

Simulation du démarrage à froid des véhicules automobiles

Patrick Bastard
Pôle Calcul
Direction de l'Electronique Avancée (DEA)

François-Xavier Vallet
Service « Etudes Electrotechniques »
Direction de l'Ingénierie Electrique
et des Systèmes Electroniques (DIESE)

Technocentre Renault
78288 Guyancourt cedex
tél : + 33 (0)1 76 85 77 53
patrick.bastard@renault.com / francois-xavier.vallet@renault.com

1 Contexte et objectifs

La phase de démarrage des moteurs thermiques est extrêmement complexe. Elle fait intervenir des phénomènes électriques via la « chaîne de démarrage électrotechnique » (batterie-câblage-démarreur), mais aussi des phénomènes mécaniques et thermodynamiques dans le moteur lui-même. Le couplage de tous ces phénomènes, dans un régime de fonctionnement par nature transitoire, rend délicate l'optimisation du dimensionnement de la batterie et du démarreur dans le respect du cahier des charges « démarrage à froid » de nos véhicules. Cette difficulté est encore amplifiée par la diversité des paramètres à prendre en compte : aux paramètres intrinsèques des différents composants eux-mêmes (batterie, câblage, démarreur, moteur), il faut rajouter par exemple la température ambiante (primordiale pour estimer le couple résistant du moteur entraîné) ou encore la nature de l'huile (dont la viscosité a aussi un fort impact sur le couple résistant).

Concrètement, la validation de la chaîne de démarrage repose sur des essais en chambre climatique permettant, sur des bancs moteur ou sur des véhicules, de faire des essais en conditions réalistes de fonctionnement. Toutefois, de tels essais sont toujours longs et délicats. Le « chambre » du véhicule à des températures très basses peut prendre 24 heures et la prise en compte de la dispersion des paramètres les plus impactants s'avère complexe. De plus, de tels essais ne peuvent souvent être menés qu'à partir d'un certain état d'avancement dans le cycle de développement d'un véhicule, ce qui présente le risque de devoir gérer des modifications tardives sur des pièces telles que la batterie ayant un impact fort sur l'architecture sous-capot du véhicule.

Le développement d'un modèle numérique de simulation permettant de reproduire la phase de démarrage des véhicules apparaît comme une voie possible à la fois pour limiter le nombre d'essais mais aussi pour savoir justifier les choix techniques dans la conception de la chaîne de démarrage le plus tôt possible dans le cycle de développement des véhicules. Un tel outil de simulation nécessite la construction de modèles spécifiques, qui ont été développés conjointement par les experts en électrotechnique, en mécanique et en calcul scientifique de Renault. Ce papier vise à donner les quelques grands principes qui ont été retenus pour développer un outil de simulation du démarrage à froid, aujourd'hui systématiquement utilisé dans tous nos projets véhicules.

2 Environnement de simulation

La simulation du démarrage à froid des véhicules repose sur une mise en équation de tous les éléments du système : batterie, câblage, démarreur, moteur. Le codage des équations nécessite de choisir un environnement de simulation permettant une approche multi-physique. Les résultats présentés dans ce papier ont été obtenus en codant les équations dans l'environnement Matlab-Simulink, mais d'autres environnements sont tout à fait envisageables (par exemple : Amesim, SImplorer, Saber, ...).

Pour être exacts, précisons que le codage des modèles fait appel à une bibliothèque spécifique développée par le « PUCE Calcul » de Renault, Pôle Unique de Compétences en Electronique, commun à la Direction de l'Electronique Avancée et à la Direction de l'Ingénierie Electrique et des Systèmes Electroniques. Cette bibliothèque comprend tout un ensemble de composants multiphysiques et repose aussi sur une logique de définition des entrées/sorties et une logique de connexion compatibles avec la mise en équations des circuits électriques.

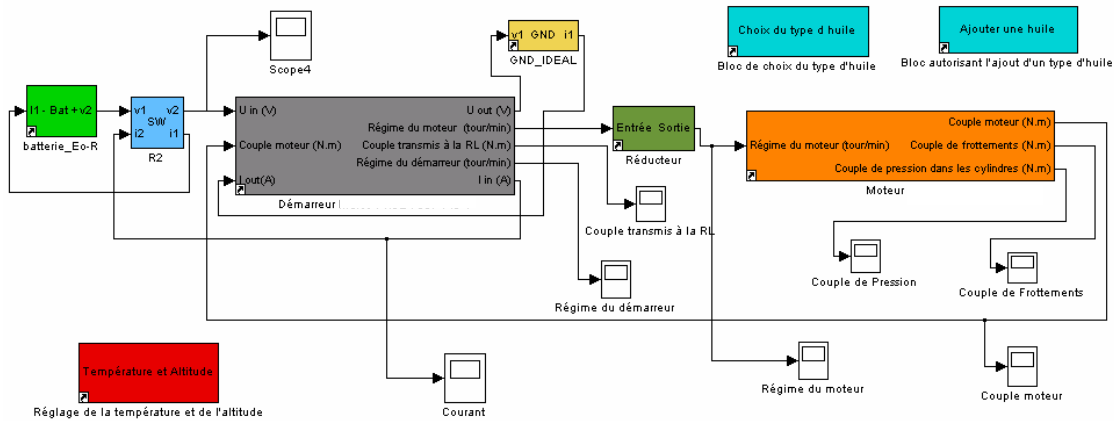


Figure 1 : exemple d'interface Matlab-Simulink reposant sur des composants de la « Renault Electrical and Multiphysics Toolbox »

Bien-sûr, derrière chaque boîte se cachent d'une part une interface utilisateur permettant de saisir les données d'entrée du cas considéré, et d'autre part une complexe mise en équation reposant en partie sur des composants standard de Simulink, en partie sur des S-fonctions codées en C.

3 Modèles

3.1 Batterie

Modéliser le comportement d'une batterie peut vite s'avérer un véritable casse-tête si l'on cherche à traduire l'ensemble des réactions électrochimiques. En effet, aux transitoires électriques rapides de cette source de tension s'ajoutent des phénomènes plus lents liés à la charge ou à la décharge de ce réservoir d'énergie. Heureusement, la nature brève de la phase de démarrage permet de simplifier l'approche de la modélisation en ne s'intéressant qu'aux transitoires électriques rapides. On considère en effet que l'énergie prélevée pendant la phase de démarrage est négligeable devant l'énergie totale stockée dans la batterie. Le modèle qui en résulte est un modèle simplifié d'une source de tension imparfaite, traduit par l'équation suivante :

$$U_{bat} = E_0 - Ri$$

avec :

- U_{bat} : tension aux bornes de la batterie
- i : courant débité par la batterie
- R : résistance interne de la batterie
- E_0 : fem de la batterie

E_0 et R sont deux variables qui caractérisent la batterie. Elles dépendent de la température, de l'état de charge de la batterie et de son vieillissement.

Cette équation est une approximation acceptable pour des courants importants sur des périodes courtes, ce qui correspond bien aux conditions du démarrage.

En traçant la tension batterie en fonction du courant pendant un essai de démarrage, on vérifie d'ailleurs la pertinence de ces hypothèses :

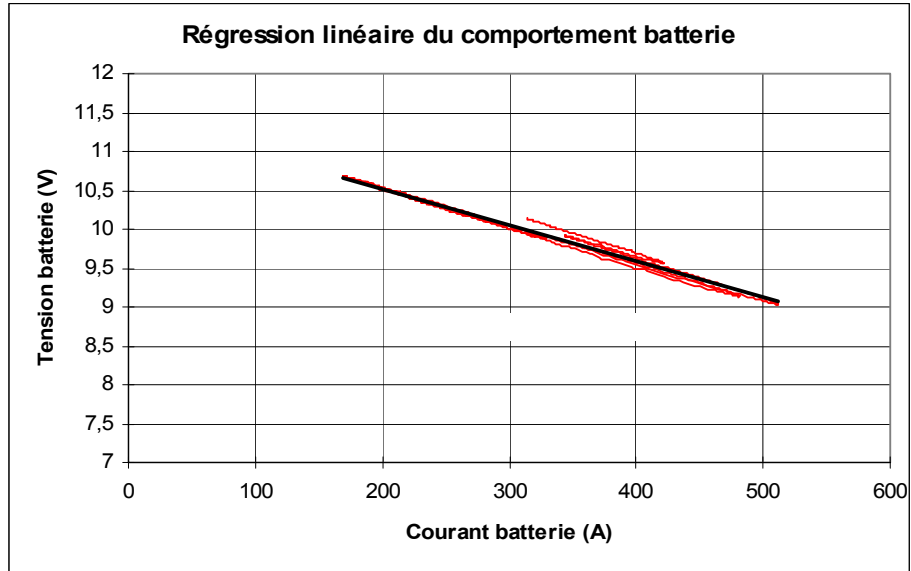


Figure 2 : courant en fonction de la tension au cours d'un démarrage donné (en rouge : mesure / en noir : linéarisation)

3.2 Démarreur

Le modèle de démarreur a été développé par Renault en collaboration avec un équipementier fournisseur de démarreurs. Ce modèle est valable pour tout type de démarreur 12V (avec inducteur à aimants ou inducteur bobiné). Cependant, la modélisation thermique étant très simplifiée et l'hypothèse principale étant l'absence de diffusion de la chaleur au sein de la machine, le domaine de validité du modèle n'excède pas quelques secondes de fonctionnement. Les simulations de la phase de démarrage ne pourront donc pas dépasser ces quelques secondes, mais cela ne pose pas de problèmes car un régime oscillatoire permanent est atteint avant que ne soit atteinte la limite de validité du modèle.

Un démarreur associe une machine électrique à courant continu (rotor + stator), un système d'interrupteur électromécanique (appelé communément le solénoïde) commandé par un relais lui-même piloté par un des calculateurs du véhicule et enfin un système de roue libre permettant au pignon du démarreur de se désolidariser du moteur électrique lorsque le moteur thermique démarre. Le modèle développé permet d'appréhender les aspects thermiques, électriques et mécaniques de la machine.

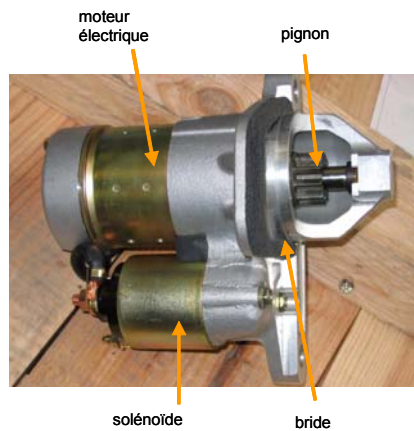


Figure 3 : photo d'un démarreur

3.3 Moteur

Le modèle de moteur thermique a été développé par Renault. Le moteur thermique est représenté dans un mode hors combustion. Le modèle calcule des grandeurs thermodynamiques (température, pressions et débit d'air dans les cylindres), des grandeurs mécaniques (forces s'exerçant sur les pistons et le vilebrequin) et cinétiques (régime moteur) lors de son entraînement par un dispositif externe.

Ce modèle est valable pour des faibles régimes allant de 0 à 400 tours/min environ. En revanche, il est valable pour une large plage de température ambiante : de -30 à 90°C.

Le temps de fonctionnement du moteur ne doit pas dépasser quelques secondes, pour que l'huile reste à iso température. En effet, l'échauffement de l'huile n'est pas pris en compte dans le modèle. Sans entrer dans les détails, décrivons les principes généraux mis en œuvre.

Aspect mécanique

Il se résume à un bilan des forces s'exerçant sur le vilebrequin. Trois couples sont à prendre en compte :

- C_e , le couple résultant du système d'entraînement

- C_f , le couple résultant de toutes les forces de frottement du moteur ; il est très difficile de décrire ce couple instantané en fonction du temps à l'aide d'une simple formule et toute la complexité du modèle provient du calcul de ces forces de frottement. En effet, de nombreux phénomènes entrent en jeu : frottements visqueux piston/chambre, frottements aux soupapes, frottements dus à la charge du vilebrequin, frottements auxiliaires dus à la pompe à eau, pompe à huile, etc.

- C_g , le couple de détente compression des gaz à l'intérieur des cylindres

L'équation mécanique se réduit à une simple équation de la dynamique :

$$J \cdot \frac{d\Omega}{dt} = C_e + C_g - C_f$$

- Ω est la vitesse instantanée du vilebrequin.
- J est l'inertie "moyenne" du moteur (vilebrequin+volant+mécanisme d'embrayage) et des systèmes oscillants (pistons, bielles), supposée constante.

Calcul du couple de détente compression C_g

Si on note θ l'angle de rotation du vilebrequin par rapport à la verticale du cylindre, V_{cyl} le volume de cylindre occupé par l'air, P_{cyl} et P_{atm} les pressions d'air dans le cylindre et dans le carter, le couple de compression s'exprime de façon instantanée par :

$$C_{cyl}(\theta) = -(P_{cyl} - P_{atm}) \cdot \frac{dV_{cyl}}{d\theta}$$

Pour connaître P_{cyl} , il est nécessaire de faire une étude thermodynamique du cylindre.

Le couple de compression global C_g est alors la somme des forces de pression de chaque cylindre moteur sur le vilebrequin.

Calcul des couples de frottements C_f

La modélisation du frottement se décompose en trois parties :

- Frottement des pistons sur les parois des cylindres
- Frottement dans les paliers au niveau des bielles et du vilebrequin
- Frottements des auxiliaires (pompes, alternateur) et des soupapes modélisé simplement par

$$C_r = \alpha \cdot \mu(T_{ext}) \cdot \Omega$$

avec : $\mu(T_{ext})$ viscosité de l'huile et Ω vitesse du moteur.

Le coefficient α est à paramétrer pour chaque moteur. Il constitue l'unique paramètre à identifier pour le modèle de couple de friction mécanique.

Dans les trois parties qui composent le couple de friction, la part de la viscosité de l'huile μ (qui varie de façon exponentielle quand la température diminue) joue un rôle prédominant.

Aspect thermodynamique

Le but est de calculer la température et la pression dans le cylindre. Ces données sont nécessaires pour évaluer le couple résistant dû aux forces de pression compression s'exerçant sur le vilebrequin. On considère pour cela l'air comme un gaz parfait, ce qui se vérifie pendant toute la phase de non-combustion. Cela permet d'écrire :

$$P_{cyl} \cdot V_{cyl} = M_{cyl} \cdot r \cdot T_{cyl}$$

La première loi de la thermodynamique nous fournit une relation supplémentaire entre les variables thermodynamiques. Elle s'exprime comme suit pour le système constitué de l'« Air contenu dans le cylindre » :

$$dU = \delta Q + \delta W + D_{adm} \cdot h_{adm} + D_{ech} \cdot h_{ech}$$

avec:

- dU la variation d'énergie interne massique du gaz
- δQ la chaleur reçue par le gaz
- δW le travail des forces de pression reçue par le gaz
- h_{adm} et h_{ech} l'enthalpie massique du gaz à l'admission et à l'échappement

Chacune de ces quantités peut s'exprimer facilement dans le cas d'un gaz parfait. Le calcul de la quantité de chaleur reçue est un peu plus délicat. On suppose que la chaleur reçue est due à la convection entre la paroi et le gaz. On a donc de façon approchée :

$$\frac{\delta Q}{\delta t} = h \cdot S_h \cdot (T_{ext} - T_{cyl})$$

avec S_h la surface d'échange entre la paroi contenant le gaz et l'extérieur

Pour le coefficient d'échange thermique h , on peut par exemple utiliser une formulation du type (Woschni) :

$$h = C_0 \cdot P_{cyl}^{0.8} \cdot T_{cyl}^{-0.53} \cdot V_{moy}^{-0.8}$$

avec C_0 un coefficient de calibration que l'on peut ajuster en fonction du moteur modélisé.

L'équation thermodynamique se réécrit alors entièrement, et on en déduit une équation différentielle sur la pression dans le cylindre.

Le modèle est alors complet.

4 Résultats

Les différents modèles ayant été validés séparément, il est possible de les associer afin de simuler la chaîne complète de démarrage pour les applications qui nous intéressent. Les grandeurs particulièrement observées sont le régime moteur, nécessaire pour permettre le démarrage et la tension batterie, pour s'assurer du bon fonctionnement du réseau de bord.

Voici un exemple de résultat pour un moteur diesel à très basse température :

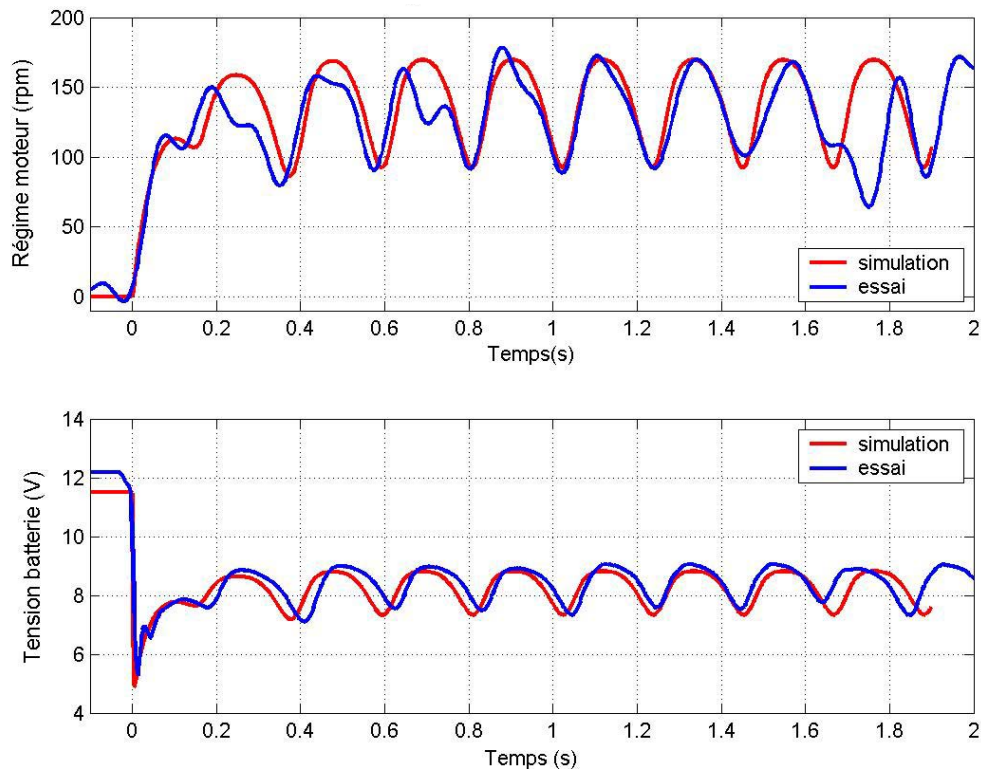


Figure 4 : exemple de démarrage à froid d'un moteur diesel

Les courbes simulées se superposent de façon très satisfaisante avec les courbes expérimentales. On peut en particulier observer le creux de tension juste après la mise sous tension du démarreur, due à un fort appel de courant ainsi que les oscillations de tension dues aux variations de pression (donc de couple) en phase de rotation. Rappelons ici que ces courbes décrivent ce qui se passe avant la phase de combustion.

5 Conclusion

L'outil présenté permet de simuler de façon très réaliste le démarrage à froid de nos véhicules. Il contribue à limiter le nombre d'essais physiques, à mieux les orienter et aussi à anticiper, dans le cycle de développement des véhicules, les dimensionnements d'organes importants pour l'architecture électrique du véhicule (batterie, câblage, démarreur).

Bien sûr, il n'est pas question encore d'abandonner tout essai physique, et les campagnes de mesures restent indispensables pour continuer à valider nos modèles, pour chaque nouveau moteur ou pour toute nouvelle architecture électrique. Toutefois, il est clair que le modèle numérique, correctement validé par quelques points expérimentaux bien choisis, permet de mieux maîtriser l'impact des multiples paramètres à prendre en compte, tels que la température, le rapport d'entraînement du démarreur, etc.

Il faut également noter que cette démarche de modélisation contribue également à mieux comprendre tous les phénomènes physiques, et donc à mieux maîtriser l'optimisation de nos systèmes électriques et électroniques. C'est aussi une façon de capitaliser le savoir.

Aujourd'hui, la simulation du démarrage à froid fait partie de nos processus de développement et les jalons calcul existent au même titre que les jalons liés aux prototypes physiques.