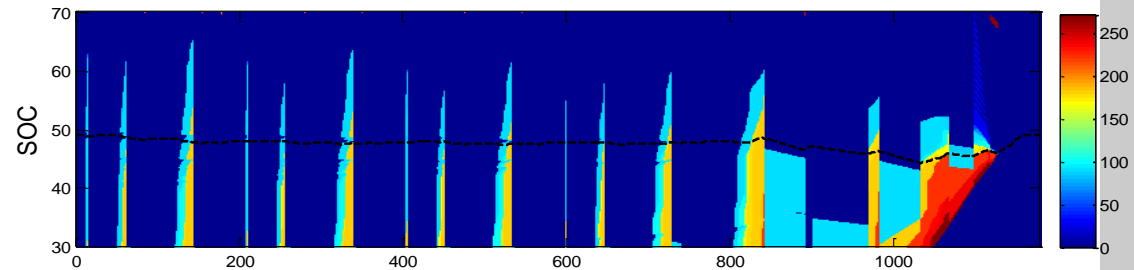
● Architecture HEAT (dérivation de puissance)



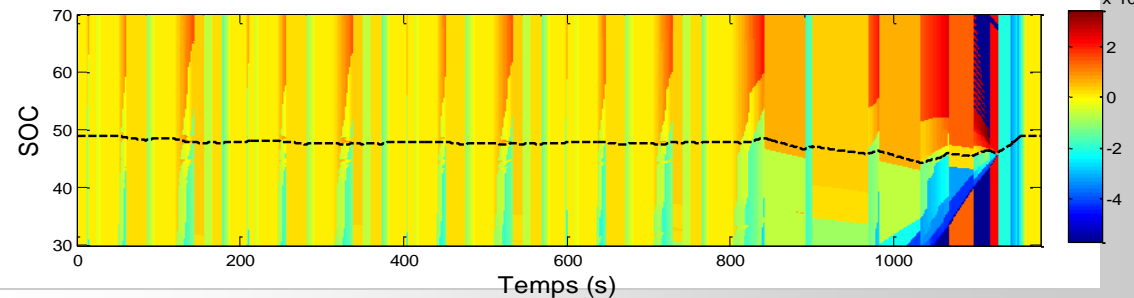
2 degrés de liberté
2 variables de commande
 $U=[T_i, P_e]$

Proposition d'une solution
Quasi-optimale à
Une variable de commande
(2nd liée !)

Optimal Control (u_i)



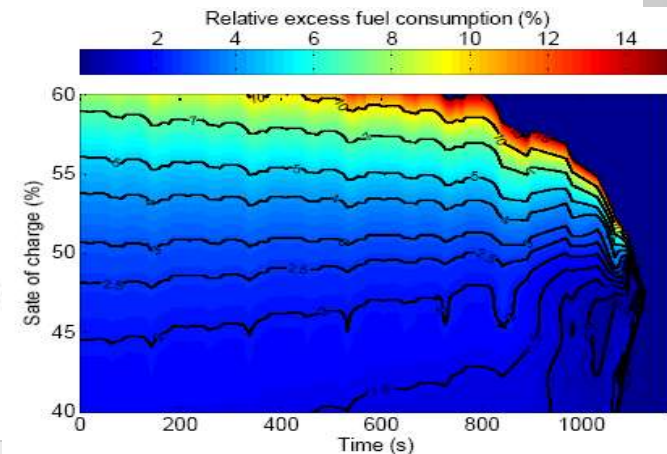
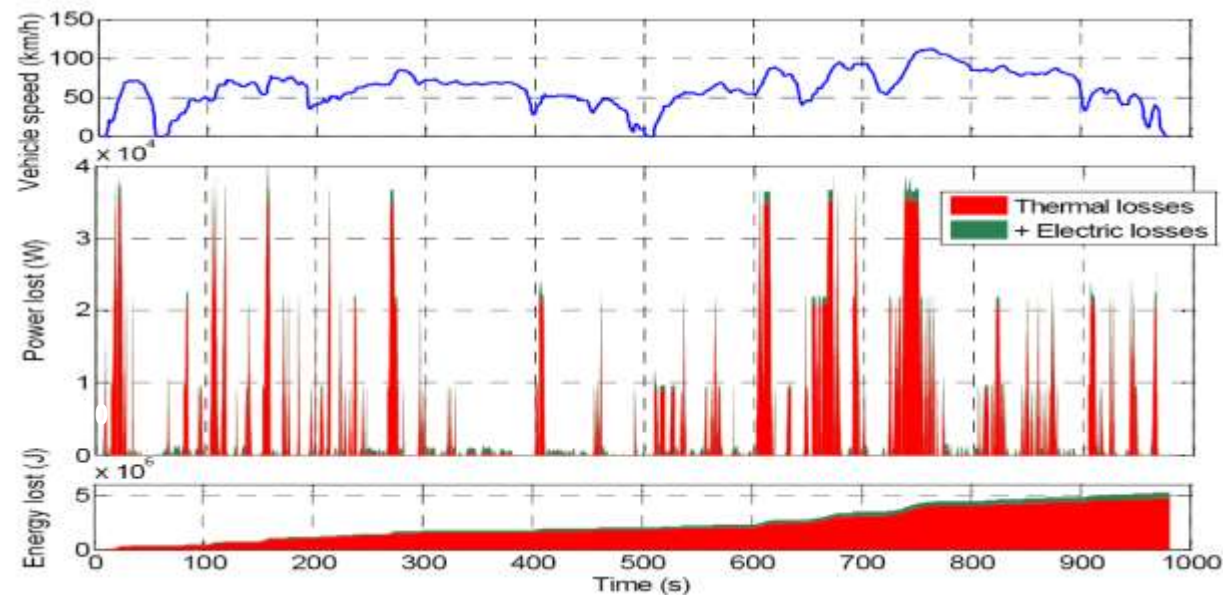
Optimal Control (u_{pe})



Quelques résultats- PRISME

- **Solution quasi-optimale**
 - **Une seule variable de commande (2nd liée)**

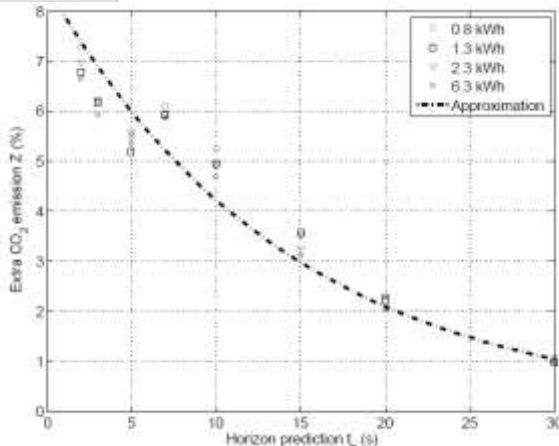
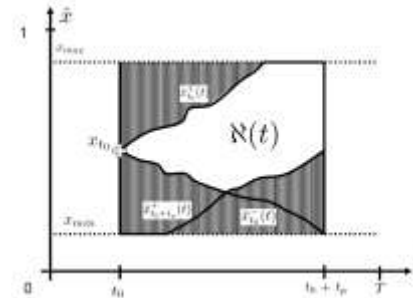
Cycle	optimal g	sub-optimal g	r_{EC} %
NEDC	271	278	+2.6
traffic jam	49	52	+6.1
Urban	93	97	+4.3
suburban	398	408	+2.5
highway	1188	1194	+0.5



Quelques résultats- PRISME

● Stratégie prédictive

- Comme en commande prédictive mais particularisme : la trajectoire est toujours atteinte.
- Minimisation par programmation dynamique
 - Astuce : restreindre espace
 - temps de calcul admissible



Cycle / Horizon (s)	2	5	10	20	30
Artemis Road	3.9%	2.8%	2.21%	1.83%	1%
Artemis Urban	7%	5.2%	5%	2.2%	1%
Artemis Traffic-Jam	8%	4.8%	3.8	2.3%	1.3%

● **Stratégie prédictive**

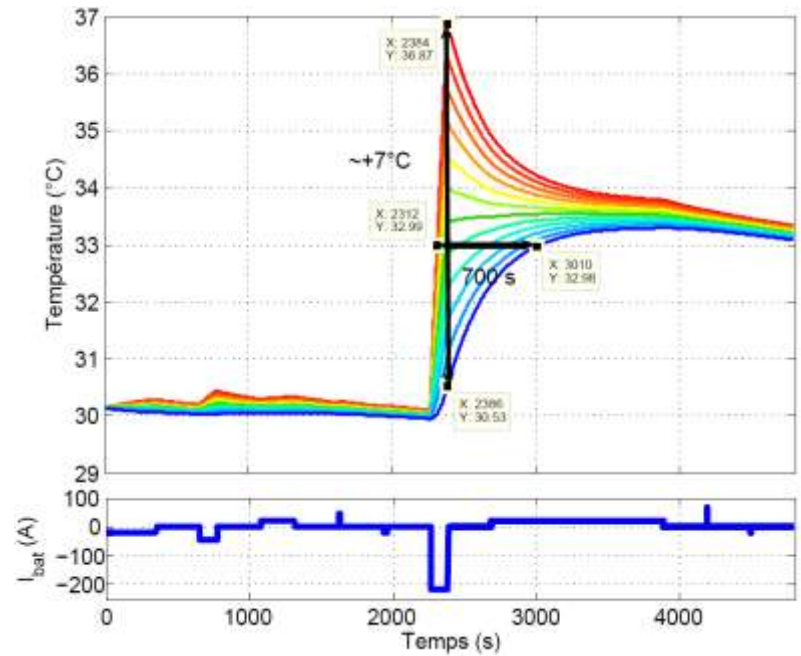
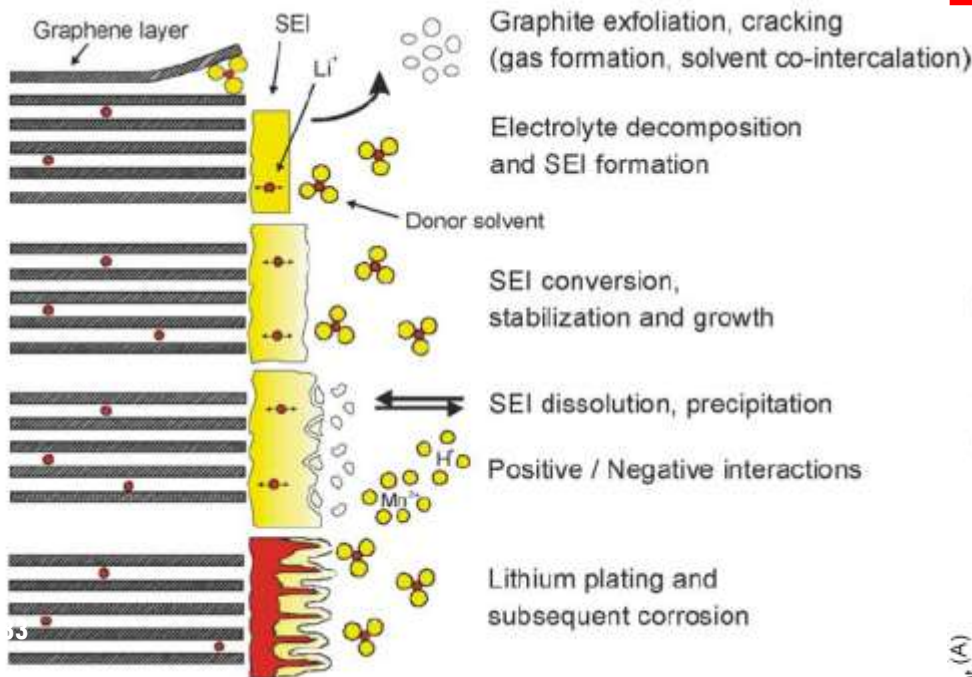
- **Fiabilité de la prédiction (LIDAR, GPS, ...)**
- **Sensibilité de la solution**

● **ECMS**

- **Gestion rapport de boîte : risque de commande erratique**
- **Gestion de la pente de la route : montagne**
- **Gestion des polluants : démarrage à froid**
- **Gestion de l'état de santé de la batterie : conso min sous contrainte de ne pas vieillir prématurément la batterie**
- **Stratégie(s) véhicule plug-in**

● Data « vieillissement batterie »

➔ SOC, Température



Ageing mechanisms in lithium-ion batteries

J. Vetter, P. Novak, M.R. Wagner, C. Veit, K.-C. Moller, J.O. Besenhard, M. Winter, M. Wohlfahrt-Mehrens, C. Vogler, A. Hammouch

Vous avez un pack Lithium-ion ?

La suite ??

- **Gestion couplée « voiture hybride plug-in » et « maison passive »**

Gestion de l'ensemble des sources et consommateurs d'énergies afin de minimiser au global (du puits à la roue !) les rejets de CO₂