

# Travaux Pratiques

## Gestion Énergétique des Véhicules Hybrides

### *Phase 1 : Modélisation d'un véhicule hybride*

<b>1</b>	<b>Présentation du véhicule</b>	<b>1</b>
1.1	Modélisation de la batterie	3
1.2	Modélisation de la machine électrique et de son convertisseur	3
1.3	Modélisation du moteur thermique et de « l'embrayage »	4
1.4	Boîte de vitesse	5
1.5	Véhicule	6
<b>2</b>	<b>Travail à réaliser</b>	<b>7</b>
2.1	Modélisation de la batterie	7
2.2	Modélisation de la machine électrique et de son convertisseur	8
2.3	Modélisation de la boîte de vitesse	8
2.4	Modélisation du véhicule	9
2.5	Modélisation du moteur thermique	10

## 1 Présentation du véhicule

On considère un véhicule hybride parallèle simple arbre avec l'architecture suivante :

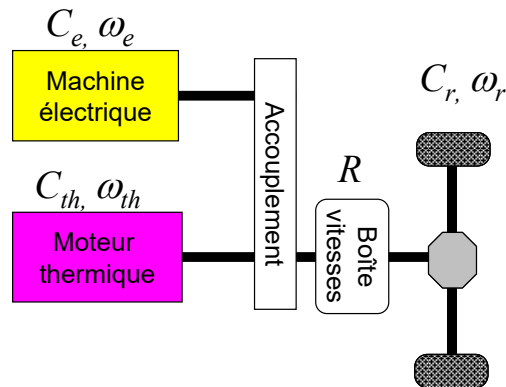


Figure 1 : Architecture du véhicule considéré

Les équations qui caractérisent cette architecture sont :

$$C_r = R \cdot \mu_{bv}(\cdot) \cdot (C_{th} + C_e) \quad (1)$$

$$\omega_r = \frac{\omega_{th}}{R} = \frac{\omega_e}{R} \quad (2)$$

La boîte de vitesse dispose de 5 rapports.

Principales hypothèses de modélisation :

- Le moteur thermique est accouplé à un « embrayage automatique ». Dès que le régime du moteur thermique devient inférieur à une valeur seuil, l'embrayage s'ouvre instantanément et aucun couple n'est transmis. Lorsque le régime devient supérieur à ce seuil, l'embrayage se referme instantanément et l'intégralité du couple du moteur thermique est transmis sur l'arbre de sortie.
- Le moteur thermique démarre instantanément.
- La température n'influe pas sur la consommation de carburant ou le moteur thermique est géré de manière à ce que sa température reste sensiblement constante.
- La machine électrique est accouplée à un convertisseur permettant le pilotage en couple de la machine électrique. Son comportement énergétique est intégré à la cartographie de la machine électrique. La régulation de couple de la machine électrique est suffisamment rapide pour pouvoir être négligée.
- La boîte de vitesse a un rendement qui dépend du rapport engagé.
- Les rapports de boîtes de vitesse peuvent être changés instantanément.

### 1.1 Modélisation de la batterie

Le pack de batteries est composé de `ess_module_number` batteries montée en série.

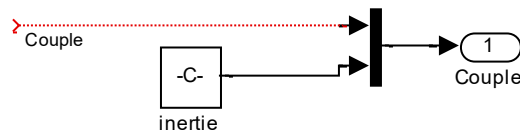
Convention  $I_{batt}(t) > 0$  décharge la batterie.

<u>Entrées :</u>	$I_{batt}(t)$ Courant (A) prélevé sur les batteries
<u>Sortie :</u>	$U_{batt}(t)$ Tension (V) aux bornes de la batterie
<u>Données internes :</u>	$Soc(t)$ Etat de charge
<u>Paramètres :</u>	
$n$	<div><div>ess_module_number</div><div>Nombre d'éléments en série</div></div> <div><div>ess_module_mass</div><div>Masse d'un element (kg)</div></div> <div><div>SocInit</div><div>Etat de charge du pack de batteries</div></div>
$C_{batt}$	<div><div>ess_max_ah_cap</div><div>Capacité du pack de batterie (Ah)</div></div> <div><div>ess_soc</div><div>Tableau d'état de charge</div></div>
$R(Soc(t))$	<div><div>ess_r</div><div>Tableau de résistance interne = f(ess_soc)</div></div>
$E(Soc(t))$	<div><div>ess_voc</div><div>Tableau de tension à vide = f(ess_soc)</div></div>
$\eta_{batt}$	<div><div>ess_coulombic_eff</div><div>Rendement coulombique en charge</div></div>
$\tau_{batt}$	<div><div>ess_tau</div><div>Constante de temps du transfert courant-&gt;tension</div></div>
<u>Equations :</u>	
$U_{batt}(t) = n \cdot E(Soc(t)) - n \cdot R(Soc(t)) \cdot Ibatt_{apparent}(t)$	
$\frac{dIbatt_{apparent}(t)}{dt} = \frac{1}{\tau_{batt}} \cdot (Ibatt(t) - Ibatt_{apparent}(t))$	
$\frac{dSoc(t)}{dt} = -\frac{\eta_{batt}'(I_{batt}(t))}{3600 \cdot C_{batt}} \cdot I_{batt}(t) \text{ avec } \eta_{batt}'(I_{batt}(t)) = \begin{cases} 1 & I_{batt}(t) > 0 \text{ (décharge)} \\ \eta_{batt} & I_{batt}(t) < 0 \text{ (charge)} \end{cases}$	

### 1.2 Modélisation de la machine électrique et de son convertisseur

Le modèle de la machine électrique intègre le modèle du convertisseur ainsi que la régulation de couple. La dynamique de la régulation en couple est suffisamment rapide pour être négligée.

La sortie n°2 (couple) contient non seulement le couple disponible sur l'arbre mais également l'inertie de la machine électrique. La mise en œuvre se fera à l'aide d'un block « mux ».



<u>Entrées :</u>	$U_{batt}(t)$ Tension (V) aux bornes de la batterie $\omega_e(t)$ Régime de la machine électrique (rd/s)
<u>Sortie :</u>	$I_{batt}(t)$ Courant (A) prélevé sur les batteries $C_e(t)$ Couple réalisé par la machine électrique et $J_e$ l'inertie de la machine électrique
<u>Données internes :</u>	
<u>Paramètres :</u>	
mc_inertia	Inertie de la machine électrique (kg.m <sup>2</sup> )
mc_mass	Masse de la machine électrique (kg)
mc_map_trq	Tableau de couple (Nm)
mc_map_spd	Tableau de régime (rd/s)
mc_eff_map	Tableau de rendement = $f(mc\_map\_spd, mc\_map\_trq)$
mc_max_spd	Régime maximal supporté (rd/s)
mc_max_trq	Couple max = $f(mc\_map\_spd)$
mc_min_trq	Couple min = $f(mc\_map\_spd)$

Comme la dynamique sur le couple de la machine électrique est négligée, le couple réalisé par la machine électrique se déduit simplement en saturant la consigne de couple. En fonction de la puissance mécanique réalisée, du signe du couple réalisé et de la cartographie de rendement, on calcule facilement la puissance électrique. Connaissant alors la tension d'alimentation, on en déduit facilement le courant prélevé sur les batteries.

Nb : la cartographie contient des valeurs de rendement comprises entre 0 et 1, cela veut dire qu'il faut faire attention au sens des échanges énergétiques lors du calcul de la puissance électrique.

### 1.3 Modélisation du moteur thermique et de « l'embrayage »

Le modèle d'embrayage est intégré à celui du moteur thermique. L'embrayage s'ouvre dès que le régime du moteur thermique devient inférieur à `fc_min_speed` et il se referme automatiquement dès que le régime devient supérieur à `fc_min_speed`.

<u>Entrées :</u>	$\omega_{th}(t)$	Régime du moteur thermique (rd/s)
<u>Sortie :</u>	$C_{th}(t)$	Couple réalisé et $J_{th}$ l'inertie de la machine électrique
<u>Données internes :</u>	$C(t)$	Consommation totale de carburant (g)
<u>Paramètres :</u>		
fc_inertia	Inertie du moteur thermique (kg.m <sup>2</sup> )	
fc_mass	Masse de la machine électrique (kg)	
fc_time_ct	Constante de temps sur le couple	
mc_map_trq	Tableau de couple (Nm)	
mc_map_spd	Tableau de régime (rd/s)	
fc_min_speed	Régime d'embrayage du moteur thermique (rd/s)	
fc_max_speed	Régime maximal du moteur thermique (rd/s)	
fc_cspe_min	Consommation spécifique minimale (g/kWh)	
fc_map_spd	Tableau de régime (rd/s)	
fc_map_trq	Tableau de couple (Nm)	
fc_fuel_map_gpkWh	Tableau de conso spécifique = f(mc_map_spd, mc_map_trq)	
fc_fuel_lhv	Pouvoir calorifique inférieur de l'essence (J/g)	
fc_max_spd	Régime maximal supporté (rd/s)	
fc_max_trq	Couple max = f(fc_map_spd)	
fc_ralenti_spq	Régime de ralenti (rd/s)	

En fonction du régime, on calcule l'état de l'embrayage. Si l'embrayage est ouvert, le régime du moteur thermique est son régime de ralenti. La consigne de couple est alors nulle.

Dans le cas où l'embrayage est fermée, la consigne de couple est tout d'abord saturée en fonction du régime. Le couple réellement réalisé est déduit à partir de la consigne de couple et d'une dynamique du premier ordre. La consommation de carburant est calculée à partir d'une cartographie de consommation spécifique, du régime moteur et couple réalisé.

#### 1.4 Boite de vitesse

Le rendement de la boîte de vitesse est dépendant du rapport engagé.

<u>Entrées :</u>		
	$C_{ap}(t)$ ; $J_{ap}$	Couple et inertie sur l'arbre primaire (Nm, kg.m <sup>2</sup> )
	$\omega_{as}(t)$	Régime de l'arbre secondaire (rd/s)
<u>Sortie :</u>		
	$C_{as}(t)$ ; $J_{as}$	Couple et inertie sur l'arbre secondaire (Nm, kg.m <sup>2</sup> )
	$\omega_{as}(t)$	Régime de l'arbre primaire (rd/s)
<u>Données internes :</u>		
<u>Paramètres :</u>		
	gb_no	Tableau des n° des rapports de boîte (1,2,3,4,5) par exemple
$R(k)$	gb_ratio	Tableau des rapports de réduction
	gb_eff	Tableau des rendements pour chacun des rapports
<u>Equations :</u>		
	En plus des équations classiques sur le couple et le régime, on programmera l'équation des inerties qui permet de calculer l'inertie des éléments en rotation sur l'arbre primaire « vues » depuis l'arbre secondaire :	
	$J_{as} = J_{ap} \cdot R(k)^2$	

Attention pour le rendement, il faut tenir compte du sens des échanges énergétiques, et donc du couple...

### 1.5 Véhicule

Le véhicule est supposé rouler sur une surface plane. Le contact pneu/route est supposé parfait (pas de glissement) mais génère un frottement. Le véhicule subit un effort aérodynamique résistant ainsi qu'un effort moteur de la part du GMP. D'autre part, pour calculer l'accélération réelle du véhicule, il faut tenir compte également de la mise en rotation des éléments tournant du GMP et des roues, donc la masse considérée n'est pas simplement la masse de la caisse mais la masse de la caisse plus la masse équivalente des éléments tournants (inerties).

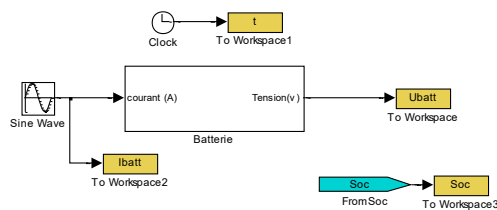
<u>Entrées :</u>	$C_r(t)$	Couple sur l'arbre des roues(Nm) et $J_{gmp}(t)$ Inertie du gmp ramenée sur l'arbre de la roue.
<u>Sortie :</u>	$\omega_r(t)$	Régime des roues (rd/s)
<u>Données internes :</u>	$v(t)$	Vitesse linéaire d'avancement de la caisse
<u>Paramètres :</u>		
$M$	veh_mass	Masse de la caisse (kg)
$r$	veh_r	Rayon des roues (m)
$J_r$	veh_Jw	Inertie des roues (kg.m <sup>2</sup> )
$S$	veh_S	Surface frontale du véhicule (m <sup>2</sup> )
$cx$	veh_cx	Coefficient de pénétration dans l'air
$\rho$	veh_rho	Densité de l'air (kg/m <sup>3</sup> )
$\alpha$	veh_rr_alpha	Paramètre des pneumatiques
$\beta$	veh_rr_beta	Paramètre des pneumatiques
$a$	veh_A	Paramètre des pneumatiques
$b$	veh_B	Paramètre des pneumatiques
$c$	veh_C	Paramètre des pneumatiques
$P$	veh_wpressure	Pression de gonflage des pneumatiques (kPa)
<u>Equations :</u>	$\frac{dv(t)}{dt} = \frac{1}{M_{equi}} \cdot \left( \frac{C_r(t)}{r} - F_a(t) - F_r(t) \right)$ $M_{equi} = M + 4 \cdot \frac{J_r + J_{gmp}}{r^2}$ $F_a(t) = \rho \cdot S \cdot cx \cdot v(t)^2$ $F_r(t) = P^\alpha \cdot Z^\beta \cdot (a + b \cdot v + c \cdot v^2)$ <p>Avec <math>Z = M \cdot g</math> la charge verticale du pneumatique</p>	

## 2 Travail à réaliser

L'enseignant vous donnera les fichiers de paramètres en début de séance.

### 2.1 Modélisation de la batterie

- Programmer sous Simulink le modèle de batterie et enregistrez le sous « TestModeleBatterie.mdl ». Appliquez un courant sinusoïdal d'amplitude 100A et de fréquence 0,5 Hz.



- Exécutez le programme exe21.m pour valider le bon fonctionnement de votre modèle (vérifier la cohérence des données affichées, est-ce des courbes réalistes, etc.)

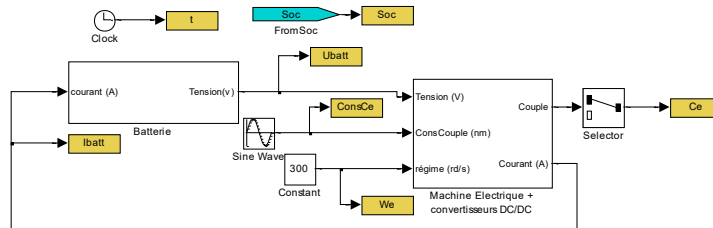
- On admet que les pertes dans les batteries sont uniquement des pertes joules :

$$Pertes_{batt} = n \cdot R_{batt}(Soc(t)) \cdot I_{batt_{apparent}}^2$$

Complétez le modèle Simulink et le programme pour calculer les pertes dans la batterie.

## 2.2 Modélisation de la machine électrique et de son convertisseur

- Enregistrez le modèle précédent sous « TestModeleMachineElectrique.mdl »
- Programmez le bloc « Machine Electrique + convertisseurs DC/DC » puis reliez-le au modèle de la batterie. Appliquez une consigne de couple sinusoïdale d'amplitude 50 Nm et un régime de 300 rd/s.



- Exécutez le programme `exe22.m` pour valider le bon fonctionnement de votre modèle (vérifier la cohérence des données affichées, est-ce des courbes réalistes, etc.)
- Passez l'amplitude de la consigne de couple à 100 Nm. Relancez la simulation. Que se passe-t-il, est-ce normal ?
- En remarquant que les pertes dans la machine électrique s'expriment de la manière suivante, complétez le modèle de la machine électrique de manière à calculer les pertes engendrées par le moteur électrique.

$$Pertes_{me} = P_{elec}(t) - P_{meca}(t)$$

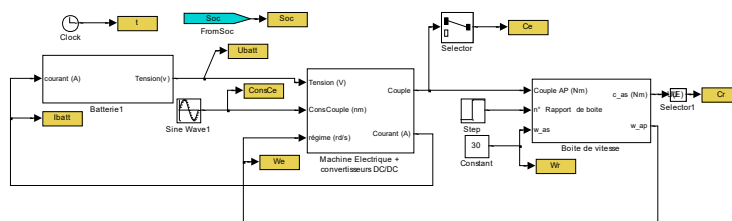
Nb : la formule ne dépend pas du sens des échanges énergétique

- Complétez le programme `exe22.m` avec le code ci-dessous puis exécutez le.

```
figure;
Pertes=[PertesBatt PertesMe];
area(t,Pertes);
legend('PertesBatt','PertesMe');
```

## 2.3 Modélisation de la boîte de vitesse

- Enregistrez le modèle précédent sous « TestModeleBoiteVitesse.mdl »
- Programmez le bloc « Boîte de vitesses » puis reliez-le au modèle de la machine électrique. En utilisant le block « Sources/Step » appliquez un rapport de boîte  $k(t) = \begin{cases} 2 & \forall t < 5 \\ 3 & \forall t \geq 5 \end{cases}$  et un régime de roues de 30 rd/s. Laissez la consigne de couple inchangée (amplitude 100 Nm).





- Exécutez le programme `exe23.m` pour valider le bon fonctionnement de votre modèle (vérifier la cohérence des données affichées, est-ce des courbes réalistes, etc.)
- En remarquant que les pertes dans la boîte de vitesses s'expriment de la manière suivante, complétez le modèle de la boîte de vitesses de manière à calculer les pertes engendrées.

$$Pertes_{bv} = P_{ap}(t) - P_{as}(t)$$

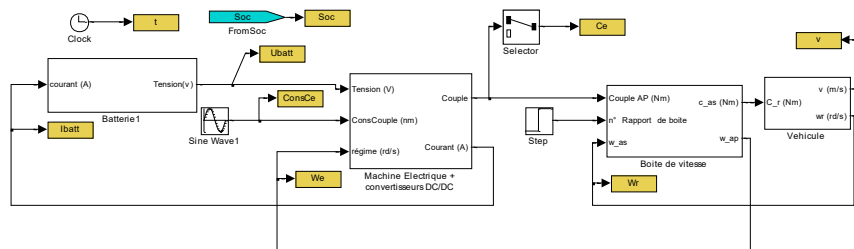
Nb : la formule ne dépend pas du sens des échanges énergétique

- Complétez le programme `exe23.m` pour afficher, sur le diagramme des pertes, les pertes ainsi calculées.

## 2.4 Modélisation du véhicule

- Enregistrez le modèle précédent sous « `TestVehicule.mdl` »
- Programmez le bloc « `Vehicule` » puis reliez-le au modèle de la boîte de vitesses.

Choisissez une consigne couple  $ConsC_r(t) = \begin{cases} 100 \text{ Nm} & \forall t < 8 \\ -30 \text{ Nm} & \forall t \geq 8 \end{cases}$  et de rapport de boîte inchangées.



- Exécutez le programme `exe24.m` pour valider le bon fonctionnement de votre modèle (vérifier la cohérence des données affichées, est-ce des courbes réalistes, etc.)
- En remarquant que les pertes dans le véhicule sont dues à la force de résistance au roulement  $F_r(t)$  et à la force d'aérodynamisme  $F_a(t)$ , complétez le modèle de la boîte de vitesses de manière à calculer les pertes liées au véhicule.

$$Pertes_{veh}(t) = (F_a(t) + F_r(t)) \cdot v(t)$$

- La puissance servant finalement à faire avancer le véhicule est donc :

$$P_{veh} = P_{veh}(t) = \left( \left( \frac{C_r(t)}{r} - F_a(t) - F_r(t) \right) \cdot v(t) \right)$$

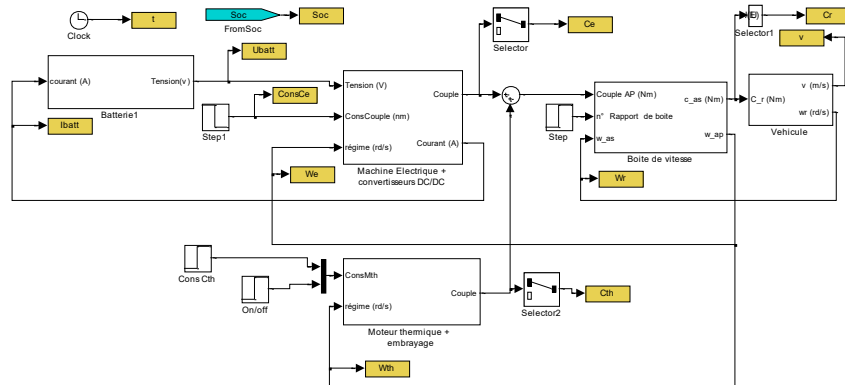
NB : on ne garde que sa valeur absolue pour des commodités d'affichage

- Complétez le programme `exe24.m` pour afficher, sur le diagramme des pertes, toutes les pertes ainsi calculées et la puissance requise pour faire avancer le véhicule.
- Enlevez maintenant les pertes internes à la batterie sur le diagramme précédent. Si on ne considère que la partie correspondant à des couples électriques positifs, à quoi correspond la somme des pertes et de la puissance nécessaire à l'avancement du véhicule ?

## 2.5 Modélisation du moteur thermique

- Enregistrez le modèle précédent sous « TestMoteurThermique.mdl »
- Programmez le bloc « MoteurThermique » puis accouplez le à au modèle de la boîte de vitesses et au modèle de la machine électrique. Choisissez une consigne couple

$$ConsC_{th}(t) = \begin{cases} 20 \text{ Nm} & \forall t < 5 \\ 100 \text{ Nm} & \forall t \geq 5 \end{cases} \text{ avec un allumage (0/1) du moteur thermique à } t = 3 \text{ s.}$$



- Exécutez le programme exe25.m pour valider le bon fonctionnement de votre modèle (vérifier la cohérence des données affichées, est-ce des courbes réalistes, etc.)
- En remarquant que les pertes dans le moteur thermique s'expriment de la manière suivante, complétez le modèle du moteur thermique à calculer les pertes engendrées.

$$Pertes_{th} = \frac{C_{spe}(\omega_{th}(t), C_{th}(t)) \cdot PCI}{3600 \cdot 1000} \cdot g(t) - P_{th}(t)$$

Avec  $PCI$  le Pouvoir Calorifique Inférieur du carburant ( $f_{c\_fuel\_lhv}$ ),  $g(t)$  l'état (0,1) di moteur thermique et  $P_{th}(t) = \omega_{th}(t) \cdot C_{th}(t)$  la puissance mécanique développée.

- Complétez le programme exe25.m pour afficher, sur le diagramme des pertes, toutes les pertes ainsi calculées et la puissance requise pour faire avancer le véhicule.