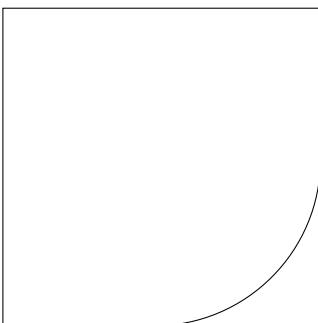


ENSTA Bretagne
2, rue François Verny
29806 BREST cedex
FRANCE
Tel +33 (0)2 98 34 88 00
www.ensta-bretagne.fr



Rapport projet
FISE 2026
18 juin 2024



Boite de vitesse robotisée



Elise BOUFFARTIGUE, Jules DESCAMPS, Solène GRAPPEIN, Victor HÉLIES

Table des matières

Introduction	3
1 Présentation de la boîte de vitesse étudiée et du véhicule associé	4
1.1 La boîte de vitesse	4
1.2 Le véhicule	4
2 L'influence de la boîte de vitesse	5
2.1 L'influence de la boîte de vitesse sur les performances du véhicule	5
2.1.1 La vitesse maximale	5
2.1.2 Le temps de 0 à 100 km/h	6
2.1.3 Le démarrage en côte	8
2.2 L'influence de la boîte de vitesse sur la consommation du véhicule	9
3 Notre solution pour robotiser la boîte	11
3.1 Prise en main de la maquette	11
3.1.1 Présentation de la maquette	11
3.1.2 Prise en main du système	11
3.2 Robotisation de la maquette	12
3.2.1 Modification de la boîte de vitesses	12
3.2.2 Fonctionnement de la robotisation	12
Conclusion	14
Bibliographie	15



Introduction

Une boîte de vitesses est un dispositif mécanique, souvent mécatronique sur les véhicules récents, permettant d'adapter la transmission d'un mouvement entre un arbre moteur et un arbre récepteur. Dans le véhicule, le moteur thermique tourne sur une plage de vitesse et de couple limités. Le rendement maximal du moteur correspond d'ailleurs à un certain régime. Il s'agit donc de faire tourner le moteur à ce régime le plus souvent possible. Pour cela, on utilise la boîte de vitesses pour pouvoir garder un régime moteur proche de celui cité précédemment lorsqu'on fait varier la vitesse du véhicule. Il existe plusieurs types de boîtes de vitesses, mais nous allons nous intéresser en particulier aux boîtes de vitesses robotisées. Ces boîtes de vitesses sont dotées d'un embrayage piloté électroniquement, donc embrayent et débrayent à la place du conducteur. Elles permettent de passer à tout instant d'un fonctionnement manuel à un fonctionnement automatique même lorsque le véhicule est en train de rouler. Ce type de boîte de vitesses entraîne la suppression de la pédale d'embrayage, et une modification du levier de vitesse.

Pour bien mettre en avant l'utilité d'une boîte de vitesse, nous avons réalisé son analyse fonctionnelle et avons choisi de la représenter par le schéma suivant :

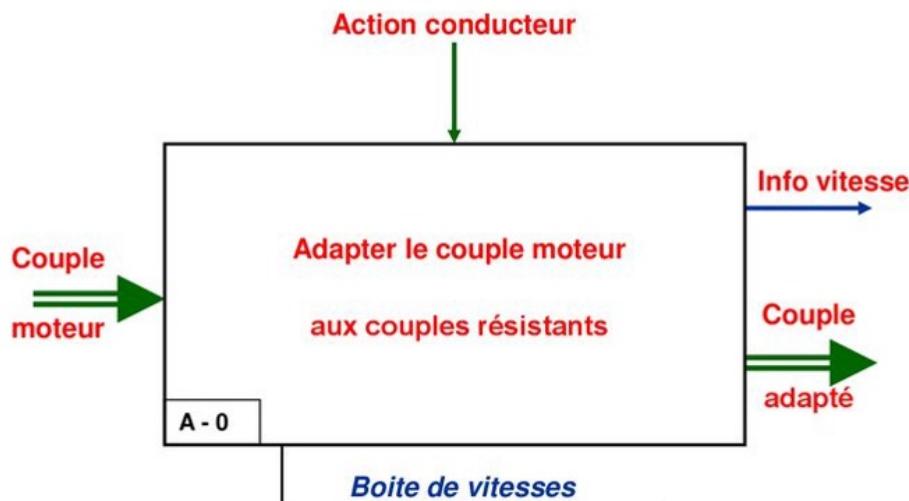


FIGURE 1 – Schéma fonctionnel.
Source : <https://slideplayer.fr/slide/16657821/>

Le but de cette étude est de robotiser la boîte de vitesse de la BMW série 1 120D (modèle de 2007). Nous allons tenter de déterminer quel est l'intérêt de cette boîte de vitesse pour ce véhicule, et nous allons également analyser quels sont les facteurs impactés par la boîte de vitesses.



1 Présentation de la boîte de vitesse étudiée et du véhicule associé

1.1 La boîte de vitesse

Nous nous sommes tout d'abord penchés sur l'analyse de la boîte de vitesse mise à disposition. Nous avons compté plusieurs fois le nombre de dents des différents engrenages composant la boîte de vitesse. Nous avons donc pu élaborer le schéma suivant :

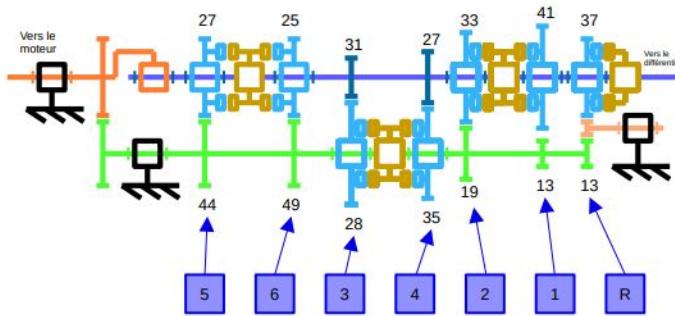


FIGURE 2 – Boîte de vitesse BMW Série 1 120D

Nous avons obtenu les rapports de réduction suivants :

Rapport de vitesse	1 ^{ère}	2 ^{ème}	3 ^{ème}	4 ^{ème}	5 ^{ème}	6 ^{ème}
Valeur du rapport	3,15	1,73	1,1	0,77	0,61	0,51

TABLE 1 – Rapports de réduction du moteur d'une BMW Série 1 120D - Comptées par nous-mêmes

Nous avons donc des valeurs différentes des données constructeurs fournies dans le tableau suivant :

Rapport de vitesse	1 ^{ère}	2 ^{ème}	3 ^{ème}	4 ^{ème}	5 ^{ème}	6 ^{ème}
Valeur du rapport	4	2,11	1,38	1	0,78	0,65

TABLE 2 – Rapports de réduction du moteur d'une BMW Série 1 120D - Données constructeur

Cela s'explique par le fait que nous n'avions pas accès à un étage de roues dentées situé contre le carter. En prenant la moyenne du rapport $\frac{Rapport_{constructeur}}{Rapport_{compté}}$ nous obtenons que l'étage auquel nous n'avions pas accès est un réducteur de 1,26. Nous n'avons donc pas fait apparaître le nombre de dents sur la figure 2 puisque nous n'en connaissons pas la valeur, mais leur rapport devrait donc donner 1,26. Cet étage permet d'engrerer l'arbre d'entrée avec l'arbre de sortie.

1.2 Le véhicule

Nous nous sommes également intéressés aux différentes caractéristiques techniques de notre véhicule, via une comparaison entre différentes fiches techniques. Voilà quelques données techniques qui nous ont servi pour la suite de l'étude :

- Masse à vide de la voiture : $M = 1370 \text{ kg}$
- Coefficient de résistance au roulement : $\delta = 10 \text{ N/tonne}$



- Puissance du moteur : $P = 177 \text{ CV}$ soit 132 kW
- Coefficient de traînée de la voiture : $C_x = 0,3$
- Rendement de transmission du moteur : $\eta_{\text{trans}} = 0,9$



FIGURE 3 –
 Dimensions de la BMW série 1 120D.

Source : <https://fr.automobiledimension.com/dimensions-voitures-bmw.html>

2 L'influence de la boîte de vitesse

2.1 L'influence de la boîte de vitesse sur les performances du véhicule

Nous avons étudié l'influence de la boîte de vitesse sur différentes performances du véhicule. Nous nous sommes rendus compte que la boîte de vitesse pouvait agir sur des caractéristiques telles que la vitesse maximale du véhicule, le temps pour passer de 0 à 100 km/h ou encore le temps d'embrayage lors d'un démarrage en côte. Nous allons dans la suite détailler nos approches pour calculer ces différents critères avec notre boîte de vitesse.

2.1.1 La vitesse maximale

Afin de déterminer la vitesse maximale atteignable par notre voiture, il est nécessaire de résoudre l'équation différentielle suivante :

$$\frac{1}{2} * \rho * S * C_x * V^3 + (\delta * M + M * g * \sin(\alpha)) * V = \eta_{\text{trans}} * C_{\text{moteur}} * \omega_{\text{moteur}}$$

où ρ représente la densité de l'air, S la surface projetée de la voiture, C_x le coefficient de traînée de la voiture, V la vitesse, δ le coefficient de résistance au roulement, M la masse de la voiture, g l'accélération de la pesanteur, η_{trans} le rendement de transmission, C_{moteur} le couple moteur et ω_{moteur} le régime moteur.

Nous avons résolu cette équation grâce à un programme informatique utilisant la bibliothèque *sympy*, utilisée pour ce type de calculs. Nous avons obtenu une vitesse maximale de 236 km/h, obtenue en 6ème vitesse. Nous avons pu comparer cette vitesse obtenue avec la vitesse maximale donnée dans



la fiche technique du constructeur : Il y est écrit que la vitesse maximale d'une BMW Série 1 120D modèle de 2007 équipée de cette boîte de vitesse est de 228 km/h.

Nous retrouvons bien une vitesse proche de la vitesse indiquée par le constructeur, et la légère différence de vitesse peut s'expliquer par différentes hypothèses que nous n'avons pas prises en compte dans nos calculs.

2.1.2 Le temps de 0 à 100 km/h

Nous avons ensuite étudié l'influence de notre boîte de vitesse sur le temps que met la voiture pour atteindre 100 km/h, à nouveau à l'aide d'un programme informatique. Nous nous sommes appuyés sur la figure 4, qui reprend les valeurs des puissances et des couples moteurs (P_{moteur} , C_{moteur}) pour différentes configurations du moteur, en fonction de la vitesse de rotation du moteur ω_{moteur} .

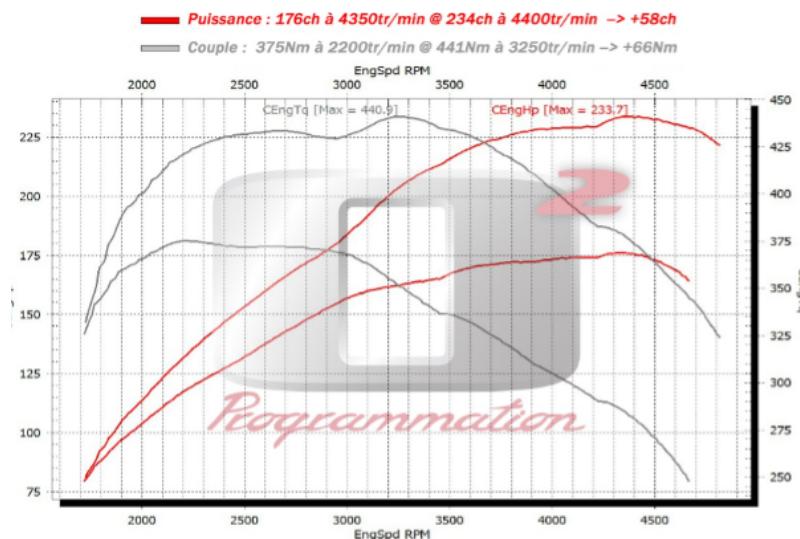


FIGURE 4 – P_{moteur} et C_{moteur} en fonction de ω_{moteur} .

Notre moteur est celui de 176 ch, soit la courbe rouge du bas pour la puissance et la courbe grise du bas pour le couple.

Nous avons commencé par recréer la courbe du couple en fonction du régime moteur. Ces données nous étaient essentielles pour récupérer les différentes valeurs de couple et de régime moteur. Nous avons donc modélisé cette courbe à l'aide d'approximations de droites dont nous avons relevé les coefficients directeurs directement sur le graphique de la figure 4. Nous avons obtenu le résultat affiché figure 5.

A partir de ces valeurs, nous avons pu réaliser un programme python déterminant le temps pour passer de 0 à 100 km/h. Le fonctionnement du programme est le suivant :

- Le pilote accélère et quand le régime moteur arrive à un certain seuil (que nous avons fixé à 4300 tours/minute), il change de vitesse. Pour illustrer cela, nous avons tracé le régime moteur en entrée de boîte en fonction du temps sur la figure 6.
- Le pilote met un certain temps pour changer de vitesse : nous avons fixé ce temps à 1 seconde.
- Enfin nous avons pu récupérer la vitesse de la voiture au cours du temps, ce qui nous a permis de trouver le temps pour passer de 0 à 100 km/h, comme le montre la figure 7.



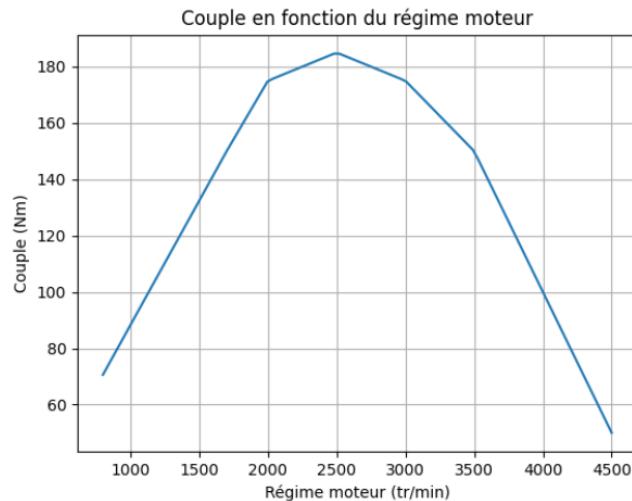


FIGURE 5 – Couple du moteur en fonction du régime moteur

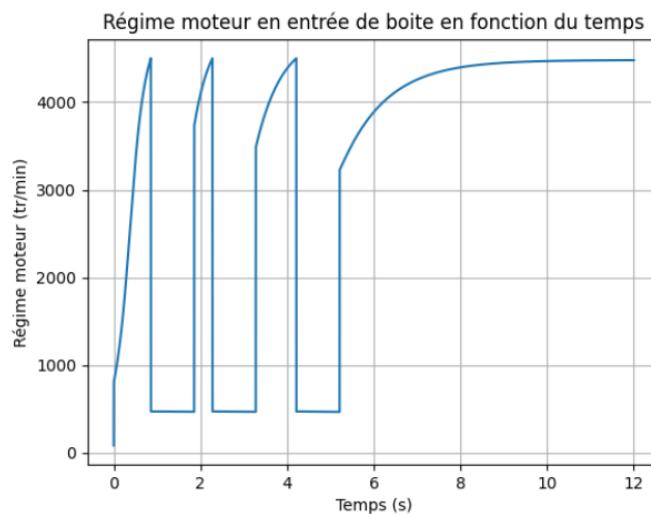


FIGURE 6 – Régime moteur en fonction du temps

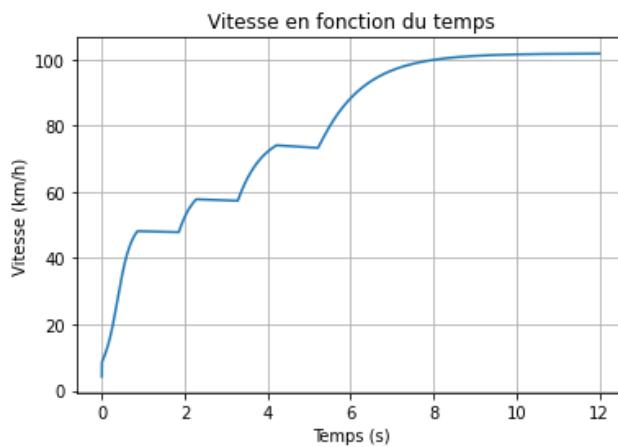


FIGURE 7 – Vitesse du véhicule en fonction du temps



Nous voyons donc que le véhicule est capable d'atteindre 100 km/h dès le 4^{ème} rapport de vitesses, et ce en 8 secondes. La fiche technique indiquait 7.5 secondes, ce qui est très proche du résultat que nous avons trouvé. Le résultat n'est pas exact dû aux approximations que nous avons faites (les approximations linéaires pour la courbe du couple moteur ou encore le temps de passage des vitesses par le pilote).

2.1.3 Le démarrage en côte

Nous avons ensuite étudié l'influence de notre boîte de vitesses sur le temps de démarrage en côte de la voiture. Nous nous sommes placés en première et nous avons choisi une pente à 50%, ce qui représente une pente très forte de 22.5°. Nous calculons donc le temps de démarrage avec ces paramètres. Ce temps correspond au moment où la vitesse de rotation du moteur est égale à une vitesse de rotation donnée par l'équation suivante.

$$\omega_{\text{démarrage}} = \frac{\omega_{\text{max}} + \omega_{\text{ralenti}}}{2}$$

L'évolution de la vitesse de rotation du moteur est régie par l'équation suivante.

$$(M * R_{\text{roue}} * k_{\text{diff}} * k_{\text{bdv}}) * \frac{d\omega}{dt} = -\frac{1}{2} * \rho * S * C_x * (R_{\text{roue}} * k_{\text{diff}} * k_{\text{bdv}} * \omega)^2 - M * \delta - M * g * \sin(\alpha) + \frac{\eta_{\text{trans}} * \frac{2}{3} * C_{\text{max}}}{R_{\text{roue}} * k_{\text{diff}} * k_{\text{bdv}}}$$

En traçant les deux vitesses de rotation sur un même graphique grâce à un programme python, on obtient les courbes suivantes.

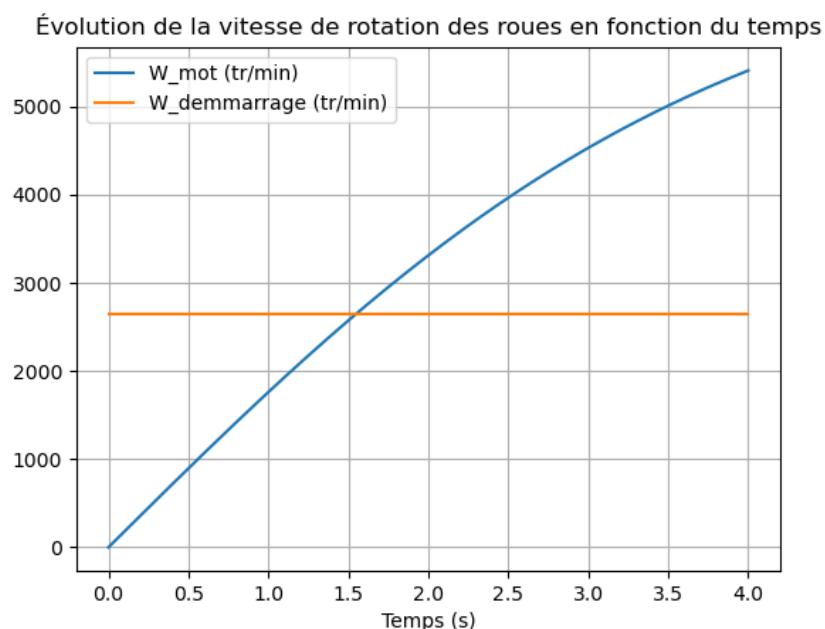


FIGURE 8 – Évolution de la vitesse du moteur en fonction du temps



Le point de croisement des deux courbes correspond donc au temps de démarrage en côte. Il est égal à environ 1,5s. Ce temps semble cohérent puisqu'il faut une puissance élevée pour commencer à faire bouger notre véhicule qui plus ait avec une telle pente.

Dans ce cas, l'utilité de robotiser la boîte se trouve dans la consommation. En effet la première vitesse peut être enclenchée dès que le moteur atteint la bonne vitesse de rotation contrairement à une boîte manuelle où le conducteur va avoir tendance à accélérer plus que nécessaire par peur de reculer au démarrage.

2.2 L'influence de la boîte de vitesse sur la consommation du véhicule

La boîte de vitesse influe également sur la consommation du véhicule. Pour illustrer cela, nous avons déterminé la consommation et les émissions en CO₂ de notre véhicule sur un cycle WLTP prédéfini.

Nous avons premièrement défini la Pression Moyenne Effective de notre véhicule à l'aide de la formule suivante :

$$PME = 1200 * \frac{P(kW)}{N(tr.\min^{-1}) * cyl(l)}$$

avec P la puissance en kW, N le régime moteur en tr/min et cyl la cylindrée du moteur qui est égale à 2 pour notre véhicule. Notre véhicule a une PME qui monte jusqu'à 24, c'est à dire que sa pression moyenne effective peut aller jusqu'à 24 bars, ce qui est signe d'une haute performance de notre moteur.

Grâce à cette PME, nous avons pu tracer les points de fonctionnement sur la cartographie moteur. Nous avons tracé ces points dans deux cas différents : le cas dans lequel aucune vitesse n'est passée (figure 8 à gauche), et le cas dans lequel les vitesses sont passées (figure 8 à droite). Nous voyons donc que le passage de vitesse est très important pour minimiser la consommation du véhicule : en effet, les points de fonctionnement doivent se situer le plus possible dans la "zone bleue", qui est la zone où le véhicule consomme moins, et ce pour les plus basses valeurs de rotation moteur ω_{moteur} .

On peut donc voir sur la figure que les changements de vitesse ont un grand impact sur la consommation du véhicule, et il est donc important d'optimiser le moment où la vitesse doit être changée pour minimiser la consommation, puisque cela permet de délivrer un couple C_{moteur} plus important pour une vitesse de rotation ω_{moteur} moins importante.

Dans un programme python, nous déterminons les différentes valeurs des rapports de réduction, puis nous calculons une à une les vitesses de rotations ω_{moteur} associées, en vérifiant que si la valeur précédente est inférieure (resp. supérieure) à un paramètre ω_{min} (resp. ω_{max}) et que le rapport est supérieur à 1 (resp. inférieur à 6) alors on rétrograde (resp. on passe la vitesse) puis on recalcule les nouvelles valeurs de ω_{moteur} .

Ensuite, on crée un meshgrid avec différentes valeurs de ω_{min} et de ω_{max} , chacun avec un pas de 100 tr.min⁻¹ afin de calculer la consommation en kg de diesel. Toutes les valeurs sont stockées dans une matrice dans laquelle on vient chercher les indices de ligne et de colonne qui correspondent à la valeur de consommation minimale de la matrice.



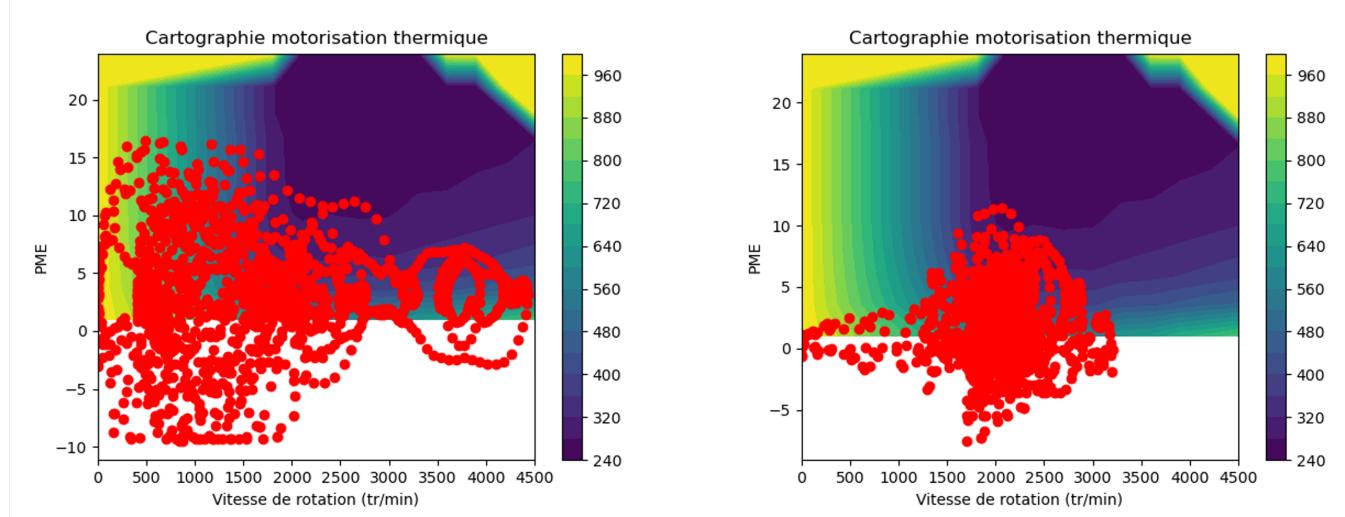


FIGURE 9 –

Points de fonctionnement sur la cartographie moteur, sans passage de vitesses (gauche) et avec changement de vitesses (droite)

On obtient donc des valeurs optimales de passage de vitesses pour les régimes moteur suivants : on rétrograde pour un régime inférieur à $\omega_{\min} = 1700 \text{ tr} \cdot \text{min}^{-1}$, et on passe à un rapport de vitesses supérieur pour un régime moteur supérieur à $\omega_{\max} = 2400 \text{ tr} \cdot \text{min}^{-1}$. Avec ces valeurs, notre véhicule consomme 7,81 L/100 km.

Nous avons ensuite réalisé la même étude à l'aide de la fonctionnalité simulink sur le logiciel Matlab afin de comparer nos résultats avec une méthode de calcul similaire (toutes les données sont les mêmes), mais avec un logiciel différent. Cela suffit à expliquer les différences entre les résultats.

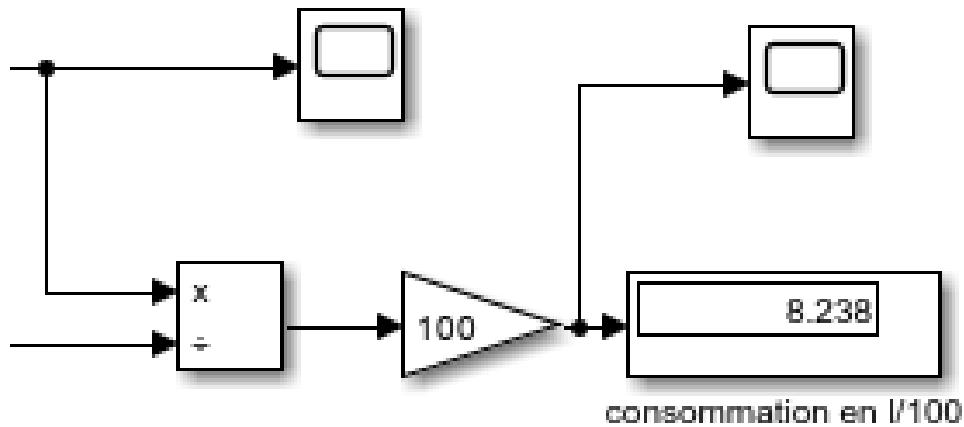


FIGURE 10 –
Consommation du véhicule avec la simulation MATLAB

3 Notre solution pour robotiser la boîte

Le but de cette partie est de robotiser la boîte de vitesses à notre disposition. A l'aide de deux servomoteurs, nous devons modifier une partie de la maquette afin de pouvoir automatiser le passage des vitesses. Pour cela, nous disposons d'une maquette de boîte manuelle modifiable à notre guise à l'aide de nouvelles pièces conçues à l'aide d'un logiciel de CAO (en l'occurrence, nous avons utilisé le logiciel Onshape).

3.1 Prise en main de la maquette

Dans cette partie, il s'agit dans un premier temps de prendre en main la maquette de boîte de vitesse qui est mise à notre disposition, de comprendre comment fonctionnent les actionneurs et d'être en mesure de savoir les piloter afin de pouvoir les intégrer dans la boîte de vitesse, et de les piloter grâce à un programme que nous aurions conçu nous-mêmes, *via* Arduino.

3.1.1 Présentation de la maquette

Nous disposons d'une maquette composée de 3 rapports de vitesses et d'un rapport pour la marche arrière.

Les valeurs de différents rapports sont les suivantes:

- rapport 1 : $R1 = 12/29$
- rapport 2 : $R2 = 15/26$
- rapport 3 : $R3 = 23/19$
- marche arrière : $12/24$

3.1.2 Prise en main du système

Nous allons utiliser le MCC (moteur à courant continu) de la maquette de boîte de vitesses. On pourra le commander grâce à une broche PWM (*Pulse Width Modulation*, modulation de largeur d'impulsion, ici la broche 3) de la carte Arduino.

On récupère la valeur de la broche PWM que l'on change d'échelle (on passe d'une valeur codée sur 10 bits à une valeur codée sur 8 bits). Ensuite il suffit d'implémenter la nouvelle valeur dans le moteur pour qu'il tourne à la vitesse voulue.

Pour commander la boîte de vitesse, nous disposons de deux servomoteurs. En Arduino, il faut effectuer les actions suivantes pour faire bouger un servomoteur à l'aide d'un potentiomètre.

On initialise le servomoteur grâce à la bibliothèque *MyServo*, on récupère la valeur du potentiomètre que l'on met à l'échelle 0-180°. On a ensuite plus qu'à implémenter cette valeur dans le servomoteur.

En associant ces deux systèmes, nous allons pouvoir automatiser le passage des vitesses en fonction



de la vitesse du moteur. Ainsi la vitesse du moteur sera piloté en fonction du potentiomètre et les servomoteurs seront pilotés en fonction de la vitesse du moteur.

3.2 Robotisation de la maquette

3.2.1 Modification de la boîte de vitesses

Pour pouvoir robotiser la boîte, nous avons retiré les éléments reliés au levier de vitesse. Nous l'avons remplacé par un système avec des bielles qui font l'intermédiaire entre les servomoteurs et les tiges permettant de bouger les crabots et donc d'enclencher les vitesses. Les servomoteurs actionnent des bielles qui feront bouger les tiges de la boîte de vitesse.

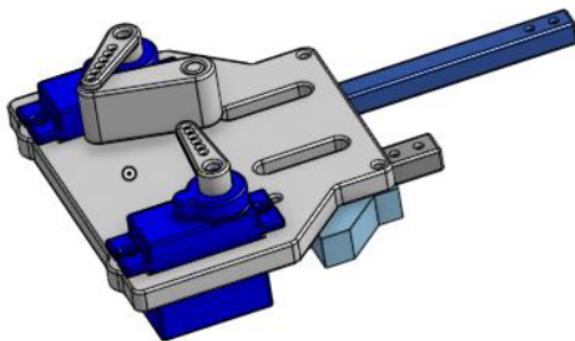


FIGURE 11 – Maquette CAO de notre modification de la boîte de vitesses

Chaque servomoteur possède 3 positions différentes pour pouvoir enclencher les deux rapports associés au crabot et avoir une position neutre où le crabot n'est relié à aucune vitesse. La position neutre sera considérée comme un angle nul pour chaque servomoteur. On peut ensuite enclencher un rapport en mettant la position d'un des deux servomoteurs à $+/- 45^\circ$. Il est positif lorsque la tige doit avancer et négatif lorsqu'elle doit reculer. En implémentant cette valeur, nous avons vu qu'elle était trop grande, le servomoteur continuait de vouloir tourner même s'il était arrivé à une position butoir. Nous avons donc réduit cet angle à 30° pour que la rotation du servomoteur soit juste suffisante pour enclencher la vitesse.

On a alors les couples d'angles (servo1, servo2) suivants :

- neutre : $(0^\circ, 0^\circ)$
- rapport 1 : $(30^\circ, 0^\circ)$
- rapport 2 : $(-30^\circ, 0^\circ)$
- rapport 3 : $(0^\circ, -30^\circ)$
- marche arrière : $(0^\circ, 30^\circ)$

3.2.2 Fonctionnement de la robotisation

On peut désormais commander la boîte de vitesse grâce aux fonctions de commande du MCC et des servomoteurs vues précédemment. On peut commander la sortie en vitesse grâce au potentiomètre.



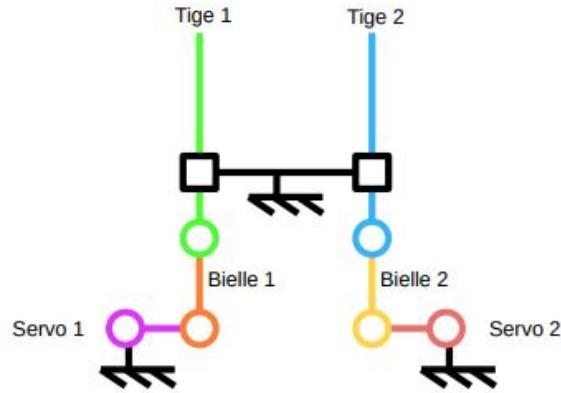


FIGURE 12 – Schéma cinématique de la maquette CAO

Le résultat attendu est imaginé dans la figure 12. Pour cela, on va devoir commander la MCC selon la figure 13 :

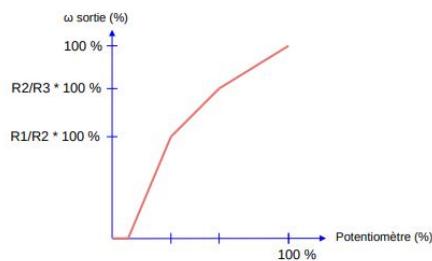


FIGURE 13 – Vitesse en sortie de boîte

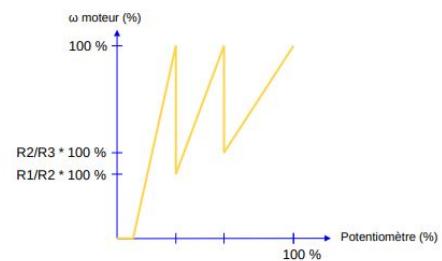


FIGURE 14 – Vitesse en entrée de boîte

On divise en 3 la plage de travail du potentiomètre : de 0% à 33%, de 34% à 66% et de 67% à 100%. Le potentiomètre commence à 0%, le moteur ne tourne alors pas et la boîte est au point mort. Quand on commence à tourner le potentiomètre, le premier rapport s'enclenche et la vitesse du moteur est proportionnelle à l'angle du potentiomètre sur la première plage. Quand le potentiomètre atteint 33%, la vitesse du moteur est à 100%. Quand il dépasse 33%, on passe au rapport suivant et on ajuste la vitesse du moteur pour que la vitesse de sortie ne soit pas modifiée. La nouvelle vitesse du moteur est alors à $\frac{R_1}{R_2} * 100\%$. On applique les mêmes procédés pour les rapports R2 et R3.

Conclusion

Pour conclure, l'étude de la boîte de vitesse de la BMW Série 1 120D nous a permis de mesurer l'impact de la boîte de vitesse sur les performances ainsi que la consommation du véhicule, à travers l'étude de la vitesse maximale atteignable, du temps pour passer de 0 à 100km/h ou encore le temps d'embrayage pour un démarrage en côte. Une optimisation des passages de vitesses permet notamment de minimiser la consommation de notre véhicule.

Pour implémenter ce système sur une boîte réelle, il serait nécessaire de concevoir des pièces adaptées. Il faut aussi prendre en compte un nombre de rapports plus importants, ce qui nécessite plus d'actionneurs. Cette implémentation devra prendre en compte les vitesses de rotation obtenues à l'issue de l'étude du cycle WLTP. D'autre part, des capteurs permettant de mesurer la vitesse de rotation de l'arbre d'entrée et de l'arbre de sortie seront utiles pour déterminer quand passer les rapports. Enfin, il faudra robotiser l'embrayage de la voiture pour le confort de l'utilisateur. En effet, il est impensable que la voiture donne intempestivement l'ordre de débrayer et rembrayer au conducteur.



Références

