

# ST5 - Systèmes multi-énergies

## Motopropulseur Hybride

Matheus Elyasha LOPES  
Douglas Ricardo SANSÃO  
João Pedro ROSADA CANESIN  
José MENOCI NETO  
Abdelhaq HADRI  
Hamza BOUQOTTAYA  
Groupe 1  
CentraleSupélec

15 novembre 2019

### Table des matières

|          |   |          |
|----------|---|----------|
| <b>1</b> | <b>Introduction</b>   | <b>3</b> |
| <b>2</b> | <b>Objectifs</b>  | <b>3</b> |
| <b>3</b> | <b>Étude préliminaire sur les différentes architectures automobiles</b> | <b>3</b> |
| 3.1      | Parallel . . . . .  | 3        |
| 3.2      | Serie . . . . .   | 4        |
| 3.3      | Comparaison des avantages et inconvénients . . . . .                    | 5        |
| 3.3.1    | Parallel . . . . .  | 5        |
| 3.3.2    | Serie . . . . .   | 5        |
| 3.4      | Choix de l'architecture . . . . .                                       | 5        |
| <b>4</b> | <b>Modélisation d'un exemple simple sous simulink/Driveline</b>         | <b>6</b> |
| 4.1      | Définition du véhicule . . . . .  | 6        |
| 4.1.1    | Audi A3 e-Tron . . . . .  | 6        |
| 4.1.2    | BMW i3 . . . . .  | 6        |
| 4.2      | Forces sur le véhicule . . . . .  | 6        |
| 4.3      | Calculs sur la vitesse . . . . .  | 8        |
| 4.4      | Circuit sous simulink . . . . .   | 8        |
| 4.4.1    | Audi A3 e-Tron . . . . .  | 8        |
| 4.4.2    | BMW i3 . . . . .  | 9        |
| 4.5      | Mise en place du système choisi . . . . .                               | 10       |
| 4.5.1    | Audi A3 e-Tron . . . . .  | 10       |
| 4.6      | Chaine de traction . . . . .  | 13       |
| 4.6.1    | Audi A3 e-Tron . . . . .  | 13       |
| 4.7      | Gestion d'énergie (thermique et électrique) . . . . .                   | 14       |
| 4.7.1    | Audi A3 e-Tron . . . . .  | 14       |

|          |   |           |
|----------|---|-----------|
| <b>5</b> | <b>Optimisation concernant l'utilisation du carburant</b> | <b>16</b> |
| 5.1      | Audi A3 e-Tron . . . . .                                  | 16        |
| <b>6</b> | <b>Conclusion</b>   | <b>18</b> |

# 1 Introduction

Aujourd'hui il existe plusieurs raisons pourquoi on voudrait aller vers l'utilisation des véhicules hybrides. La principale en étant la réduction d'émission de  $CO_2$ . D'une façon, la voiture hybride peut être pensée comme une très bonne solution pour une transition en douceur vers la voiture propre.

Une automobile hybride est un véhicule dont le principe de fonctionnement est basé sur deux sources d'énergie qui se suppléent, la source électrique et la source mécanique. Il existe, donc, deux moteurs dont un électrique et l'autre thermique traditionnel.

Plusieurs niveaux d'hybridation sont possibles : dès l'hybration légère jusqu'à l'hybride dite "plug in", en sachant que les modèles série et parallèle sont intermédiaires. Ce qui peut donner plusieurs avantages comme l'autonomie renforcée, consommation réduite, moins polluant, confort de conduite.

Notre façon de travailler pendant l'enseignement d'intégration a été de faire deux modèles. Un modèle en parallèle et un modèle en série. Toutes les simulations peuvent être récupérées sur GitHub (<https://github.com/elyasha/st5-motopropulseur>).

## 2 Objectifs

Pour cette semaine d'enseignement d'intégration les objectifs ont été fixés comme :

- Mettre en oeuvre un modèle systémique de la chaîne de traction hybride
- Mettre en oeuvre les outils de traitement numérique sous MATLAB/Simulink
- Mettre en oeuvre une démarche de contrôle de l'ensemble de la chaîne hybride du conducteur aux roues
- Introduction au dimensionnement sur cycle : complexité du système et contradiction de plusieurs objectifs à atteindre

## 3 Étude préliminaire sur les différentes architectures automobiles

### 3.1 Parallèle

Les noms des deux architectures ont une signification énergétique. Dans le cas parallèle, il existe la possibilité de fournir de la puissance aux roues en même temps à partir de l'arbre du moteur thermique (Internal Combustion Engine - ICE) et l'arbre du moteur électrique. C'est-à-dire que les flux de puissance sont parallèles. Les groupes motopropulseurs parallèles sont représentés sur la figure 1 dans les deux tableaux suivants.

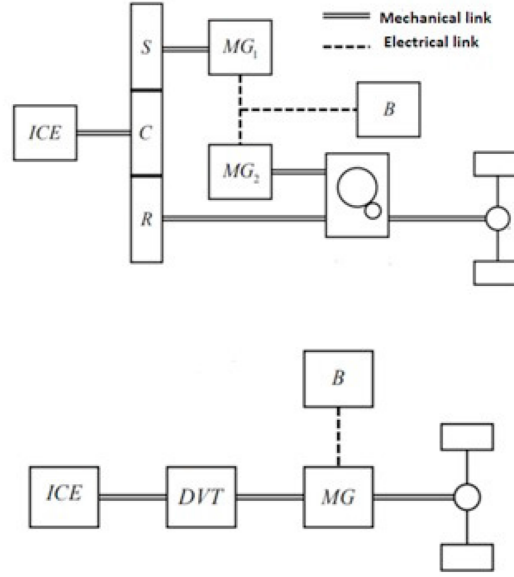


FIGURE 1: CVT parallel architecture (above) and DVT parallel architecture (under)

La configuration CVT (Continuously Variable Transmission) basé sur un train d'engrenages planétaires (composé d'un engrenage Sur, S, Couronne dentée, R, Couronne dentée, C) et deux entraînements électriques nécessaire pour réaliser le bon rapport de transmission, alors que seulement un entraînement électrique est nécessaire dans la structure DVT (Discontinuously Variable Transmission).

En particulier, les configurations CV sont présents dans la plupart des ventes dans l'industrie des véhicules hybrides. Aussi, les architectures en parallèle permettent une meilleure implantation du freinage régénératif et une traction électrique total.

Le système de stockage (B sur la figure 1) comprend le DC/DC fondamental pour le connecter au link DC.

### 3.2 Serie

Dans le cas d'une chaine de traction hybride en série, la fonction principale du moteur à combustion interne est de produire de l'énergie électrique pour la batterie. La sortie mécanique du moteur à combustion interne (MCI) est connecté à un générateur. Le générateur est raccordé à un onduleur/redresseur qui transmet l'énergie produite, comme le montre la figure 2.

Cet énergie sert à charger la source d'énergie électrique (soit une batterie, soit des super condensateurs) et alimenter le moteur électrique relié à l'arbre mécanique. Donc la propulsion d'une chaine hybride est essentiellement électrique, tant que le MCI fonctionne comme une source d'énergie supplémentaire.

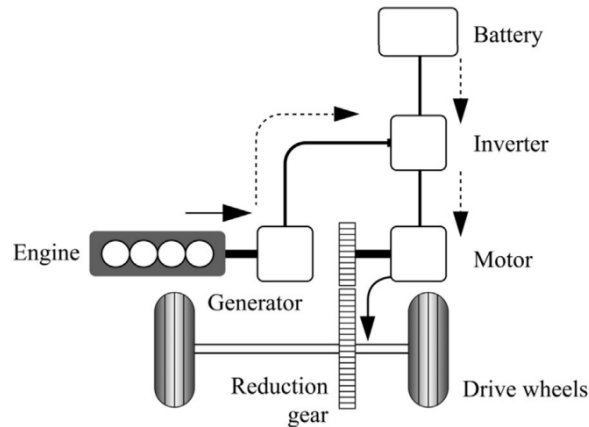


FIGURE 2: Vehicule electrique hybride en serie

### 3.3 Comparaison des avantages et inconvénients

#### 3.3.1 Parallele

Dans cette architecture, les deux moteurs, électrique et thermique peuvent chacun propulser la véhicule, ce qui permet donc les deux moteurs d'agir indépendamment sur la traction. Aussi, Le véhicule hybride à architecture parallèle permet généralement d'obtenir un très bon rendement en haute vitesse puisque la transmission mécanique est alors optimale. De plus, il y a de la récupération par freinage du moteur électrique. Par contre, l'accumulation des puissances dépendra de plusieurs facteurs, voire la puissance de la batterie, les caractéristiques techniques des moteurs... Plus, le problème de la rupture de couple lors des changements de rapports.

#### 3.3.2 Serie

Comme il n'y a pas de lien mécanique entre la sortie du moteur à combustion interne (MCI) et le mouvement du véhicule, le MCI peut être configuré pour fonctionner dans des conditions d'efficacité maximale, ce qui permet d'augmenter le rendement global du véhicule. De plus, la modélisation mécanique devient plus simple puisqu'il n'y a plus besoin de réducteurs ou de différentiels dans l'accouplement.

D'autre part, des batteries plus puissantes sont nécessaires dans l'architecture en série, puisque le MCI produit généralement plus de 50% de l'énergie nécessaire au fonctionnement du véhicule. En plus, comme il y a une conversion de l'énergie mécanique en énergie électrique et par la suite une autre conversion électromécanique, des pertes d'énergie supplémentaires se produisent (notamment au niveau des convertisseurs électriques, où le choix d'architecture joue un rôle important dans l'efficacité globale). Donc Il est nécessaire de vérifier quantitativement les avantages énergétiques du fonctionnement du moteur à combustion interne dans des conditions optimales et les pertes générées après une double conversion.

### 3.4 Choix de l'architecture

Vu que il avait des opinions très différents dans le groupe, nous avons choisi dès le début de réaliser les deux types d'architecture (3 personnes pour chaque configuration). Après, une fois qu'on aura des résultats plus solides, on pourra décider d'une façon plus cohérent la configuration finale pour notre soutenance.

De cette façon, João, José et Douglas ont été chargés de travailler sur la configuration en série et de l'autre côté, Matheus, Abdelhaq et Hamza travaillent sur la configuration en parallèle.

## 4 Modélisation d'un exemple simple sous simulink/Driveline

### 4.1 Définition du véhicule

#### 4.1.1 Audi A3 e-Tron

Pour réaliser la définition du modèle utilisée, nous avons trouvée une table qui synthetize des informations importants sur quelques voitures standard dans le marché et après nous avons choisi le modèle Audi A3 eTron.

| MARQUE  | Modèle du Véhicule | Capacité de Batterie (kWh) | Volume de Réservoir de Fuel (l) | Masse (Vide - kg) | Puissance de Moteur Thermique/ Electrique / Hybride (kW) | Autonomie Electrique (km) | Architecture de la Chaîne de Traction | Accélération 0-100 km/h (s) | Vitesse Maximale (é/h) (km/h) |
|---------|--------------------|----------------------------|---------------------------------|-------------------|--|---------------------------|---------------------------------------|-----------------------------|-------------------------------|
| Audi    | A3 eTron           | 8,8                        | 40                              | 1615              | 110 / 75 / 150   | 50                        | Parallèle                             | 4,9/7,6                     | 130/222                       |
|         | Q7 eTron           | 17,3                       | 75                              | 2520              | 190 / 94 / 275   | 56                        | Parallèle                             | 6,5/6,2                     | 135/230                       |
| BMW     | 225xe              | 5,7                        | 36                              | 1735              | 100 / 65 / 165   | 39 - 41                   | Plug-in                               | -/6,7                       | 125/202                       |
|         | 330e               | 5,7                        | 41                              | 1735              | 135 / 65 / 185   | 37 - 40                   | Plug-in                               | -/6,1                       | 120/225                       |
|         | 740e               | 7,4                        | 46                              | 2015              | 190 / 83 / 240   | 41 - 45                   | Plug-in                               | 5,5/5,3                     | 140/250                       |
|         | X5 40E             | 9,2                        | 85                              | 2305              | 180 / 83 / 230   | 30                        | Plug-in                               | 6,8                         | 120/210                       |
|         | i8                 | 5,2                        | 42                              | 1485              | 170 / 96 / 260   | 37                        | Plug-in                               | 4,4                         | 120/250                       |
| Citroën | DS5 Hybride        | -                          | 60                              | 1660              | 120 / 27 / 147   | -                         | Série                                 | 8,6                         | 120/211                       |

FIGURE 3: Differents modèles de véhicule

Le choix peut être justifiée par le fait que l'Audi A3 a une bonne acceleration et vitesse maximale interessant (222 km/h pour le modèle hybride). Aussi le fait que la batterie a une capacité moins forte pour une puissance raisonable d'environ 150kW.

#### 4.1.2 BMW i3

Pour la simulation de la chaîne de propulsion série on a choisi comme modèle la BMW i3, vu que c'est un modèle avec une forte présence dans le marché.

| Marque | Modèle | Capacité de Batterie (kWh) | Volume du réservoir de fuel (l) | Masse (Vide - kg) | Puissance du Moteur Thermique / Electrique (kW) | Autonomie Electrique (km) | Architecture de la Chaîne de Traction | Accélération (0-100 km/h) (s) | Vitesse Maximale (km/h) |
|--------|--------|----------------------------|---------------------------------|-------------------|---|---------------------------|---------------------------------------|-------------------------------|-------------------------|
| BMW    | i3     | 42.2                       | 8.7                             | 1796              | 25 / 125  | 260                       | Série                                 | 7.3                           | 150                     |

TABLE 1: Caractéristiques du véhicule

### 4.2 Forces sur le véhicule

La simulation des forces sur le véhicule est la base pour bien comprendre la dynamique du véhicule. Les résultats numériques sont basés sur les entrées fournies par le conducteur a fin de calculer le fonctionnement du véhicule en direction du flux de puissance. La vitesse et l'accélération de la voiture sont déterminées à l'aide des entrées que sont les pédales.

En général les véhicules sont séparés entre châssis et groupe motopropulseur, en sachant que c'est juste le groupe motopropulseur qui diffère suivant le type de véhicule modélisé.

Le modèle des forces peuvent être vues de cette manière :

Les forces résistantes ( $F_{res}$ ) se composent de la force de résistance au roulement entre le pneu et la chaussée, la force aérodynamique du châssis et la force due à la pente (figure 4). Les forces résistantes

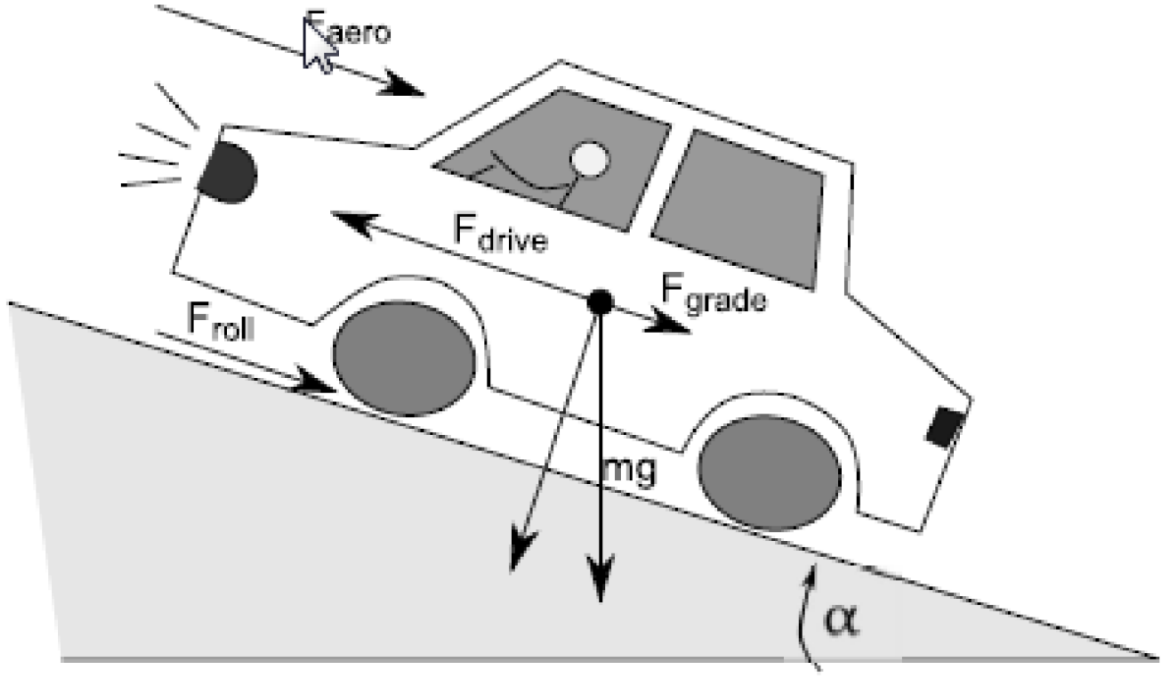


FIGURE 4: Les forces résistantes

représentent les pertes du châssis, qui sont fortement liées à la vitesse du véhicule, mais elles varient aussi avec la masse et la géométrie du véhicule.

Afin de développer un modèle énergétique, deux hypothèses concernant le châssis sont faites :

- Seul le mouvement longitudinal est considéré
- Le contact pneu chaussée est parfait

Le couple à la roue ( $T_{drive}$ ) à fournir par le groupe motopropulseur peut être calculé en fonction de la vitesse ( $v$ ) et de l'accélération ( $a$ ) du véhicule :

$$T_{drive} = J_{vehicle} \frac{a}{R_{tire}} + F_{res}(v) R_{tire} \quad (1)$$

Où  $J_{vehicle}$  est l'inertie équivalente du véhicule ramené à la roue et  $R_{tire}$  est le rayon des pneus.

La force de roulement est approximée normalement par :

$$F_{roll} = C_r M_{vehicle} g \cos \alpha \quad (2)$$

avec  $C_r$  le coefficient de résistance au roulement, qui dépend de la charge du véhicule et du rayon de la roue.  $g$  l'accélération de la pesanteur et  $M_{vehicle}$  la masse du véhicule, comprenant le châssis, la transmission, le moteur et les passagers. La réduction de la masse du véhicule permettrait de réduire l'énergie nécessaire pour vaincre la résistance au roulement. Ce qui explique une autre fois le choix de l'Audi A3 utilisé, vu qu'il a une masse moins élevée.

La résistance aérodynamique peut être calculée par :

$$F_{aero} = \frac{1}{2} \rho C_d A v^2 \quad (3)$$

avec  $\rho$  la densité de l'air,  $C_d$  le coefficient de traînée du véhicule et  $A$  la surface frontale du véhicule.

Lorque l'on conduit sur des routes vallonnées, la force due à la pente de la route doit être prise en compte. Cette force est calculée par :

$$F_{grade} = M_{vehicle}g \sin \alpha_{road} \quad (4)$$

avec  $\alpha_{road}$  la pente de la route.

Dans le cadre de ce travail, nous avons étudié le motopropulseur hybride (soit en série, soit en parallèle).

Trois hypothèses ont été considérées :

- Le changement de rapport est instantané
- Pas de pertes dans l'embrayage, sauf quand la vitesse de l'arbre secondaire est inférieure à celle du ralenti moteur
- Une consommation des auxiliaires constante ( $P_{aux}$ ) et un rendement constant du système de génération électrique ou thermique, notamment en fonction de la vitesse de rotation moteur.

### 4.3 Calculs sur la vitesse

Pour calculer la vitesse de rotation du moteur, il faut d'abord modéliser la transmission mécanique, qui peut être modélisée simplement en utilisant les rapports de réduction  $R_G$  du rapport de boîte sélectionné, le rapport du différentiel  $R_{FD}$  ainsi que les rendements correspondants ( $\eta_G$ ,  $\eta_{FD}$ ).

En utilisant l'équation 1, le couple  $T_{eng}$  fourni par le moteur à chaque instant est exprimée comme suit :

$$T_{eng} = \frac{T_{drive}}{R_{FD}\eta_{FD}^\psi R_G(i_{gear})\eta_G^\psi(i_{gear})} + \frac{P_{aux}}{\omega_{eng}} + J_{eng}\dot{\omega}_{eng} \quad (5)$$

$J_{eng}$  étant l'inertie du moteur,  $i_{gear}$  le numéro de rapport et  $\psi$  le signe du couple à la roue.

Finalement, la vitesse de rotation du moteur est calculée à partir de la vitesse à la roue  $\omega_{wheel}$  du véhicule et les rapports de réduction selon la relation 6.

$$\omega_{eng} = \max(\omega_{engidle}, \omega_{wheel}R_{FD}R_G(i_{gear})) \quad (6)$$

avec  $\omega_{engidle}$  la vitesse de rotation au ralenti du moteur.

### 4.4 Circuit sous simulink

#### 4.4.1 Audi A3 e-Tron

Pour commencer à réaliser la simulation, d'abord il faut bien noter que le modèle choisi (Audi A3 e-Tron) est un véhicule du type P2. C'est-à-dire que la machine électrique est attelée latéralement (par une courroie) ou intégrée entre le moteur et la transmission ; la machine électrique est découplée du moteur à combustion interne et elle a la même vitesse que le moteur thermique (ou un multiple de celle-ci).

Les principales configurations sont disponibles en figure 5



| Basic Category | Mixed Mode          | Motor Position | Common Name                      | Applied Model  |
|----------------|---------------------|----------------|----------------------------------|--|
| Series         | Electric coupling   | "P1 + P3"      | Series                           | Nissan Note e-Power, BMW i3, GAC GA5   |
|                |                     | P0             | BSG/BSA                          | GM Saturn VUE, Mazda CX-5  |
|                |                     | P1             | ISG/Single clutch parallel       | Honda Insight 2001, Honda Civic 2003, Honda Accord 2005, Mercedes Benz S400  |
| Parallel       | Mechanical coupling | P2             | Parallel P2/Dual clutch parallel | Audi A3 e-Tron, BMW 330e, BMW 530e, BMW X5, VW Golf GTE, SVW Passat, Mercedes Benz E00, Mercedes Benz S550, Infiniti Q50, Hyundai Sonata 9, Hyundai Ioniq, Honda Fit, Kia Niro, Kia Optima, CHANA EADO, Chery Exeed TX |
|                |                     | P2.5           | Parallel P2.5                    | Lynk 01 Jin Lite, Geely Bo Rui GE  |
|                |                     | P3             | Parallel P3/Rear parallel        | BYD Qin  |
|                |                     | P4             | -                                | -  |

FIGURE 5: Modèles principaux des véhicules par rapport à la position du moteur (électrique)

Les architectures hybrides douces P2, P3 et P4 sont meilleures en termes d'efficacité énergétique, principalement en raison du positionnement de la machine électrique. Dans le cas P2, la machine électrique est positionné sur l'arbre d'entrée de la transmission.

La principal avantage de cette architecture est l'augmentation du potentiel de récupération d'énergie et la disponibilité de fonctions de commande hybrides supplémentaires (fluage électrique / entraînement ou récupération d'énergie en roue libre).

Par contre, comme principal inconvénient, le coût d'intégration est beaucoup plus élevée dans ce système.

Pour mieux expliquer le système, on peut regarder le schéma bloc qui est donné en figure 6.

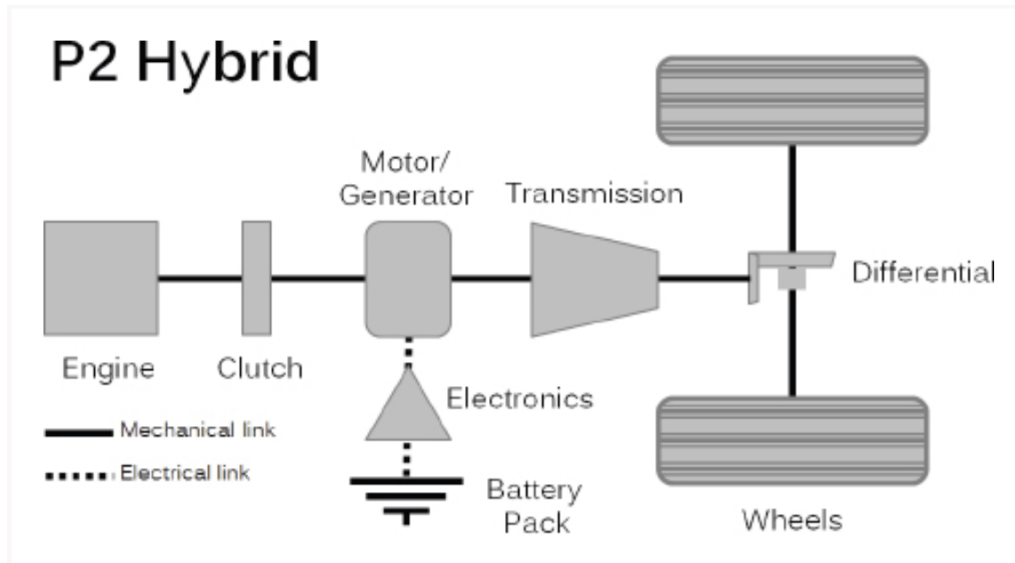


FIGURE 6: Configuration du P2 MHEV Audi A3 e-Tron

#### 4.4.2 BMW i3

Après des nombreuses essayes sous Simulink on n'est pas arrivé à un modèle série qui marche. Donc on poursuivra qu'avec le modèle en parallèle.

## 4.5 Mise en place du système choisi

### 4.5.1 Audi A3 e-Tron

Pour mettre en place le système choisi, on fera toute la simulation en simulink avec les paramètres clés données sur les datasheets de l'Audi A3.

Le schéma bloc de la simulation est montré sur la figure 2.

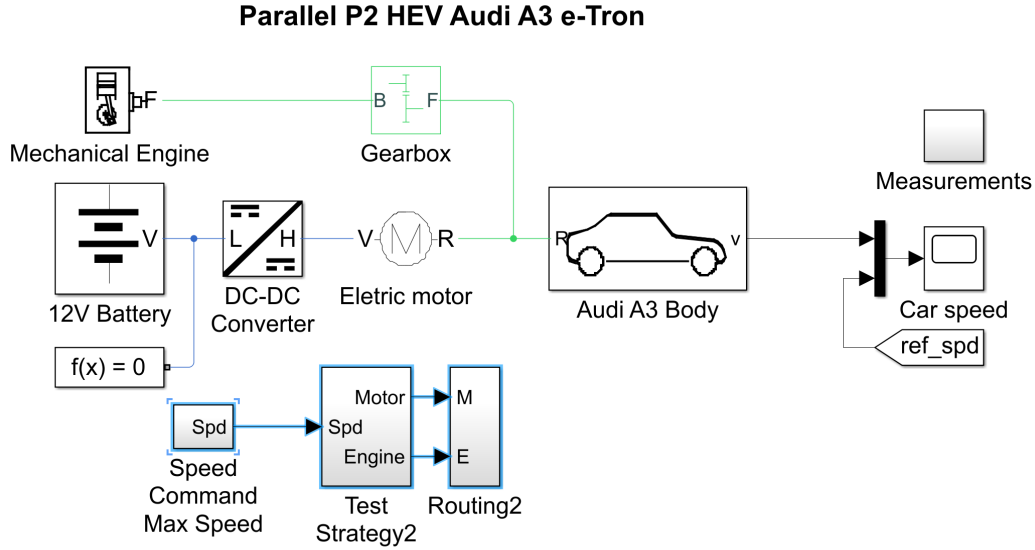


FIGURE 7: Schéma bloc pour l'Audi A3

Comme une première stratégie, on a réussi à simuler l'accélération et la désaccélération du véhicule sur une surface plane. Le contrôle utilisé est un contrôleur PI sur la vitesse du moteur électrique qui calcule le couple nécessaire pour le changement de vitesse qui est commandé par le conducteur.

Dans notre cas, on a choisi de faire une simulation en 20 secondes dont l'accélération commence en  $t = 2s$ , elle s'arrête à  $t = 7s$  et il y a 5s de désaccélération entre  $t = 12s$  et  $t = 17s$ .

Les résultats sur la vitesse sont les suivantes :

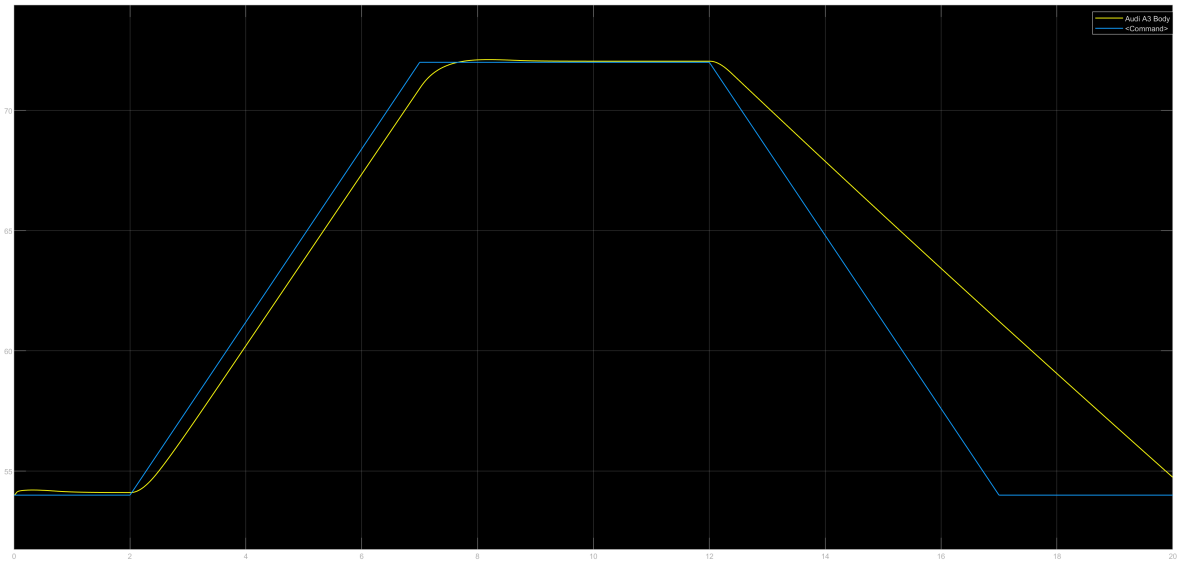


FIGURE 8: Vitesse de l'Audi A3 versus vitesse commandé

On peut voir que la phase d'accélération est beaucoup plus performante et que en général, le véhicule a du mal en freinage.

En regardant les niveaux d'énergie et de essence, on peut regarder les graphs suivants :

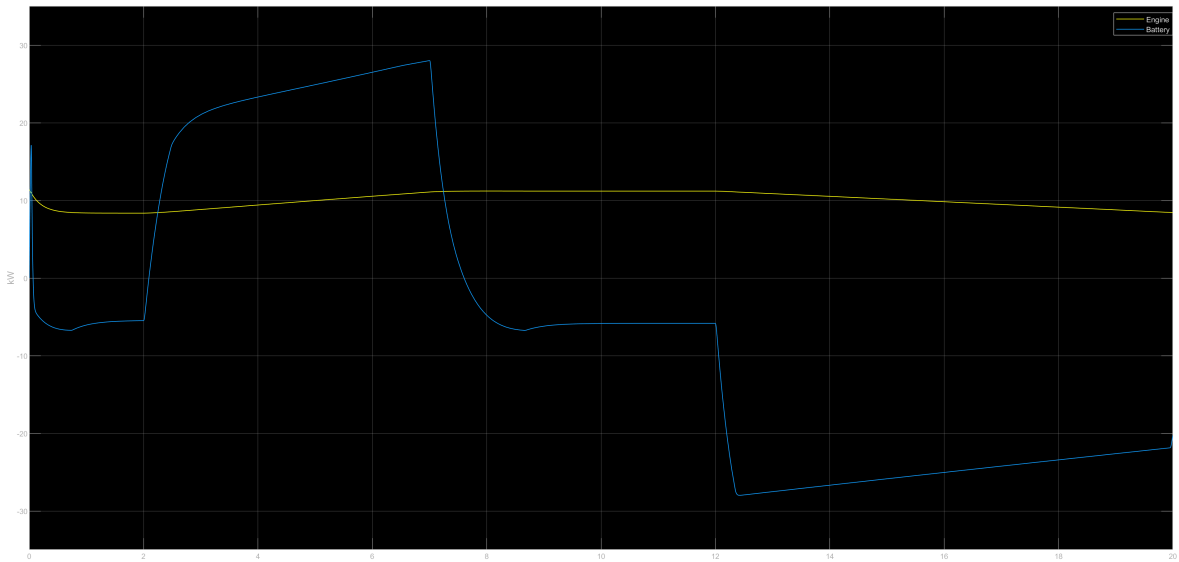


FIGURE 9: Puissance de l'Audi A3

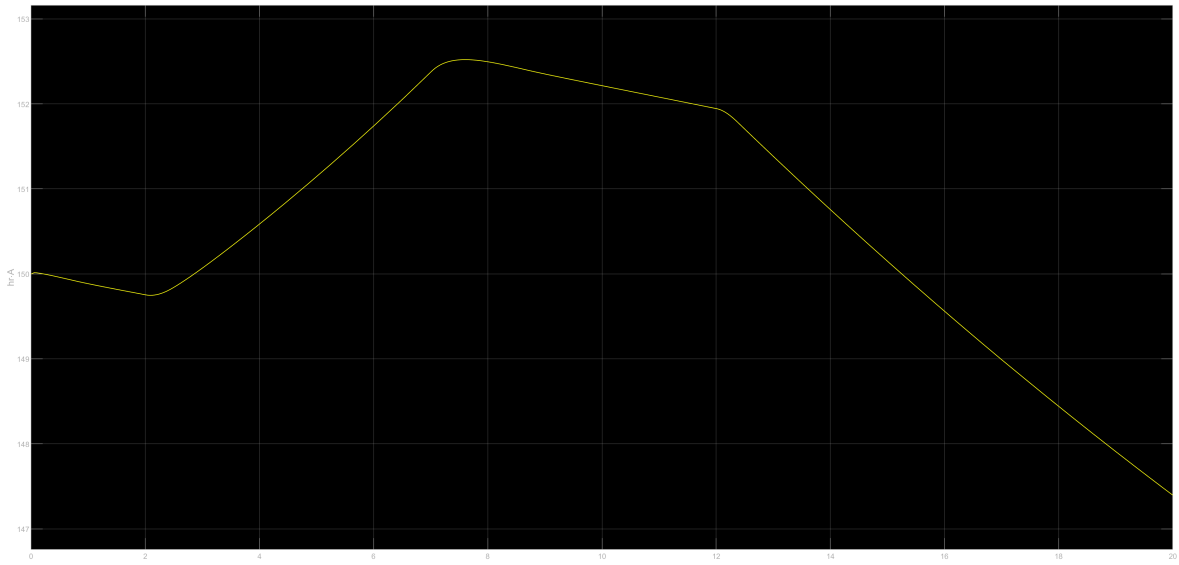


FIGURE 10: Charge de la batterie de l'Audi A3

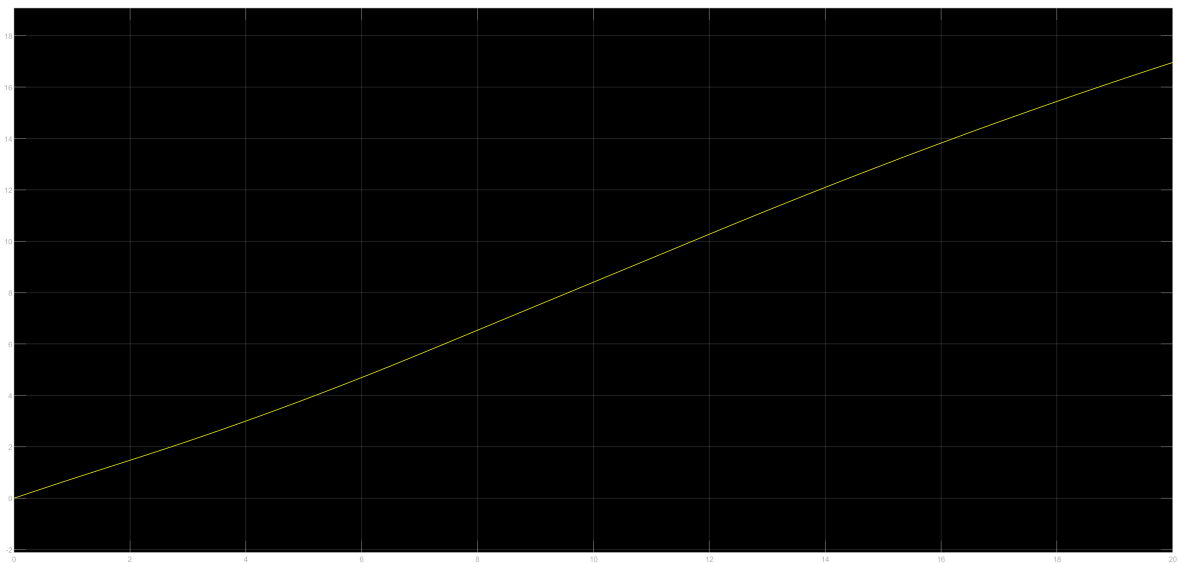


FIGURE 11: Consommation d'essence de l'Audi A3

Les conclusions générales sont assez raisonnables, la puissance du moteur thermique est presque constante et une fois que il existe le besoin d'augmenter la vitesse, la demande d'énergie fait que la puissance électrique soit positive, c'est-à-dire que le moteur électrique commence à être utilisé. Ce fait peut être bien noté sur l'augmentation de la vitesse de rotation du moteur électrique qui est beaucoup plus relevant que l'augmentation de vitesse du moteur thermique.

On regarde aussi depuis la simulation que les pertes électriques sont provenients de l'accélération et de la desacceleration. Ce qui explique la courbe de charge de la batterie.

Comme attendu, la consommation en carburant est presque linéaire avec le temps. C'est-à-dire que il aura plus de consommation si on utilise plus le véhicule. Ce qui est normale. La consommation dans

notre simulation a arrivé à un valeur proche de 17 à 18g de carburant pour un période de 20 seconds.

## 4.6 Chaîne de traction

### 4.6.1 Audi A3 e-Tron

La chaîne de traction se divise à deux chaines, une thermique et l'autre électrique, la chaîne de traction électrique commence dans la batterie. Notre système est basé sur un model de véhicule réel la Audi A3 e-tron, donc on a suivi les mêmes paramètres pour notre modèle, la batterie est à un ensemble de petite batterie en lithium-ion, à une tension de 12v et une capacité max de 8.8 kWh combiné avec une résistance intérieur faible de 1uOhm on arrive à réduire les pertes joules. Tout est lié avec une capacité en parallèle pour assurer la stabilité de niveau de tension.

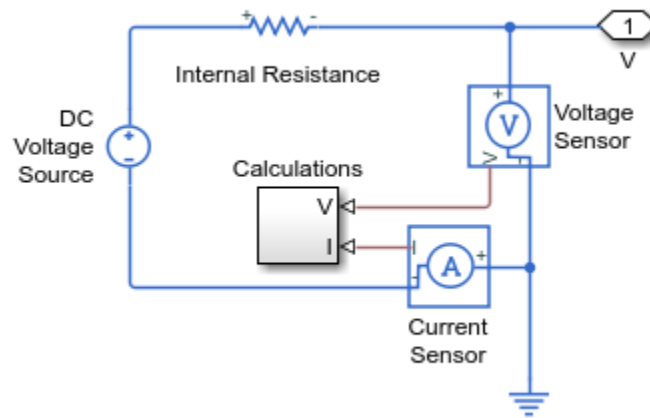


FIGURE 12: Modèle de batterie utilisé

Après la batterie on arrive au stage de la conversion DC/DC où on a utilisé convertisseur parfait.

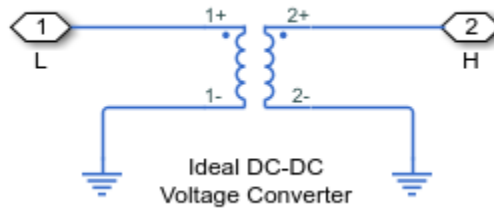


FIGURE 13: Convertisseur DC - DC

Le moteur électrique utilisé est géré par une commande de vitesse. Suivant une consigne de rotation référentielle on arrive à calculer la consigne de couple demandé du moteur. La boucle de régulation contient un correcteur PI pour assurer la bonne réponse à la consigne. On impose aussi la saturation du couple demandé du moteur à fin d'éviter la surcharge et l'emballement du moteur.

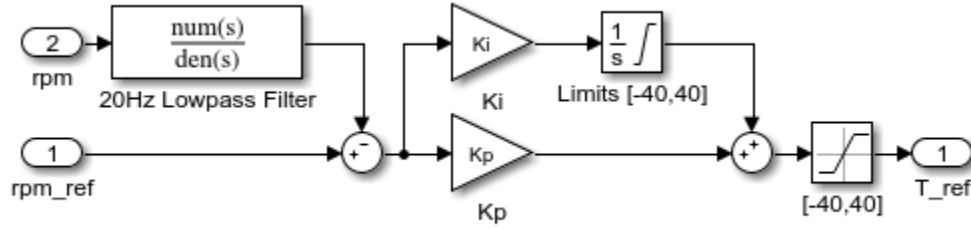


FIGURE 14: Modèle du moteur électrique

L'interface de liaison entre le moteur électrique et le moteur thermique se fait en un point après la boîte à vitesse et avant le bloc de la voiture (contenant le corps de la voiture, le différentiel et les roues ). Nous avons choisi de faire le couplage dans ce point pour éviter le cas où un moteur impose la vitesse de rotation sur l'autre, par conséquent chacun suit son propre comportement. Dans une simulation, en régime moyen, on obtient les vitesses de rotation respectivement du moteur thermique et moteur électrique : 2500 rpm et 600 rpm.

## 4.7 Gestion d'énergie (thermique et électrique)

### 4.7.1 Audi A3 e-Tron

Dans la réalité, grâce à la grande autonomie électrique (jusqu'à 50 kilomètres), plusieurs clients n'utiliseront que rarement le moteur à essence de l'Audi. Normalement, dans le cas de ce hybride le moteur thermique TFSI n'est souvent activé qu'en cas de kickdown et qu'il est donc soumis à de fortes charges à froid. En essayant de régler ce problème, les développeurs l'ont équipé avec une variété de dispositifs de protection.

D'une part, avec  $110kW$  et  $250Nm$ , le moteur thermique (1.4 TFSI) est puissant. D'autre part, le moteur électrique (machine synchrone à excitation permanente) a une puissance maximale de  $75kW$  et un couple de  $330Nm$ .

La gestion d'énergie entre les deux moteurs permet d'atteindre une autonomie de 940 kilomètres.

Dans notre simulation, même si nous avons réussi à faire une bonne approximation pour le véhicule, les simulations ne sont pas parfaites vu qu'il manque des paramètres qui ne sont pas sur Internet et seront trouvés juste en fichiers de l'entreprise qui fait le véhicule.

Pour voir comment la gestion d'énergie influe sur nos résultats, on regarde le graphe de la puissance commandé par chaque moteur en situations différents. En sachant que dans notre modèle le contrôleur de vitesse a été mis dans le moteur électrique. Le moteur thermique a été laissé libre pour être utilisé avec le moteur électrique.

Dans la simulation "start and stop", les résultats sont montrés sur la figure 9.

Dans la simulation "temps élevée", où on a testé la performance du moteur dans une simulation avec le temps d'une voyage. Les résultats sur la repartition des moteurs sont donnés par la figure 15

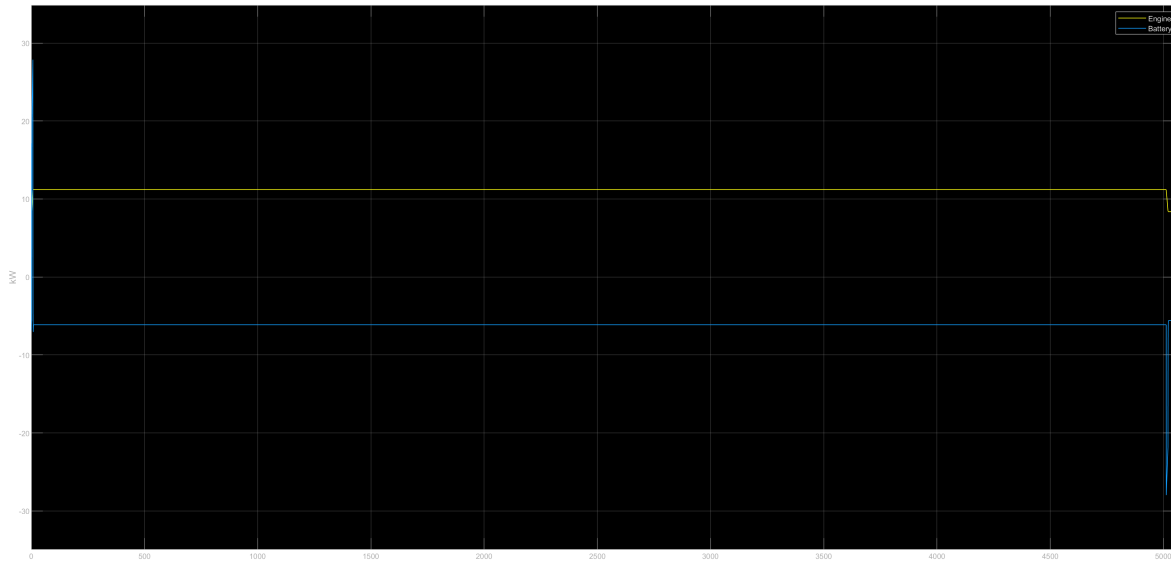


FIGURE 15: Puissance de l'Audi A3

Quand nous avons simulé l'essai de vitesse maximale du moteur thermique, nous avons trouvé les courbes de puissance qui nous donnent la répartition d'énergie, ce qui peut être vu sur la figure 16.

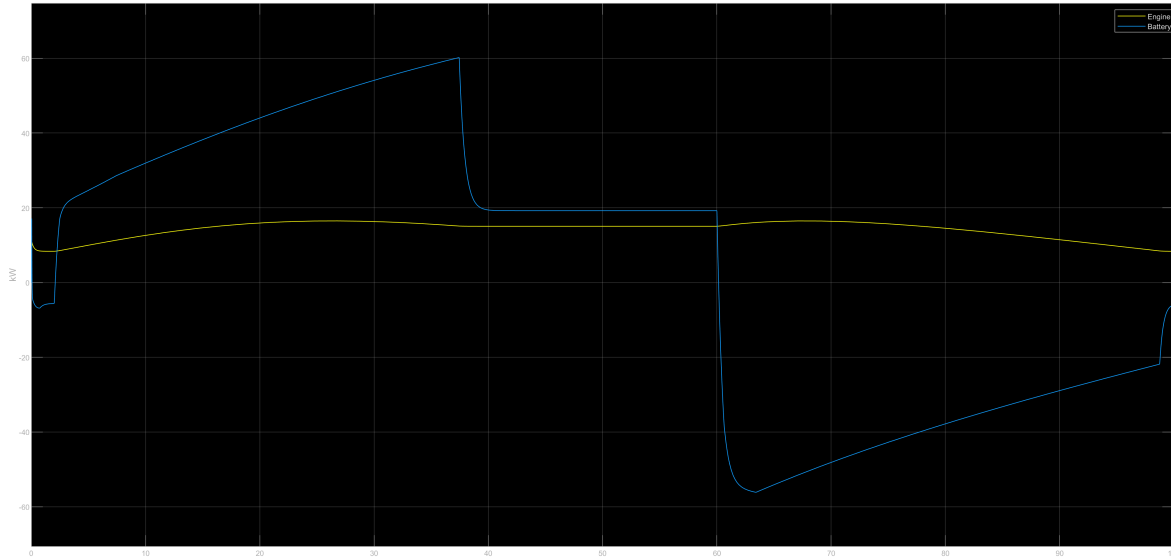


FIGURE 16: Puissance de l'Audi A3

Ce qui peut être appris depuis les graphs, c'est le fait que en accélération la batterie est utilisée de façon intensive (il existe même le fait que le moteur thermique est l'acteur principale en accélération). En vitesse constante, la consommation électrique est presque nulle, le niveau de puissance est toujours en voisinage de  $0kW$ . De l'autre côté, en freinage, la batterie est rechargée, ce qui a été discuté avant dans ce rapport.

Normalement, les simulations peuvent être améliorées par rapport au modèle original Audi. Mais le principe physique est déjà bien discuté.

## 5 Optimisation concernant l'utilisation du carburant

### 5.1 Audi A3 e-Tron

Le véhicule choisi offre une puissance maximale de  $150kW$  (système complet) et arrive à délivrer en moyenne 100km avec juste 1.5 litres de carburant. Le véhicule choisi respecte le standard ECE pour des véhicules hybrides. En concernant les émissions de carbone, la moyenne de l'Audi est seulement 35g/km.

Les écrans Audi A3, comme interface avec le conducteur, fournissent des informations précises sur l'état des machines. Le wattmètre du système indique le rendement global du système, ainsi que l'état de la chaîne mécanique et le niveau de la charge de la batterie. De plus, le système d'information du conducteur affiche les plages de fonctionnement et les consommations d'électricité et d'essence.

Dans notre simulation, nous avons simplifié le modèle à cause des défis rencontrés pendant la réalisation de notre projet. Principalement la transmission, parce que nous n'avons pas fait une boîte à vitesse complexe avec 6 vitesses. Donc, nous avons simulé la consommation en trois différentes situations à fin de l'optimiser.

La première situation est la séquence "Start and Stop", où le véhicule fait une accélération initiale et après quelques instants freinage. La courbe de consommation peut être observée en figure 11.

En deuxième situation d'étude, nous avons choisi de observer la consommation dans une période plus longue (5050 secondes). Par contre, on n'a pas demandé le maximum du moteur thermique. En fait, l'accélération est la même que la première simulation, ce qui change c'est le fait que la durée est beaucoup plus élevée. Comme résultat, nous avons trouvé que la consommation est aussi presque linéaire. Sur simulink, le type de consommation utilisé pour le 'Generic Engine' est le "brake specific fuel consumption by speed and brake mean effective pressure" parce que c'est le modèle qu'on a trouvé plus proche au cas de l'Audi A3.

Le graph peut être vu en figure 17.

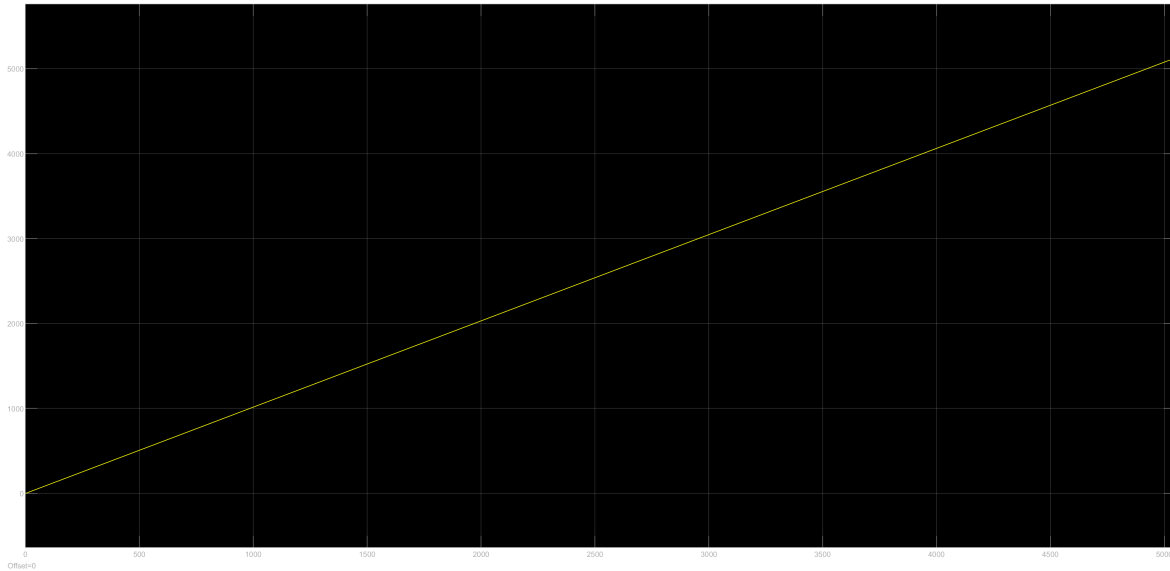


FIGURE 17: Consommation de carburant

Pour la dernière simulation, nous avons utilisé le moteur thermique au maximum, c'est-à-dire, à une vitesse de environ  $6000rpm$ . Dans ce cas, ce qu'on observe que la réponse à la vitesse demandé est bien précise au début de l'accélération et en voisinage de la vitesse maximale du véhicule, le contrôleur présente du retard, ce qui arrive à nouveau en deceleration.



Les graph (vitesse du véhicule, vitesse des moteurs et consommation) sont données en figures 18, 19, 20.

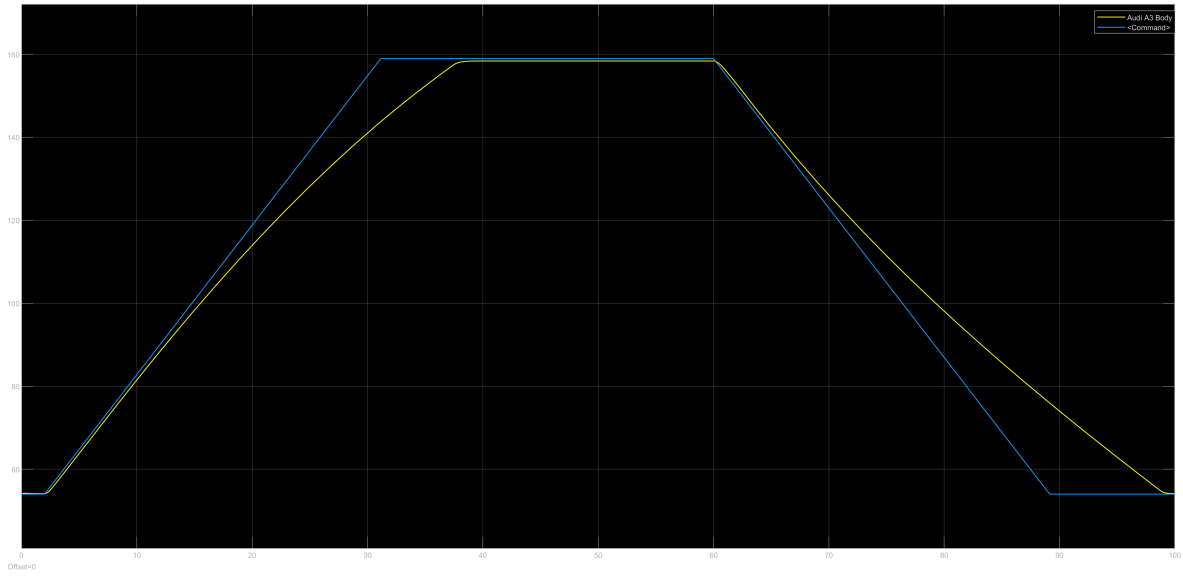


FIGURE 18: Vitesse du véhicule en régime de demande élevée

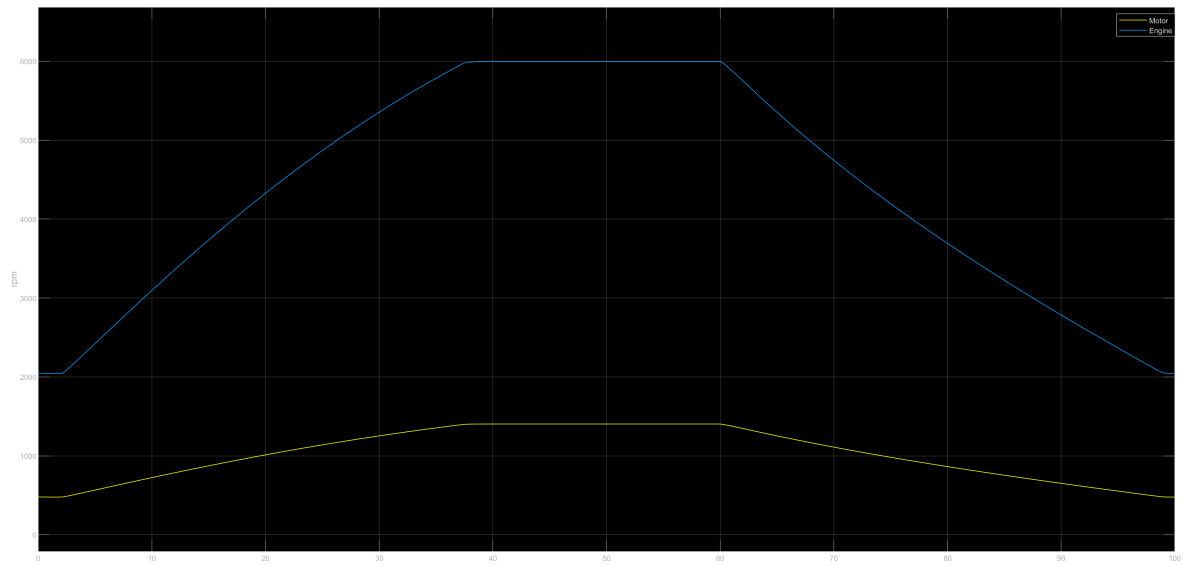


FIGURE 19: Comparaison de vitesse des moteurs (électrique et mécanique)

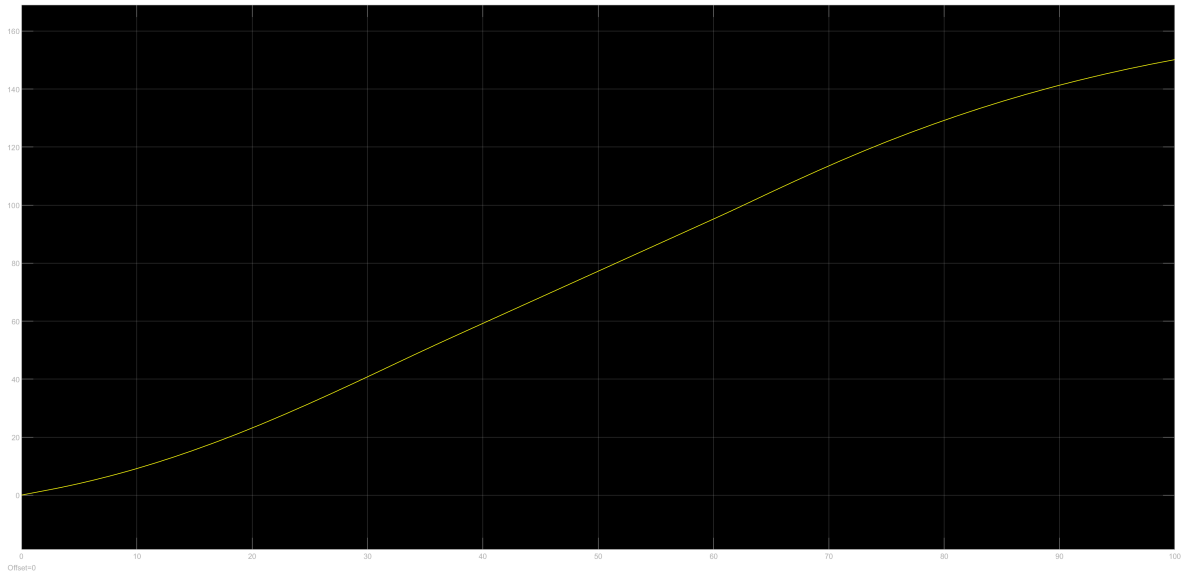


FIGURE 20: Consommation de carburant

La consommation dans la dernière simulation se présente en deux phases, une transitoire durant laquelle la consommation est élevée à cause de la grande demande du couple, et une autre permanente dès que la vitesse se stabilise la consommation se stabilise aussi à des valeurs moins élevées que la phase transitoire.

## 6 Conclusion

Pour conclure, l'équipe pense que l'enseignement d'intégration a été une façon d'apprendre à utiliser le logiciel MATLAB avec Simulink et Driveline. Les objectifs fixés au début ont été atteints totalement ou partiellement, au niveau du possible à faire en une semaine. La problématique de modélisation et des problèmes de compilation nous ont donné un retard pour faire la partie du contrôleur et aussi la partie de gestion d'énergie et carburant.

Ce que l'équipe trouve vraiment intéressant, c'est le fait que nous avons réussi à avoir des résultats positifs même si le temps était court et comme ça, nous avons un repository GitHub qui peut être développé après par d'autres équipes en donnant un avenir à notre projet.

Et finalement, l'équipe est bien d'accord sur le fait que l'implémentation a été compliquée grâce au fait qu'on n'avait pas la maîtrise du Simulink demandé pour le projet au début de l'EI. En revanche, nous avons des opinions positives sur l'exécution et la réalisation du projet.

Nous remercions l'équipe enseignante pour l'effort d'organisation et pour l'aide qui a été vraiment essentielle pour notre projet.

## Références

- [1] D. Lanzarotto, M. Marchesoni, M. Passalacqua, A. Pini Prato, M. Repetto, **Overview of different hybrid vehicle architectures**, IFAC-PapersOnLine, Volume 51, Issue 9, 2018
- [2] Félicitas Mensinga, Rochdi Trigui, Hélène Tattégren, Eric Bideaux, **Eco-conduite des véhicules : du calcul de la trajectoire idéale à son utilisation lors de l'activité de conduite**, EF-EPF-MGE, 2014
- [3] Mert Mökükcü, **Optimisation énergétique d'un véhicule hybride**, Université Paris-Saclay, 2018

- [4] Baodi Zhang, Fuyuan Yang, Lan Teng, Minggao Ouyang, Kunfang Guo, Weifeng Li and Jiuyu Du, **Comparative Analysis of Technical Route and Market Development for Light-Duty PHEV in China and the US**, State Key Laboratory of Automotive Safety and Energy, 2019
- [5] Audi, Program for Germany, **Technical Data - Audi A3 Sportback e-tron 1.4 TFSI S tronic (150kW)**, Août 2017
- [6] Maya Hage Hassan, Romaric Landfried, Amir Arzandé, **Présentation sur l'enseignement d'intégration**, Novembre 2019

## Annexes

### A - Travaux Pratiques - Commande en courant d'un moteur synchrone

Tout d'abord, notre TP avait comme but contrôler un moteur synchrone par un courant de référence ( $I_{ref}$ ). Pour cela, il a été utilisé un circuit électrique composé d'une source de tension continue, un onduleur, un moteur synchrone et une carte d'acquisition qui était connecté dans l'ordinateur du laboratoire. L'onduleur utilisé avait 6 transistors et avec l'ouverture ou la fermeture de ces transistors on peut modifier l'état du rotor. La carte utilisée a été une carte dSPACE SKHI22. Cette carte a été utilisée pour mesurer les valeurs de courant triphasé qui seront comparés avec les références imposés par  $I_{ref}$  et  $\theta_0$ .

Après réalisation de ce TP, on a vu que pour réaliser la régulation de tension/courant, il est nécessaire de réaliser l'identification des paramètres comme la résistance, l'inductance et la constante  $k\phi$  pour bien effectuer la régulation (en utilisant un correcteur PI en boucle fermée).

Pour voir les schémas et comment a été effectué l'expérience, il suffit de regarder les figures 21 et 22

Pour contrôler la courante on a utilisé un contrôleur PI qui comparait les courantes  $I_a = K \sin(\omega t - \theta_0)$ ,  $I_b = K \sin(\omega t - \theta_0 - 120^\circ)$  et  $I_c = K \sin(\omega t - \theta_0 + 120^\circ)$  en utilisant une boucle fermée. Le contrôleur a comme entrée une différence de courante, qui est ensuite converti en tension qui est utilisé par l'onduleur pour changer la valeur du courant.

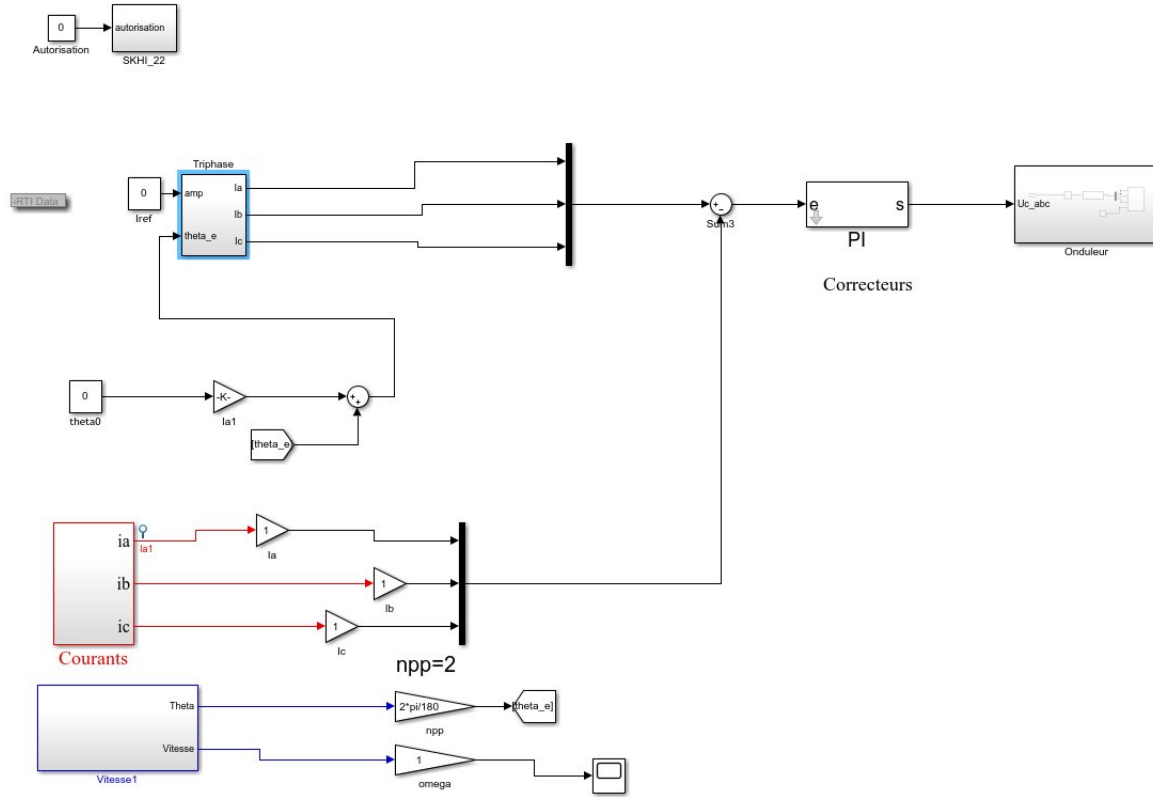


FIGURE 21: Schéma MATLAB implémenté sur le laboratoire

Dans une machine synchrone, le courant  $I_{ref}$  et l'angle  $\theta_0$  jouent un rôle important dans la commande de la machine. Le courant de référence, appelé  $I_{ref}$ , est le courant choisi dans schéma qui sera utilisé avec le courant mesuré comme paramètres pour le contrôleur PI. L'angle appelé  $\theta_0$  est l'angle entre le champ magnétique du stator et le champ magnétique du rotor. Le courant de référence  $I_{ref}$  est choisi dans le logiciel lui-même, ce qui permet de changer le sens de rotation du moteur si on inverse le sens de la courant. L'angle  $\theta_0$  joue également un rôle similaire dans le contrôle de la vitesse du moteur : si nous inversons l'angle  $\theta_0$ , nous inversons également le sens de rotation du moteur. Ce qui est vrai aussi pour le courant.

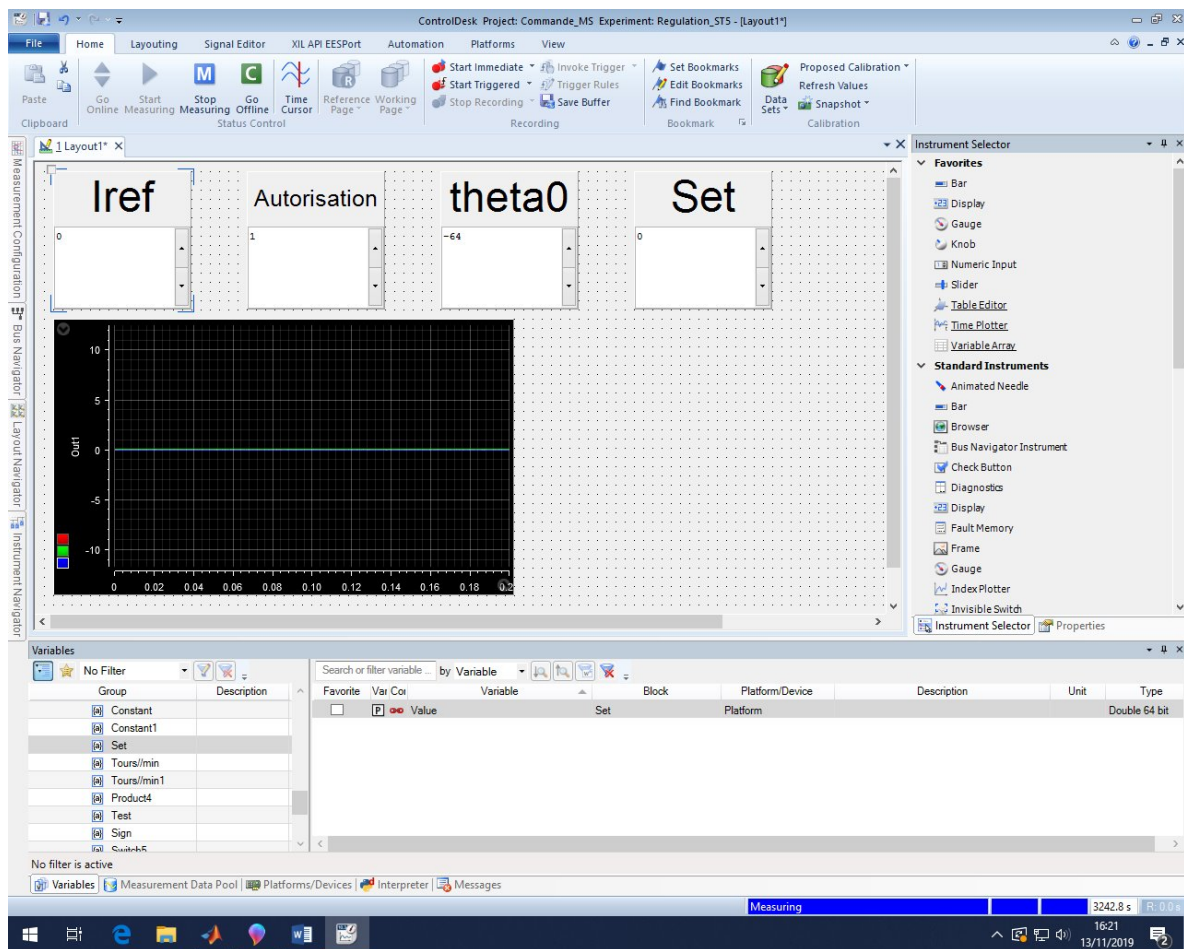


FIGURE 22: Schéma ControlDesk implémenté pour mesurer de façon instantanée les paramètres