

TP - VÉHICULES ÉLECTRIQUES HYBRIDES - IMA5

*Simulation et commande d'un véhicule hybride parallèle via la REM**

Pierre APPERCÉ

Valentin VERGEZ

Table des matières

1	Introduction	2
1.1	Les objectifs	2
1.2	Les hypothèses et simplifications	2
1.3	Les contraintes	2
1.4	La simulation	2
2	REM - Représentation Énergétique Macroscopique du véhicule électrique hybride	3
2.1	Équations et REM du système	3
2.2	Hacheur	3
2.3	Machine à courant continu	3
2.4	Boîte de vitesse	3
2.5	Poulie	4
2.6	Différentiel	4
2.7	Roues	4
2.8	Châssis	5
3	SMC - Structure maximale de commande	6
3.1	Chaîne de réglage	6
3.2	Inversion	6
3.3	Correction	7
4	Stratégie	8
4.1	Différents modes	8
4.2	Le mode boost	9
5	Conclusion	10
5.1	Le point sur la modélisation, la commande et la stratégie	10
5.2	Le cycle urbain européen	10
5.3	Les améliorations que l'on peut apporter	10
	Annexes	11
A	REM complète	11

*Représentation Énergétique Macroscopique

1 Introduction

1.1 Les objectifs

Ce TP consiste à modéliser et contrôler le couplage parallèle thermique-électrique d'un véhicule électrique hybride (VEH). Pour cela, nous allons utiliser la Représentation Énergétique Macroscopique (REM) pour modéliser le système. Puis nous mettrons en place une Structure Maximale de Commande (SMC) afin de contrôler sa vitesse. Nous réaliserons aussi une stratégie de commande. Celle-ci aura pour but d'optimiser le rendement énergétique du véhicule.

1.2 Les hypothèses et simplifications

Le système étant relativement complexe, nous avons formulé plusieurs hypothèses et simplifications. On obtient ainsi un système moins compliqué et suffisamment proche de la réalité pour notre étude.

1. Les interrupteurs sont considérés comme idéaux ;
2. La machine à aimants permanent ne sature pas ;
3. L'inertie des différents arbres sont négligés ;
4. L'inertie des roues est négligée ;
5. L'adhérence entre la roue et le sol est considéré parfaite ;
6. L'embrayage fonctionne en tout ou rien (sans glissement).

1.3 Les contraintes

Nous avons considéré l'embrayage comme un "interrupteur" qui transmet ou non le couple fourni par le moteur. Partant de cette simplification, la voiture ne peut donc pas démarrer à partir du moteur thermique. Par conséquent, il faudra démarrer sur le moteur électrique. Une fois que l'on aura atteint une vitesse suffisante (pour ne pas faire caler le moteur), nous pourrons enfin l'utiliser.

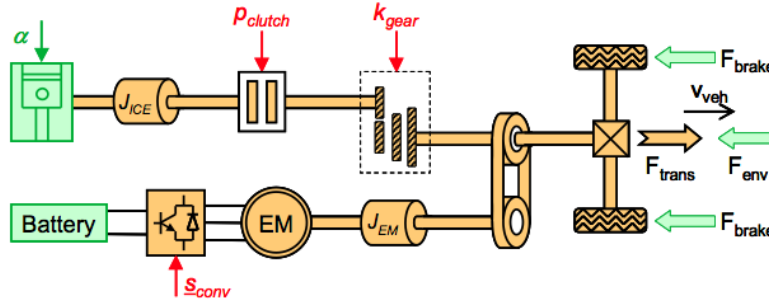


FIGURE 1 – Représentation schématique du système

1.4 La simulation

L'intérêt de la simulation ici est assez simple. On a un véhicule connu, facilement modélisable et le but est d'optimiser sa commande. Il est beaucoup moins coûteux de multiplier les tests en simulation que sur un modèle réel.

De plus la simulation nous permet d'observer certains phénomènes qui sont difficilement accessibles sur modèle réel. La simulation apporte donc un gain surtout de temps et d'argent mais facilite aussi certains tests.

2 REM - Représentation Énergétique Macroscopique du véhicule électrique hybride

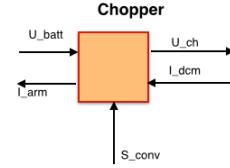
Si l'on veut construire la REM d'un système, il faut dans un premier temps écrire les équations qui régissent chaque élément du système. Une fois cette étape réalisée, on construit les éléments de base de la REM du système correspondants aux équations. Puis on les assemblent pour composer une représentation complète du système.

2.1 Équations et REM du système

2.2 Hacheur

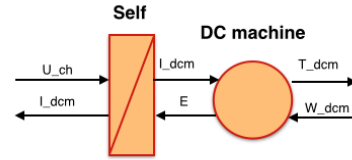
Le hacheur utilisé est un hacheur abaisseur. C'est un hacheur quatre quadrants, réversible en tension et en courant.

$$\begin{cases} U_{chop} &= S_{conv} \cdot U_{batt} \\ I_{arm} &= S_{conv} \cdot I_{dcm} \end{cases}$$



2.3 Machine à courant continu

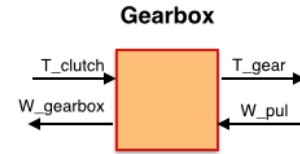
$$\begin{cases} T_{dcm} &= K_{cfiexc} \cdot I_{dcm} \\ E &= K_{cfiexc} \cdot W_{dcm} \\ I_{dcm} &= \frac{1}{L} \int U_{ch} - E - R \cdot I_{dcm} \end{cases}$$



2.4 Boîte de vitesse

Dans ce TP, nous ne gérons pas le rapport de la boîte de vitesse contrairement aux voitures hybrides réelles. Le rapport est donc une donnée d'entrée de notre point de vue. Nous n'aurons qu'à utiliser ce rapport pour déterminer le ratio et le rendement de la vitesse sélectionnée.

$$\begin{cases} T_{gear} &= T_{clutch} \cdot K_{gear_{ratio}} \cdot \mu_{gear}^p \\ W_{gearbox} &= W_{pul} \cdot K_{gear_{ratio}} \end{cases}$$

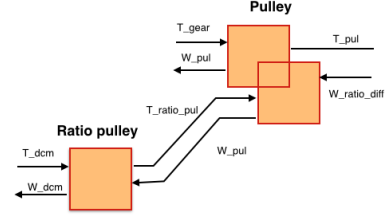


2.5 Poulie

La poulie est montée sur l'arbre du moteur thermique. Cela implique que la vitesse de rotation en sortie de la poulie est identique à la vitesse de rotation de l'arbre.

Afin de diminuer le volume du moteur électrique, on choisit un moteur moins coupleux mais tournant plus vite. Le ratio permet de ramener cette vitesse dans une gamme utilisable pour :

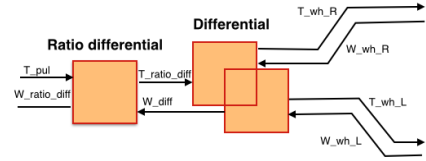
$$\begin{cases} W_{pul} &= W_{gearbox} = \frac{1}{K_p} \cdot W_{dcm} \\ T_{pul} &= (T_{gear} + K_p \cdot T_{dcm}) \cdot \mu_p^p \end{cases}$$



2.6 Différentiel

Le différentiel est l'organe qui distribue le couple aux deux éléments de propulsion.

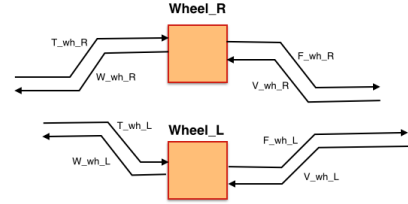
$$\begin{cases} T_{Wh_R} &= T_{Wh_L} = \frac{T_{diff}}{2} \\ W_{Wh_R} &= W_{Wh_L} = 2 \cdot W_{diff} \\ \begin{cases} T_{diff} &= K_{diff} \cdot T_{pul} \cdot \mu_{diff}^p \\ W_{pul} &= K_{diff} \cdot W_{diff} \end{cases} \end{cases}$$



2.7 Roues

La roue permet de transformer le mouvement de rotation en mouvement de translation.

$$\begin{cases} F_{Wh_n} &= \frac{T_{Wh_n}}{R_{Wh_n}} \\ W_{Wh_n} &= \frac{V_{Wh_n}}{R_{Wh_n}} \end{cases}$$



2.8 Châssis

R_t : Rayon de braquage

l_{ev} : Largeur véhicule électrique

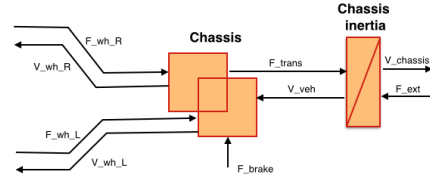
$$\begin{cases} V_{L_{Wh}} = \frac{R_t + \frac{l_{ev}}{2}}{R_t} \cdot V_{ev} \\ V_{R_{Wh}} = \frac{R_t - \frac{l_{ev}}{2}}{R_t} \cdot V_{ev} \\ F_{ev} = F_{R_{Wh}} + F_{L_{Wh}} \end{cases}$$

Nous supposons que nous allons toujours tout droit,

$R_t = 0$.

$$\begin{cases} V_{L_{Wh}} = V_{ev} \\ V_{R_{Wh}} = V_{ev} \\ F_{ev} = F_{R_{Wh}} + F_{L_{Wh}} \end{cases}$$

$$\begin{cases} M_{hev} \frac{dV_{hev}}{dt} = F_{hev} - F_{hevt} \\ V_{hev} = \frac{1}{M_{hev}} \int (F_{hev} - F_{hevt}) dt \end{cases}$$



3 SMC - Structure maximale de commande

Après avoir modélisé le véhicule via sa REM, on peut s'intéresser au contrôle. Une méthode efficace est d'utiliser le contrôle par inversion du modèle.

La Structure Maximale de Commande est une représentation unique de la chaîne de commande. Elle est optimale mais est aussi parfois difficile à réaliser en pratique.

3.1 Chaîne de réglage

La première chose à faire est d'identifier les variables à régler, appelées variables objectifs.

Dans notre cas, nous nous intéressons uniquement au contrôle de la vitesse du véhicule. La variable objectif est alors V_{hev} .

Nos variables de réglages sont :

- S_{conv} (Entrée de réglage du hacheur)
- T_{ice} (Couple du moteur thermique)
- F_{brake} (Force de freinage mécanique)

Les autres paramètres sont soit fixes soit contrôlés par l'utilisateur directement (exemple de K_{gear} , le rapport de la boîte de vitesse, contrôlé par l'utilisateur).

Nous n'avons pas de variable de contrainte, le moteur électrique étant à aimant permanent. Cette information sera utile pour la partie suivante, la stratégie.

La chaîne de réglage est mise en évidence (en jaune) en Figure 4 page 11 (Annexe A).

3.2 Inversion

A partir des équations utilisées précédemment, nous pouvons aisément inverser les blocs de la REM.

Toutefois, deux blocs posent problèmes. La partie accumulation du châssis ainsi que la partie accumulation du moteur à courant continu. En effet, une fois inversés ils présentent des dérivées, ce qui en pratique nous obligerait à connaître l'état futur du système. Cela étant impossible, on remplace ces éléments dérivatifs par des correcteurs (PI ou IP).

3.3 Correction

Pour déterminer exactement les paramètres de ces correcteurs, on va développer la fonction de transfert en boucle fermée du système avec correcteur, choisir le comportement du système corrigé puis identifier les paramètres de notre correcteur.

Le raisonnement complet était donné dans le sujet pour le correcteur IP du bloc "chassis".

Nous avons appliqué la même méthode pour identifier les paramètres des correcteur IP et PI du bloc accumulation de la mcc. Il faut faire attention à la nature du système inversé. Le chassis était un simple intégrateur la ou on retrouve un premier ordre à la mcc.

Pour l'identification, nous avons défini le comportement du système une fois bouclé de telle sortes à ce qu'il n'y ait aucun dépassement en réponse à une sollicitation.

C'est d'ailleurs exactement le comportement obtenu après simulation. Comme on peut le voir en figure 2 où la vitesse ne dépasse pas la consigne après les accélérations.



FIGURE 2 – Vitesse réelle et référence (sans dépassement)

4 Stratégie

4.1 Différents modes

Précédemment on a pu voir que nos variables de réglages étaient au nombre de trois pour seulement une variable objectif et zéro variable de contrainte.

$$V_r - (V_o + V_c) = 2$$

Cela signifie que l'on a de la liberté dans notre commande. On va pouvoir agir sur deux nouveaux paramètres.

La stratégie consiste à répartir les flux d'énergie dans le système, dans un but donné. Ici notre stratégie aura pour but d'économiser l'énergie en jouant sur deux paramètres : la répartition de couple entre le moteur thermique et le moteur électrique (afin d'optimiser le rendement du moteur thermique) ainsi que la répartition entre freinage électrique et freinage mécanique (afin de maximiser la récupération d'énergie sans dépasser les valeurs limites des composants de la partie électrique).

Pour résumer, nous avons identifié plusieurs mode de fonctionnement du système.

- Accélération toute électrique
- Accélération toute thermique
- Mode boost - Accélération avec apport électrique et thermique
- Freinage purement mécanique
- Freinage purement électrique (récupération d'énergie)
- Freinage combiné mécanique / électrique

Le choix des différents modes est représenté par l'algorithme suivant :

Data:

$N_{gearbox}$: Vitesse de rotation du moteur (tr/min)

F_{trans} : Force appliquée à la transmission du véhicule

SOC : Pourcentage de charge de la batterie

S_{conv} : Gain du hacheur

K_{gear} : Rapport de la boîte de vitesse

Result: Mode de fonctionnement

```
if  $F_{trans} < 0$  then
  Freinage
  if  $SOC \geq SOC_{max}$  (Batterie pleinement chargée) then
    • Freinage mécanique
  else if  $abs(S_{conv}) > 1$  then
    • Freinage combiné
  else
    • Freinage électrique
  end
else
  Accélération
  if  $N_{gearbox} < 1000$  OU  $K_{gear} = 0$  (Vitesse trop faible pour le moteur thermique) then
    • Mode électrique
  else if  $SOC \leq SOC_{min}$  then
    • Mode thermique
  else
    • Mode BOOST
  end
end
```

Algorithm 1: Détermination du mode de fonctionnement

4.2 Le mode boost

Parmi ces six modes, quatre consistent à envoyer une consigne binaire. On ne s'attardera pas dessus. Le mode freinage combiné consiste simplement à utiliser la partie électrique jusqu'à sa limite et de compléter avec le freinage mécanique, on ne détaillera pas non plus ce mode.

En revanche le mode boost est lui beaucoup plus intéressant, puisqu'il consiste à optimiser le rendement du moteur thermique, ce qui n'est pas chose évidente.

Notre idée a été de nous baser sur les caractéristiques de consommation de carburant par kWh en fonction du couple et de la vitesse.

Notre SMC impose la vitesse au moteur thermique. On possède une caractéristique de la consommation fonction de la vitesse et du couple. Connaissant la vitesse du moteur thermique, on peut extraire les consommations correspondantes à cette vitesse. Ces consommations sont encore fonction du couple.

On choisit la consommation la plus faible et on en déduit le couple correspondant.

Ce couple n'est autre que notre couple de référence pour le moteur thermique. Le moteur électrique nous sert alors à compléter l'apport en puissance nécessaire.

On observe l'effet de la stratégie sur la consommation de carburant et sur l'utilisation de la batterie (Figure 3). On remarque que la batterie est beaucoup sollicitée lorsque cela est possible.

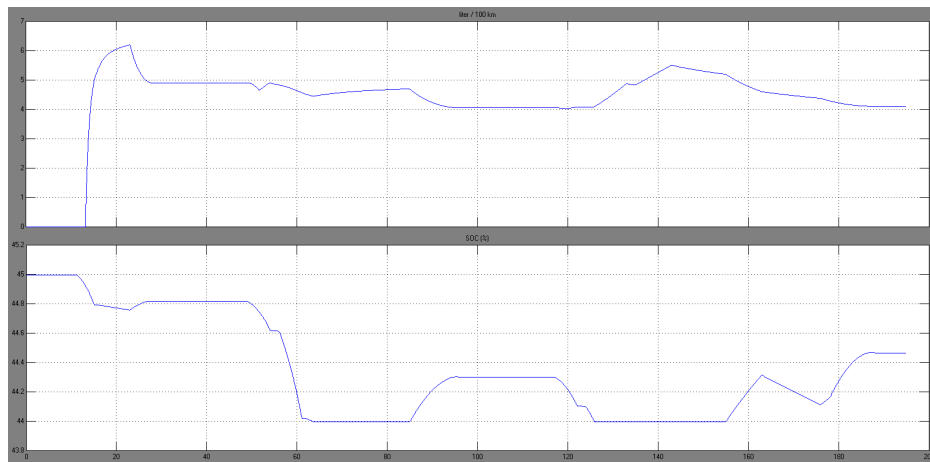


FIGURE 3 – Consommation de carburant et utilisation de la batterie (avec stratégie)

5 Conclusion

5.1 Le point sur la modélisation, la commande et la stratégie

Dans l'ensemble, la conception de la REM et de la SMC se sont déroulées sans problèmes, ce processus étant relativement bien métré à ce jour. En revanche, la partie concernant la stratégie, nous a demandé plus de réflexion. La stratégie étant un aspect de la commande encore nouveau et le cahier des charges nous laissant une totale liberté vis-à-vis de cette partie. Toutefois, nous sommes satisfait du résultat.

5.2 Le cycle urbain européen

Lors du test de notre véhicule électrique hybride, nous avons utilisé les conditions qui sont actuellement en vigueur pour tester la consommation des voitures. Ces conditions décrite par une directive européenne définissent un cycle de conduite automobile. Et bien que les constructeurs soient dans leur droit, les tests de consommation ne représentent pas la réalité. En effet ce cycle de conduite a été créé en juillet 1973 et est donc conçu pour des voitures de cette époque. Par exemple, les accélérations demandées aux véhicules actuels sont totalement dépassées. Et l'on se retrouve souvent avec une consommation de l'ordre de 20% supplémentaire en conditions réelles que ce qui est annoncé par le constructeur. Cependant un nouveau cycle de conduite devrait être mis en place courant l'année prochaine (2015).

5.3 Les améliorations que l'on peut apporter

Comme son nom l'indique, la SMC est la structure maximale de commande, or cette structure comporte deux inconvénient lorsque l'on veut concevoir réellement le système. Tout d'abord le nombre de capteurs utilisés est important . Ce qui entraîne un coût non négligeable. De plus on utilise dans la SMC des variables auxquelles nous n'avons pas toujours accès sur un modèle physique. Par exemple les forces extérieures que l'on mesure dans la simulation ne sont pas mesurable en réalité, ou très difficilement.

Pour pallier ces deux problèmes, on doit donc dans un premier temps, trouver un moyen de contourner les variables inaccessibles. On cherche donc à les estimer à l'aide d'autres données du systèmes. Puis dans un second temps, on va essayer de condenser au maximum la SMC afin d'utiliser le moins de capteurs possible (observateurs...). Cette opération complexifie grandement le travail sur la structure de commande.

A REM complète

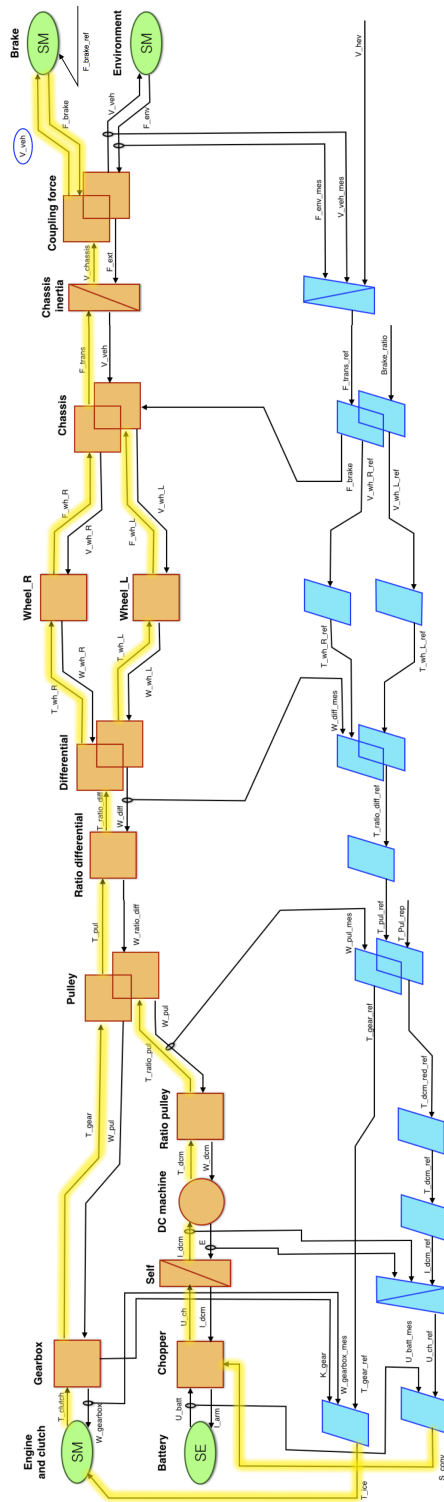


FIGURE 4 – Représentation énergétique macroscopique du véhicule électrique hybride avec SMC