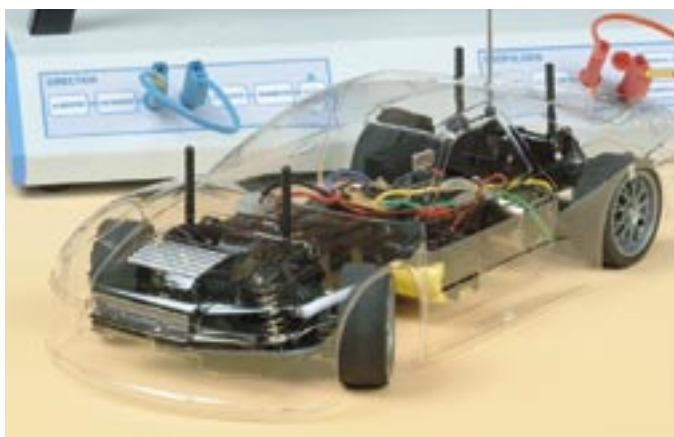


Les dessous de Tamiya TL-01

PHILIPPE LAI¹

Le numéro 131 de Technologie (avril 2004) présentait un exemple d'exploitation pédagogique de la voiture électrique radiocommandée Tamiya TL-01 axé sur la chaîne d'énergie, et plus particulièrement sur une analyse permettant à l'élève d'identifier simplement les diverses formes de résistances appliquées à une motorisation. Il s'agit ici d'analyser de plus près le comportement du moteur électrique de propulsion, afin de familiariser l'élève avec des grandeurs qui lui seront utiles, tels le couple transmis ou l'intensité de courant consommé.

MOTS-CLÉS énergie, projet, puissance



Le modèle TL-01 et son banc de tests de propulsion et direction

Il est primordial, en matière de transmission de puissance, de bien comprendre le fait que les performances d'un moteur en vitesse et accélération restent toujours étroitement liées aux diverses formes de résistance au mouvement qui lui sont appliquées.

Commençons tout d'abord par observer le comportement du cheval **1**... Eh oui, dans l'histoire de l'humanité, c'est un peu comme cela que les choses ont commencé, du moins en matière de moyens de locomotion. Le meilleur ami de l'homme devenu ainsi au fil des ans un véritable «moteur»... pour nos carrosses par exemple, mais aussi pour le tramway de Paris!



1 Du cheval à la voiture

Très écologique en tout cas, et tellement majestueux. Oui mais voilà, un beau jour, la vapeur est apparue, puis ce fut le tour du pétrole, de l'électricité... Non seulement notre compagnon de route se voit enfin soulagé, mais, en plus de cela, nous voilà devenus soudainement propulsés à des vitesses jusque-là jamais atteintes. Du train à vapeur à l'avion supersonique, nous ne cessons d'inventer des engins de plus en plus complexes, toujours à la recherche d'un autre record.

Eh bien, non seulement le cheval reste important pour notre histoire, mais il le sera aussi pour la suite des études techniques concernant la propulsion de notre voiture de compétition.

Effort de traction contre effort résistant

Il s'agit pour le cheval d'exercer un effort de traction suffisant pour répondre aux besoins de performances émis par son jockey **2**.

L'effort de traction, noté T et exprimé en newtons (N), est en fait transmis par le sabot sur le sol, à condition bien entendu qu'il n'y ait pas de phénomène de patinage **3**... Il sera nécessaire pour cela d'exercer sur le terrain un effort d'appui suffisant pour éviter tout glissement.

Bien entendu, plus l'effort de traction sera important, plus les performances en accélération seront appréciables **4**.



2 L'effort de traction

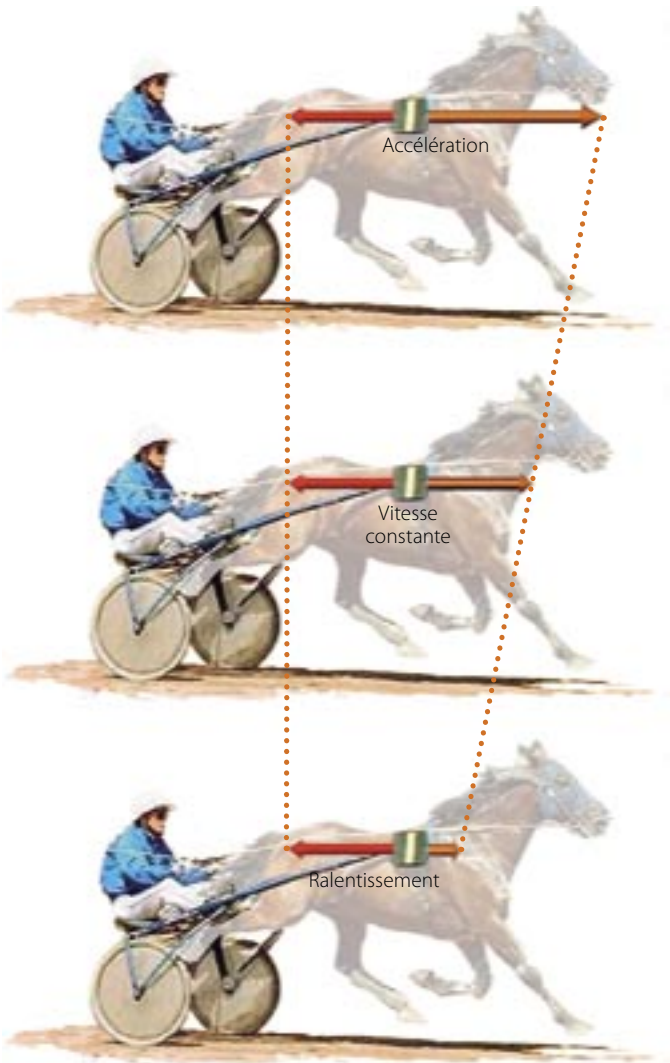
3 L'effort d'appui

Flux d'énergie et action motrice

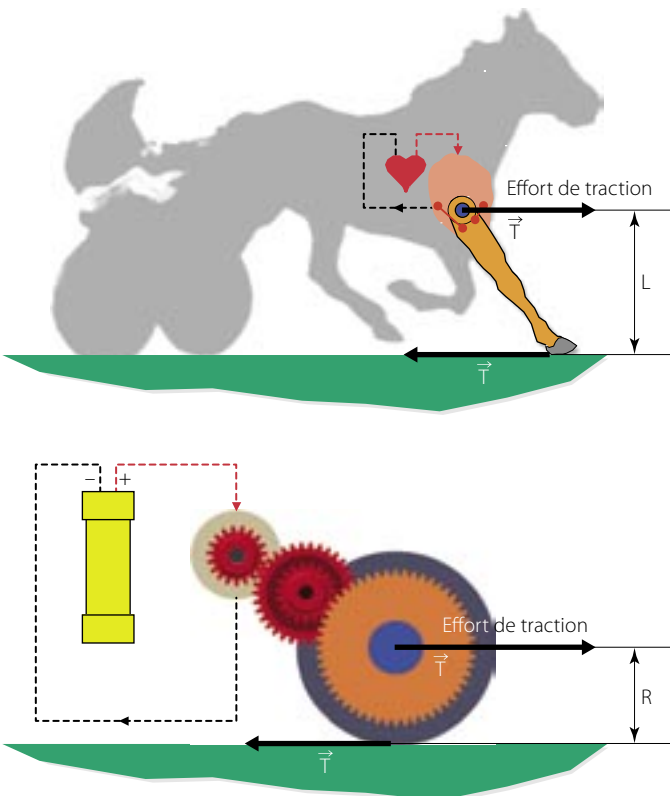
Du cheval à la voiture, il n'y a qu'un pas... En effet, dans les deux cas en **5**, on retrouve bien l'effort de traction à transmettre, mais aussi :

- La source d'énergie, cœur pour l'animal, et batterie électrique pour la voiture ;
- Le flux d'énergie, circulation du sang pour le cheval, et circulation du courant électrique dans le cas de la voiture, caractérisée par son intensité exprimée en ampères. Un flux qui se produit en continu, c'est-à-dire toujours dans le même sens. Plus l'élément moteur sera sollicité, plus le flux d'énergie à faire transiter dans les veines ou le fil conducteur sera important. Dans le cas de la voiture, plus le moteur devra fournir d'efforts, plus il sera consommateur d'ampères, ce qui nuit bien entendu à l'autonomie de la batterie. Dans le cas de l'animal, le sang qui circule dans les veines est maintenu par le cœur sous une certaine pression, une pression qui peut d'ailleurs chuter du fait des résistances de parcours... Eh bien, dans le cas de la batterie, cette pression

1. Professeur agrégé de mécanique au lycée Alfred-Mézières de Longwy (54).



4 L'effort de traction fourni par le cheval s'oppose à l'effort résistant au mouvement



5 Le flux d'énergie et l'action motrice

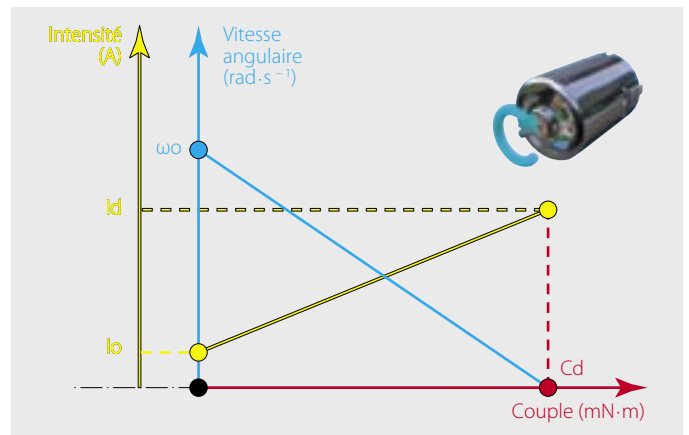
sanguine devient la tension exprimée en volts, qui, comme dans le cas du cheval, peut chuter à la rencontre de résistances ;

- **L'élément moteur**, consommateur d'énergie, muscles dans le cas du cheval, et moteur électrique à courant continu dans le cas de la voiture ;
- **Les organes de transmission**, tendons dans le cas du cheval et engrenages dans le cas de la voiture. Leur rôle consiste également, suivant leur agencement, à soulager au mieux l'élément moteur ;
- **Le centre d'articulation** de la patte ou de la roue motrice, permettant la mobilité du corps de l'animal ou du châssis de la voiture par rapport au sol ;
- **Le couple transmis** : Si l'on veut étudier de plus près le comportement du moteur de propulsion de la voiture, il est nécessaire de faire intervenir cet autre paramètre. En effet, l'effort de traction à lui seul ne suffit pas pour interpréter les documents constructeur. Dans le cas du cheval, on se rend compte que plus le point de contact sabot/sol est éloigné du centre d'articulation, plus les muscles moteurs sont sollicités pour faire pivoter la patte. Pour simplifier à l'extrême la modélisation de cette observation, on parlera de couple induit par l'effort de traction, une grandeur, exprimée en newtons-mètres (N·m), qui représente le produit de l'effort de traction T , exprimée en newtons (N), par la longueur L , exprimée en mètres (m). Dans le cas de la roue de voiture, le principe reste inchangé, la distance L étant dans ce cas le rayon de la roue R .

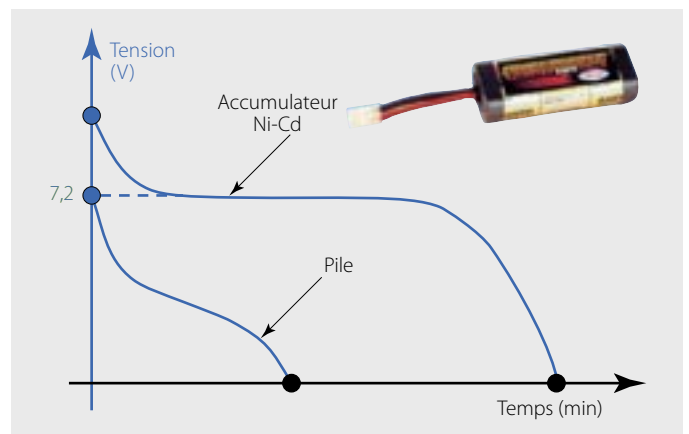
Le couple induit par l'effort de traction seul est le suivant :

$$C = T \cdot R$$

Ce couple représente donc l'action motrice qui sera prise en considération dans les études de comportement du moteur de propulsion.



6 Un extrait de courbes caractéristiques d'un moteur à courant continu



7 La tension d'alimentation délivrée par un accumulateur Ni-Cd

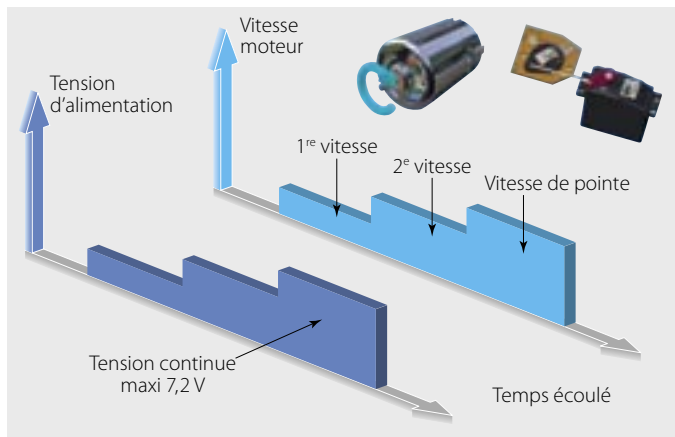
Le comportement du moteur de propulsion face aux caractéristiques d'alimentation électrique

Le moteur de propulsion est dans notre cas un moteur à courant continu : il fonctionne en effet grâce à une circulation continue du courant délivré par la batterie, elle-même constituée d'accumulateurs rechargeables. Les paramètres qui caractérisent cette alimentation électrique sont donc :

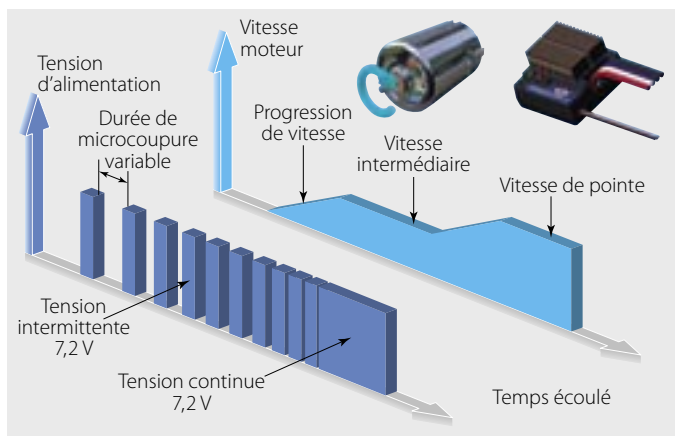
- **L'intensité** du courant notée I et exprimée en ampères (A), dont la valeur reste étroitement liée à la sollicitation du moteur **6**. L'autonomie de la batterie, qui se caractérise par sa capacité exprimée en ampères-heures (Ah), est donc directement liée à la valeur de l'intensité de courant consommé, comme le montre la relation suivante :

$$\text{Autonomie} = \frac{\text{Capacité de batterie}}{\text{Intensité moyenne de courant consommé}}$$

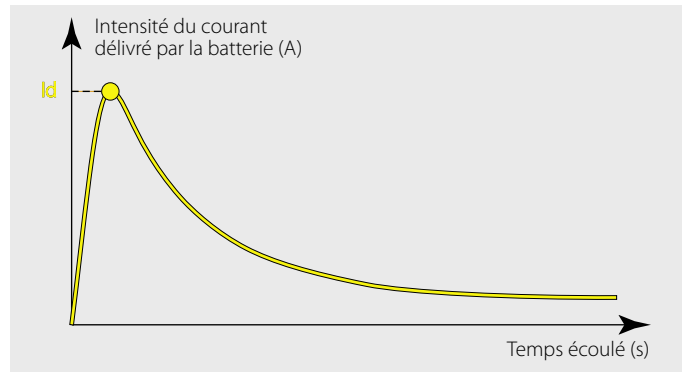
- **La tension** (U) exprimée en volts (V), dont la valeur en sortie de batterie est directement liée aux caractéristiques de comportement en décharge des accumulateurs **7**. La valeur maximale dans notre cas d'utilisation est de 7,2 volts, une valeur qui décroît au fil de la décharge de la batterie. L'intérêt de l'emploi d'un accumulateur nickel-cadmium (Ni-Cd) réside dans le fait qu'il existe durant un certain temps un palier qui permet de faire fonctionner le moteur sous une tension quasi constante. La vitesse de rotation du rotor est étroitement liée à la valeur de cette tension. On peut par exemple, en cas d'utilisation d'un variateur dit mécanique, faire varier la « vitesse moteur » en interposant entre la batterie et le bobinage du rotor une résistance variant par paliers, ce qui provoque une baisse de tension, mais aussi une perte d'énergie **8**. En revanche, en cas d'utilisation d'un variateur électronique, la tension d'alimentation est constante, mais délivrée de manière intermittente s'il y a des vitesses de



8 La variation de vitesse commandée par variateur mécanique



9 La variation de vitesse commandée par variateur électronique

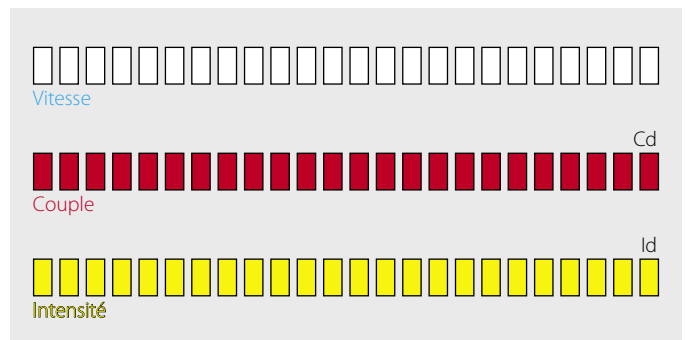


10 L'allure de la courbe de démarrage relevée sur banc de tests

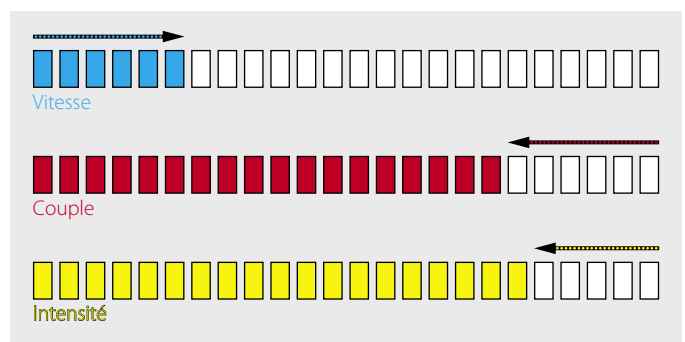
régime intermédiaires **9**. Quel que soit le variateur de vitesse utilisé, la vitesse maximale est atteinte sous une tension continue de 7,2 volts.

Le comportement du moteur de propulsion face aux résistances au mouvement

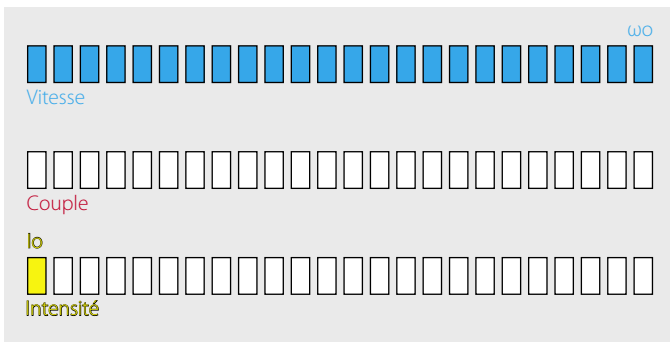
Il s'agit donc à présent d'analyser de plus près le comportement du moteur observé au cours des essais sur banc de tests. Les relevés sur oscilloscope permettent de visualiser la variation d'intensité de courant consommé durant la phase d'accélération départ arrêté **10**. On s'aperçoit alors qu'à l'instant même du démarrage la valeur atteinte par cette intensité est maximale, ce qui correspond au courant de démarrage noté I_d dans les courbes caractéristiques du moteur **6**. Le couple transmis par l'arbre moteur est quant à lui également maximal à cet instant **11**, de valeur notée C_d dans les courbes moteur. Ensuite, alors que le rotor prend de la vitesse, les valeurs de couple transmis et de courant consommé diminuent **12**. En fonctionnement à vide, c'est-à-dire sans plus aucune charge résistante, par exemple à la fin de la phase d'accélération du moteur isolé sur banc, le couple transmis devient nul, alors que le courant consommé a quant à lui atteint un palier correspondant au courant à vide, noté I_0 **13**. La vitesse angulaire à vide du rotor exprimée en radians par



11 Le comportement moteur au démarrage



12 Le comportement moteur à régime intermédiaire



13 Le comportement moteur à vide

seconde ($\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$) sera notée ω_0 . Les valeurs de couple transmis et de vitesse restent bien entendu liées aux caractéristiques de tension d'alimentation du moteur.

Les équations caractéristiques de mouvement et de consommation se déterminent à partir de la résolution d'équations différentielles issues de lois affines $\omega(C)$ et $I(C)$ de comportement moteur, et de la loi dynamique $\omega'(t) = (C - Cr)/J_{\text{equ}}$, où Cr désigne le couple résistant en $\text{N} \cdot \text{m}$ et J_{equ} le moment d'inertie équivalent en $\text{kg} \cdot \text{m}^2$. Voici donc à titre indicatif la liste de ces équations, que l'enseignant peut exploiter afin de proposer à l'élève une simulation de démarrage :

- Position angulaire du rotor (rad) :

$$\theta(t) = a \cdot t + (a/b) \cdot e^{-b \cdot t} - (a/b)$$

- Vitesse angulaire du rotor ($\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$) :

$$\omega(t) = a \cdot (1 - e^{-b \cdot t})$$

- Accélération angulaire du rotor ($\text{rad} \cdot \text{s}^{-2}$) :

$$\omega'(t) = a \cdot b \cdot e^{-b \cdot t}$$

- Intensité de courant consommé (A) :

$$I(t) = I_0 + ((I_d - I_0)/C_d) \cdot (J_{\text{equ}} \cdot \omega'(t) + Cr)$$

avec $a = \omega_0 \cdot (1 - Cr/C_d)$ et $b = C_d/J_{\text{equ}} \cdot \omega_0$

Les phénomènes résistants au mouvement peuvent donc être regroupés en deux familles :

- **Les frottements aérodynamiques** appliqués au modèle Ferrari Modena, roulements pneus slick sur piste lisse, et frottements internes à la transmission :

$$Cr = (1,238 \cdot 10^{-4} \cdot V^2) + (P \cdot 0,3)/(i \cdot \eta)$$

Cr ($\text{N} \cdot \text{m}$) : couple résistant induit par ces formes de résistance et appliqué au rotor

V (m/s) : vitesse de la voiture (vitesse de pointe = 6,66 m/s)

P (N) : poids de la voiture (15 N)

i : rapport de la transmission (7,958 pour le modèle standard de base)

η : rendement global de la transmission, prenant en compte les frottements internes (valeur estimée à 0,7)

- **Les phénomènes d'inertie** (pour simplifier l'analyse théorique, nous ne tiendrons compte ici que des phénomènes d'inertie liés à la masse de la voiture en translation, en négligeant donc les inerties de moindre ampleur des organes tournants) :

$$J_{\text{equ}} = m \cdot 10,56 \cdot 10^{-4} / i^2$$

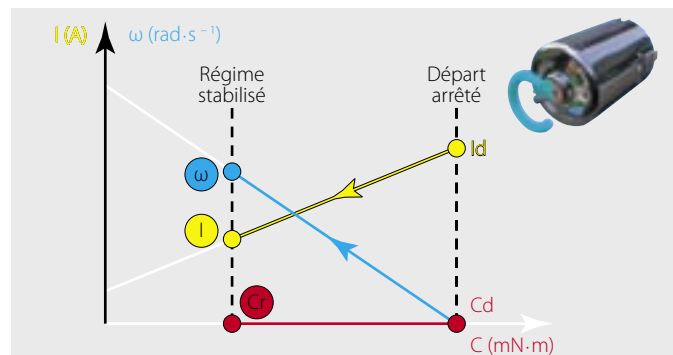
J_{equ} ($\text{kg} \cdot \text{m}^2$) : moment d'inertie équivalent à l'inertie de la masse de la voiture en accélération, toujours appliqué au niveau du rotor moteur

m (kg) : masse de la voiture (1,5 kg)

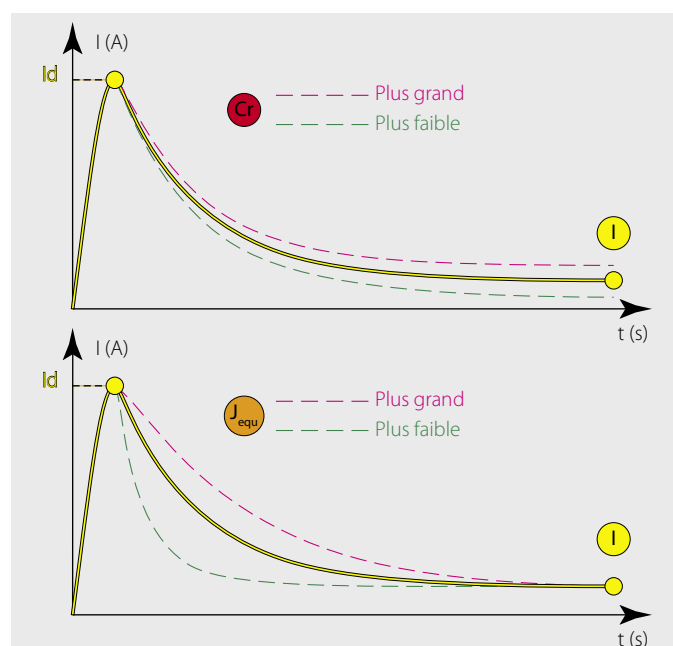
i : rapport de réduction de la transmission

Notons que ces relations ne sont données qu'à titre indicatif, dans l'unique dessein de se familiariser au mieux avec la notion de résistance au mouvement, et peuvent donc faire l'objet d'applications numériques utiles à des analyses théoriques au moyen des équations vues précédemment.

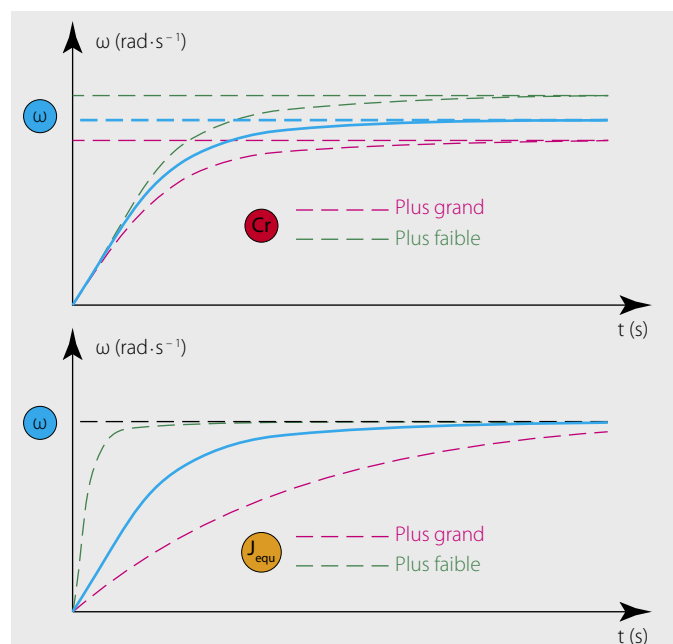
Les figures 14, 15 et 16 donnent des images simples d'interprétation quant à l'influence des résistances au mouvement, sur les évolutions en matière de vitesse et de consommation, la courbe $i(t)$ étant exploitable directement sur un oscilloscope connecté



14 Le point de fonctionnement à régime stabilisé établi par Cr



15 L'influence de Cr et de J_{equ} sur le profil de la courbe $I(t)$



16 L'influence de Cr et de J_{equ} sur le profil de la courbe $\omega(t)$

au banc de tests. L'enseignant peut également disposer d'une simulation sous logiciel tel Microsoft Excel, où l'on pourra faire varier certains paramètres dans le but d'interpréter directement les conséquences des choix effectués sur le comportement théorique du système.

La sélection d'organes de transmission

En sélectionnant par exemple différents rapports de transmission entre rotor et roues motrices, on pourra configurer la voiture de différentes manières. Ainsi, le couple de démarrage provoquera un effort de traction plus ou moins élevé suivant notre choix, alors que la performance en vitesse théorique de pointe de la voiture, liée à la vitesse angulaire à vide du rotor, sera inversement proportionnelle aux performances dynamiques **17**.

Une démarche d'ingénieur

À travers cette deuxième étape, l'élève a pu se familiariser avec les grandeurs liées au comportement précis du moteur à courant continu, telles que la vitesse angulaire, la tension d'alimentation, l'intensité de courant consommé et le couple transmis, et ce, pour diverses configurations de fonctionnement. La démarche d'approche expérimentale décrite dans l'article précédent se voit ainsi confortée par une analyse cette fois plus théorique. Des instruments de mesure aux lois physiques de comportement, un large éventail d'outils mathématiques et techniques nous a permis d'établir de manière très ludique une démarche d'ingénieur, basée ici sur l'expérimentation et la modélisation de comportements réels d'un système technique. ■

Un modèle réduit en plein essor

La voiture radiocommandée Tamiya TL-01, exploitée au départ en sciences de l'ingénieur dans l'académie de Nancy-Metz, connaît aujourd'hui un véritable essor pédagogique, et ce, avec le soutien motivé de la société T2M-Tamiya-France, qui apprécie tout particulièrement l'aspect réaliste des analyses proposées. C'est donc à travers l'étude de préparation du modèle réduit à la compétition que l'on pourra découvrir, au moyen d'un didacticiel interactif, toutes ces notions scientifiques et techniques relatives aux comportements de systèmes de propulsion, de direction, d'adaptation au sol, et de radiocommande.

Banc de tests et didacticiel

Par Philippe Lai et Yann Supeljak
CREA Technologie

Ce kit pédagogique comprend :

- Un banc de tests pour systèmes de propulsion et de direction. Les mesures sont effectuées au moyen d'un tachymètre et d'un oscilloscope.
- Un didacticiel de 400 diapositives interactives et modulables par l'enseignant, comprenant de nombreuses ressources pédagogiques agrémentées de photos et animations : maquette numérique complète de la voiture, schémas électroniques, notice de montage, dossiers sur les accumulateurs, moteur de propulsion, servomoteur de direction, radiocommande... Vingt études sont proposées, avec documents réponses et corrigés.



CREA Technologie : www.foucher-formatique.com

17 La sélection de rapports de la transmission au regard des performances visées

