

Maquettes sensorielles en énergétique

Seconde partie

YVES BRACCINI, ROBERT GOURHANT^[1]

Qu'est-ce que l'énergie ? Cet article propose dans une seconde partie de montrer comment les maquettes sont une interface entre le comportement du système réel et sa formalisation.

Après l'approche sensorielle de l'énergie mécanique de translation (*Technologie* n° 200, novembre-décembre 2015), les auteurs développent, dans cette seconde partie, le stockage et l'optimisation de la consommation de l'énergie mécanique dans les systèmes en rotation en fonction des comportements recherchés.

Récupérer, stocker, consommer l'énergie cinétique

Lorsqu'un véhicule décélère, il perd de l'énergie cinétique. La majorité des systèmes de récupération de l'énergie cinétique (Srec) convertissent – grâce à un moteur électrique fonctionnant en générateur – cette énergie mécanique en énergie électrique stockée dans les batteries. Le dispositif « Flywheel Kers »^[2] 1 récupère cette énergie cinétique lors de la décélération et la stocke sous forme d'énergie cinétique de rotation d'un volant d'inertie (*flywheel module*). Le fonctionnement peut être décomposé en trois phases 3.

Phase 1. Freinage du véhicule : le moteur thermique qui alimente les roues avant est débrayé. Le volant d'inertie 2 – dont l'arbre 3 est en liaison pivot avec le carter 1, sous vide – est lié par un embrayage 5 (*start clutch* 1) à la couronne du différentiel D et donc aux arbres de transmission 6 entraînés par les roues arrières. Le variateur 4 (*CVT module*, 1) adapte le rapport de vitesse à celle des roues.

Phase 2. Vitesse constante (ou arrêt) : le volant 2 est débrayé, il continue de tourner. Il a stocké l'énergie cinétique du véhicule.

Phase 3. Accélération : le volant 2 est à nouveau embrayé, il restitue l'énergie stockée aux roues du véhicule, ce qui donne un gain de puissance.

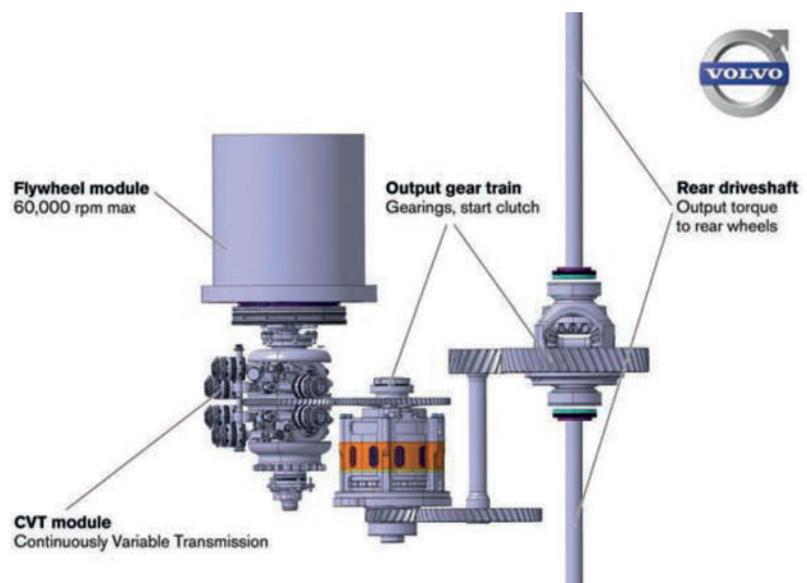
[1] Co-inventeurs des « Maquettes didactiques sensorielles de liaisons mécaniques », les auteurs poursuivent et prolongent ici la mise en œuvre de leur démarche kinesthésique exposée dans la revue *Technologie* pour l'étude des « Liaisons » en statique (n°s 134 et 137) et pour celle des « Poutres » en résistance des matériaux (n°s 161 et 162).

[2] KERS : Kinetic Energy Recovery Systems. Voir description du dispositif dans le n° 189 de *Technologie* (janvier-février 2014) « Coupé, ça tourne ! ».

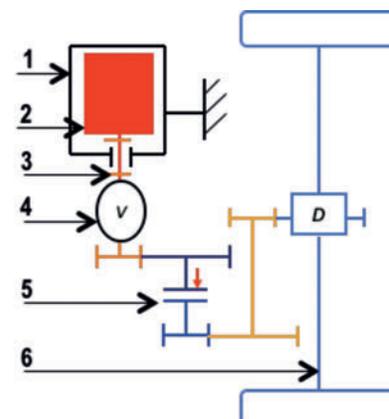
mots-clés
dynamique, énergétique, modélisation, pré-bac, démarche pédagogique

Le variateur et l'embrayage sont pilotés pour une commande électronique en fonction des paramètres cinématiques du véhicule. Sur un parcours urbain – le plus intéressant par ses successions de freinages/accélérations –, le gain de consommation du moteur thermique est de 25 % environ.

Ces grandeurs physiques sont abstraites. Les maquettes sensorielles permettent d'entrer dans la caractérisation de ces échanges énergétiques en lien avec les perceptions du corps.



1 Architecture du système Flywheel Kers, © Volvo



2 Schéma de principe

L'objectif d'une première séquence est d'identifier les flux énergétiques entre le système isolé et l'extérieur. Dans la deuxième séquence, l'élève identifie, à partir d'expérimentations simples, les grandeurs influentes de l'énergie cinétique et il justifie l'optimisation du dispositif. Dans une troisième séquence, il applique le principe de la conservation de l'énergie mécanique pour caractériser les pertes aux paliers.

Première séquence : caractériser l'entrée et la sortie de l'énergie

Modélisation du comportement avec la maquette sensorielle

On isole le module « volant d'inertie » (*flywheel module*), la maquette sensorielle est sa modélisation analogique. Les élèves travaillent en binôme [3].

Phase 1 : entrée

L'élève récepteur **R** tient la poignée **1** verticalement. L'élève moteur **M** tire avec une force F sur l'anneau du cordon préalablement enroulé sur l'arbre **3**, ce qui lance en rotation le volant **2**. Le cordon se déroule d'une longueur $l = 1$ m, jusqu'au décrochage. C'est la récupération de l'énergie cinématique venant du véhicule.

Phase 2 : stockage de l'énergie

L'élève récepteur **R** tient toujours la poignée **1** verticalement, le fil est décroché. Plus rien n'entre dans le système, plus rien n'en sort, le volant **2** continue de tourner, sa vitesse baisse lentement (les frottements ne sont pas négligeables). $(S) = \{2, 3\}$ possède donc, en son sein, une énergie mécanique. La fonction « stockage » peut alors être nommée, à partir du prérequis (énergie potentielle de hauteur ou d'élasticité) [3] :

Phase 3 : sortie

L'élève récepteur **R** tient d'une main la poignée **1** et, de l'autre, il engage par le bas, de façon coaxiale, la poignée-frein **7** sur l'arbre. Cette poignée modélise l'embrayage **5**. Le manchon à griffes **8** va accrocher la goupille **9** et entraîner en rotation la poignée **7** (le frein à sabot est bloqué). L'élève récepteur perçoit alors un couple et un

[3] Voir « Maquettes sensorielles en énergétique ; partie 1 : mouvement de translation » *Technologie* n° 200.

déplacement angulaire dans sa main. C'est la modélisation de la restitution, à l'arbre **6** de l'énergie mécanique stockée dans le volant d'inertie. La vitesse du volant diminue jusqu'à l'arrêt, son énergie cinétique est alors nulle. Elle va le rester jusqu'à la prochaine décélération du véhicule, c'est-à-dire, ici, jusqu'à un nouveau lancement avec le cordon.

Paramétrage des grandeurs entrée-sortie dans les phases 1 et 3

L'élève a pour prérequis la notion de travail et d'énergie (voir *Technologie* n° 200).

Phase 1 : entrée de l'énergie [4]

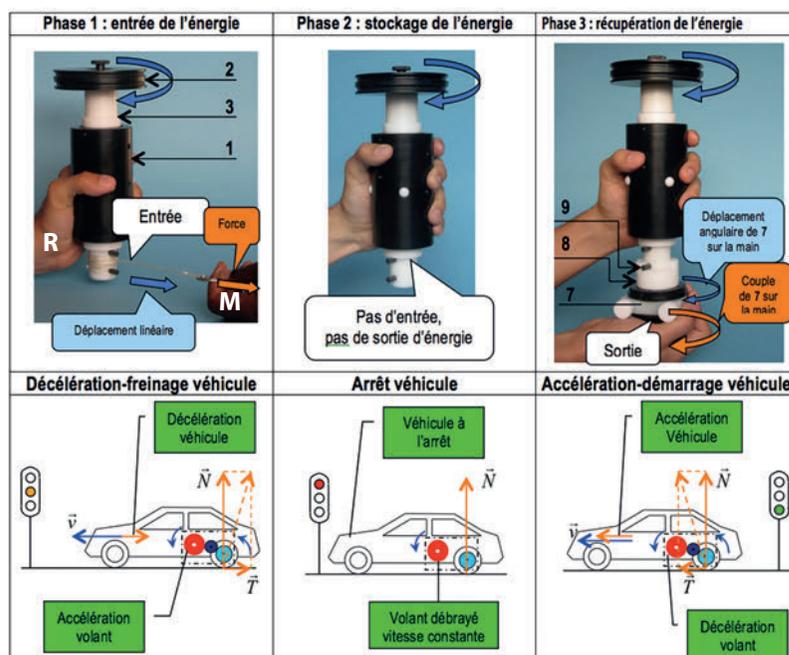
Il est possible d'écrire l'expression de l'énergie d'entrée entre les instants 1 et 2 :

$$W(F_e)_{1-2} = F \cdot (l_2 - l_1) = F \cdot \Delta x$$

avec F constant, W_{1-2} en joules (J) ;

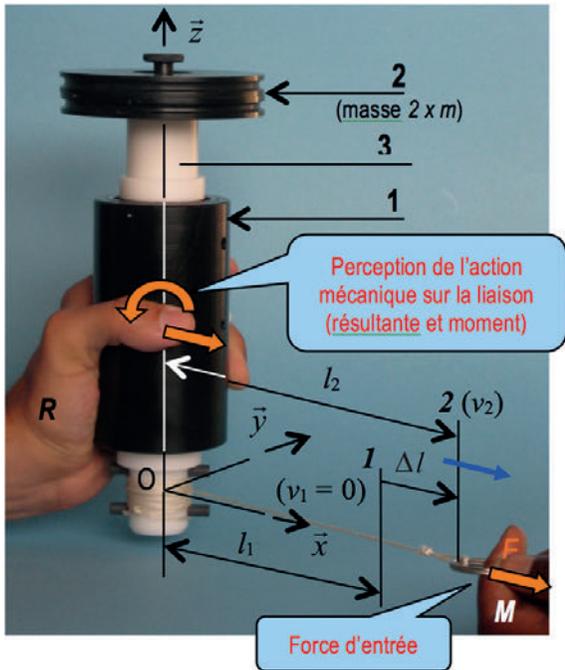
F est la force de traction en N (valeur moyenne mesurée par un dynamomètre, par exemple, $F = 10$ N) ;

Δx , la longueur déroulée en mètres (longueur du cordon, $l = 1$ m).



[3] Caractériser l'entrée et la sortie de l'énergie

L'élève calcule ainsi l'énergie d'entrée lors du déroulage complet et se la représente en relation avec ses sens :
 $W(F_e)_{1-2} = 10 \times 1 = 10 \text{ J}$.



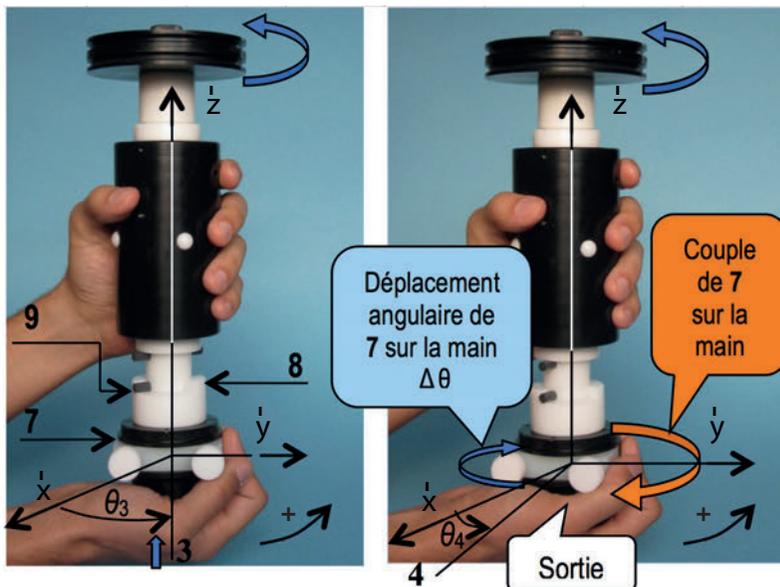
4 Grandeurs d'entrée : lancement

Phase 3 : sortie de l'énergie 5

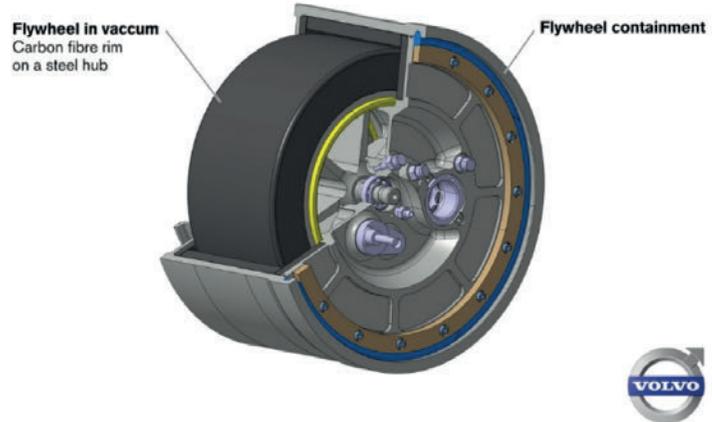
Le système isolé est la maquette avec la poignée frein 7, frein serré-bloqué, manchon à griffes 8 en contact avec la goupille 9. La main est peu serrée.

L'élève récepteur R perçoit dans sa main un couple de sortie $C_s = C_{7/main}$ et un glissement (rotation) d'angle $\Delta\theta = (\theta_4 - \theta_3)$ de la poignée 7 dans le même sens. La vitesse diminue, donc E_k diminue.

C'est l'expression de l'énergie venant du système reçue dans la main. Elle est notée $W(F_e)_{3-4}$.



5 Grandeurs de sortie : récupération de l'énergie



6 Isolement du volant d'inertie, système Flywheel Kers, © Volvo

En s'appuyant sur le prérequis – l'énergie mécanique est égale à la force multipliée par un déplacement –, il est possible d'écrire l'expression du travail du couple de sortie C_s entre les instants 3 et 4 :

$$W(F_e)_{3-4} = C_s (\theta_4 - \theta_3) = C_s \Delta\theta$$

En synthèse, nous pouvons définir ces échanges énergétiques avec la convention de signe, selon que le système isolé (le module « volant d'inertie ») reçoit de l'énergie ou en fournit.

Phase 1 : $F > 0$ et $\Delta x > 0$; $F \cdot \Delta x > 0$, alors $W(F_e)_{1-2} > 0$ ou $C_e (\theta_1 - \theta_2) > 0$. C'est un travail moteur qui entre (énergie d'entrée), le volant d'inertie reçoit de l'énergie, il est récepteur.

Phase 3 : $C_s < 0$ et $\theta_4 - \theta_3 < 0$; $C_s \cdot \Delta\theta > 0$, alors $W(F_e)_{3-4} > 0$. C'est un travail moteur qui sort (énergie de sortie), le volant d'inertie fournit de l'énergie, il est moteur.

Deuxième séquence : caractériser les grandeurs constituantes de l'énergie cinétique

Identification des grandeurs de l'énergie cinétique de rotation

Le système isolé est le module « volant d'inertie » (flywheel module) 6. Dans la phase 1 (entrée de l'énergie), son arbre est soumis à un couple moteur C_m . Le module est récepteur, il est modélisé par la maquette sensorielle 7.

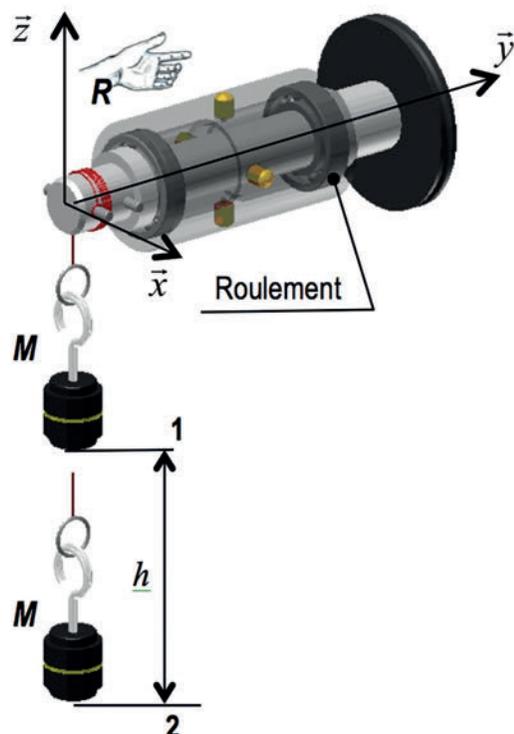
Dans cette séquence, qui nécessite des résultats chiffrés, nous allons faire entrer l'énergie de façon rigoureusement constante, en exploitant la diminution de l'énergie potentielle, d'une (ou deux) masselottes de masse m (0,17 kg), accrochées à l'extrémité d'un cordon qui se déroule sur une hauteur h (1 m) et se décroche en fin de course. La poignée, axe horizontal, est tenue dans la main immobile.

Le repère $(O, \vec{x}, \vec{y}, \vec{z})$, lié à la poignée, est donc galiléen.

Fondement théorique de l'expérience

L'énergie d'entrée est : $E_{p1-2} = mgh$

Ici $E_{p1-2} = 0,17 \times 9,81 \times 1 = 1,67 \text{ J}$.



7 Énergie d'entrée constante

Nous savons que, pour le système isolé (S_2) = {volant 2, arbre 3, masselotte 9}, il y a conservation de l'énergie mécanique E_m , si les frottements sont négligés. On peut écrire : $E_{k1} + E_{p1} = E_m = \text{Cte}$.

À l'instant 1 (début de déroulage), la vitesse est nulle, donc $E_{k1} = 0$; $E_{p1} + 0 = E_m = mgh$.

Ce sont les conditions initiales du mouvement qui permettent de calculer l'énergie mécanique introduite dans le système.

Pendant le déroulement, l'énergie potentielle E_p diminue et l'énergie cinétique E_k augmente.

À l'instant 2, le fil, complètement déroulé, va se décrocher. Par convention, pour $h = 0$, l'énergie potentielle est nulle, elle s'est totalement convertie en énergie cinétique. On écrit que : $E_{p2} = 0$;

$0 + E_{k2} = E_m = mgh$; d'où $E_{k2} = mgh$; ici $E_{k2} = 1,67 \text{ J}$.

En conclusion, dans un système isolé, si les frottements sont négligés, l'énergie cinétique en fin de déroulement (instant 2) est égale à l'énergie potentielle d'entrée 8. Si cette dernière est constante, l'énergie cinétique du système, à l'instant 2, est constante, quelles que soient les valeurs de la masse et de la vitesse.

Cette propriété fonde le protocole de l'expérience qui sert de guide à l'enseignant pour accompagner l'élève lors de l'interprétation des résultats.

La relation moment d'inertie/vitesse de rotation

On peut énoncer la problématique suivante : dans le module « volant d'inertie », comment stocker une énergie cinétique donnée, issue du freinage du véhicule, en ayant le système le moins encombrant possible et la masse la plus faible possible ?

Protocole 1

Pour une même énergie potentielle d'entrée, c'est-à-dire une même énergie cinétique à l'instant 2 ($E_{k2} = mgh$), nous allons faire varier l'inertie des disques (disque acier, alu...) et observer la relation avec la vitesse. Nous pourrions à ce moment introduire la définition de E_k et dégager une loi.

Nous identifierons, dans un deuxième temps, comment, dans le dispositif « Flywheel Kers », ces grandeurs ont été optimisées par les concepteurs.

La maquette est équipée d'un disque acier. Le fil ($l = 1 \text{ m}$) est enroulé sur l'arbre (10 tours), la masselotte a été remontée en 1, puis lâchée sans vitesse initiale. L'énergie d'entrée E_m est constante 8. Le mouvement de rotation est uniformément accéléré.

L'élève mesure le temps de déroulage : $t_{d1} \approx 1 \text{ s}$.

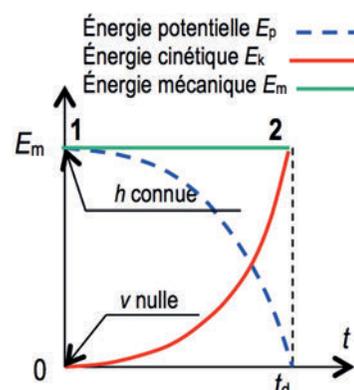
La maquette est ensuite équipée de deux disques acier, le temps de déroulage est : $t_{d2} \approx 2 \text{ s}$.

Équipée d'un disque alu ajouré : $t_{d3} \approx 0,5 \text{ s}$.

On constate que E_{k2} reste constante en 2 (fin de course) et, pourtant, si :

- J augmente, le temps t de descente augmente. La vitesse de déroulement du fil est moins rapide ;
- J diminue, le temps t de descente diminue. La vitesse de déroulement du fil est plus rapide.

Pour interpréter le phénomène observé, nous allons écrire la conservation de l'énergie mécanique du système (S_2) = {volant 2, arbre 3, masselotte 9}.



8 Relation E_m , E_p , E_k

Expression de l'énergie cinétique de translation

Dans le repère galiléen ($O, \vec{x}, \vec{y}, \vec{z}$), pour la translation de la masselotte (masse m) qui descend, l'élève peut écrire qu'à l'instant t :

$$E_k = \frac{1}{2} m \cdot V^2$$

$m = 0,17 \text{ kg}$; $V \text{ (m/s)}$; $E_k = 0,085 \times V^2$ (voir prérequis article 1).

Expression de l'énergie cinétique de rotation

Dans le dossier ressource, l'élève découvre l'expression de E_k :

$$E_k = \frac{1}{2} J \cdot \omega^2$$

avec : $J \text{ (kg}\cdot\text{m}^2)$, $\omega \text{ (rad/s)}$.

La vitesse angulaire ω a remplacé la vitesse linéaire, mais pourquoi cette nouvelle grandeur inconnue, le moment d'inertie ? Ce questionnement est moteur d'apprentissage (voir encadré « approfondissement »).

Expression de l'énergie cinétique totale du système

On pose :

E_{km} : énergie cinétique de la masselotte ;

E_{kv} : énergie cinétique du sous-ensemble (S_3) = {volant 2, arbre 3}.

À l'instant 2, $E_{km2} + E_{kv2} = mgh$;

$$\frac{1}{2} m \cdot v_2^2 + \frac{1}{2} J \cdot \omega_2^2 = mgh$$

Le déroulement du fil, sans glissement sur l'arbre de rayon r , permet d'écrire que : $v = r \omega_2$, d'où :

$$\frac{1}{2} \omega_2^2 (mr^2 + J) = mgh$$

$$\omega_2 = \sqrt{\frac{2mgh}{mr^2 + J}} ; \omega_2 \text{ est bien fonction de } J.$$

Application numérique : $m = 0,17 \text{ kg}$; $g = 9,81 \text{ m/s}^2$; $h = 1 \text{ m}$; $r = 0,015 \text{ m}$.

$$\omega_2 = \sqrt{\frac{3,33}{3,8 \times 10^{-5} + J}}$$

En conclusion, pour une énergie cinétique constante ($mgh = \text{Cte}$), à l'instant 2, avec un moment d'inertie J plus faible, la vitesse de rotation ω_2 est plus grande. J et ω ne sont pas indépendantes, elles varient en sens inverse.

La solution utilisant un volant de faible inertie (disque alu ajouré) avec une vitesse de rotation plus grande est une piste de solution pour optimiser le système « Flywheel Kers ».

Optimisation du système de récupération d'énergie cinétique (Srec)

Il y a un train d'engrenages multiplicateur et un variateur toroïdal qui multiplie la vitesse de rotation du volant d'inertie (60 000 tr/min maximum), lorsque la vitesse de la roue diminue. La masse du volant est de 6 kg.

Interprétation des choix technologiques

Comme $E_k = \frac{1}{2} J \cdot \omega^2 = \text{Cte}$, on déduit de l'expérience précédente et des données ci-dessus que, pour une énergie récupérée donnée, il y a trois optimisations du dispositif (phase 1).

Optimisation 1 : diminuer J (réduction de l'encombrement), augmenter la vitesse ω (elle intervient au carré). C'est le rôle du train d'engrenages multiplicateur de vitesse.

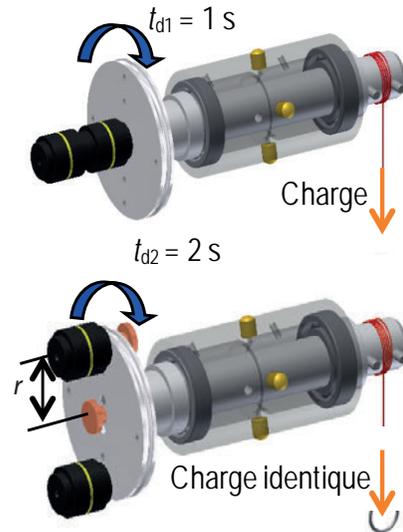
Optimisation 2 : augmenter la vitesse du volant lorsque celle des roues diminue et que le véhicule est freiné.

APPROFONDISSEMENT
Pourquoi un moment d'inertie plutôt qu'une masse dans E_k ?

Protocole 2 : monter les masses comme ci-dessous. L'élève constate que le temps de déroulage augmente lorsque les masses sont décalées. La distance r de la masse par rapport à l'axe de rotation a une influence. La définition du moment d'inertie d'un solide, par rapport à un axe, prend plus de sens :

$$I_{Gz} = \sum_{(S)} (r^2 \cdot \Delta m)$$

Nous pouvons maintenant justifier l'unité : $\text{kg} \cdot \text{m}^2$. L'introduction du théorème de Huygens viendra par la suite.



C'est la fonction du variateur toroïdal de vitesse qui augmente de façon continue le rapport de vitesse entre l'arbre de transmission et l'arbre du volant, dans le sens de la multiplication.

Optimisation 3 : pour un J réduit, déterminé par le calcul, diminuer la masse du volant au profit d'un diamètre modérément plus grand (il intervient au carré). L'évidement de la matière au centre transforme le cylindre en couronne [6]. Il est préférable d'avoir une masse du volant réduite pour ne pas trop augmenter la masse du véhicule. L'expression de J est :

$$J_{Gz} = \frac{1}{2} m \cdot (R^2 + r^2)$$

Par ailleurs, l'emploi d'un matériau de faible masse volumique entraîne une diminution de la masse et augmente modérément les rayons R et r de la couronne.

En conclusion, avec cette démarche, l'élève sera capable de justifier le choix du concepteur pour le volant d'inertie :

- une vitesse de rotation importante (60 000 tr/min maximum) ;

- un moment d'inertie faible (J , principale grandeur influant sur l'encombrement) avec un diamètre modéré (20 cm) et une faible masse (6 kg, fibre de carbone).

Avec ces données, l'élève calcule l'énergie cinétique maximum stockée dans le volant et la compare à l'énergie perdue par le véhicule.

Entrée	Caractéristiques mécaniques		Mesure du temps		Sortie	
	Moment d'inertie	Couple résistant C_r	Démarrage t_d	Freinage t_f	Énergie sortie	Énergie perdue
Longueur de cordon $l = 1$ m Force $F = 1,67$ N avec $m_1 = 0,17$ kg	Deux disques acier	Palier lisse	6 s	< 1 s	Nulle	Pertes plus importantes, C_r plus grand : démarrage plus lent, freinage plus rapide
		Palier à roulements	3 s	5 s	Nulle	Pertes moins importantes, C_r plus petit : démarrage plus rapide, freinage moins rapide

9 Document élève : tableau essais

Séquence permettant d'identifier et de caractériser les pertes

Problématique

Dans la phase 2 (stockage), on observe une perte de vitesse sur la maquette sensorielle. Dans le module « volant d'inertie », comment réduire les frottements aux paliers ?

Protocole

Comparer un palier lisse et un palier à roulements. L'arbre avec deux disques acier est entraîné en rotation par deux masselottes qui déroulent un cordon de 1 m [7]. Le temps de déroulage t_d est plus important avec le palier lisse (6 s au lieu de 3 s).

Après décrochage (instant 2), l'ensemble {2, 3} continue de tourner. L'élève constate que la vitesse diminue jusqu'à l'arrêt (instant 3). Le temps de freinage t_f est plus petit avec le palier lisse qu'avec le palier à roulements.

Interprétation des résultats

Il n'y a pas de poignée {7, 8}, donc pas de sortie d'énergie, $E_s = 0$. Paradoxe, où est passée l'énergie d'entrée ? Elle a été intégralement consommée par des forces internes F_i (frottements au sein du palier = travail résistant) et transformée en chaleur. L'élève complète le tableau [9].

Calcul des pertes au palier

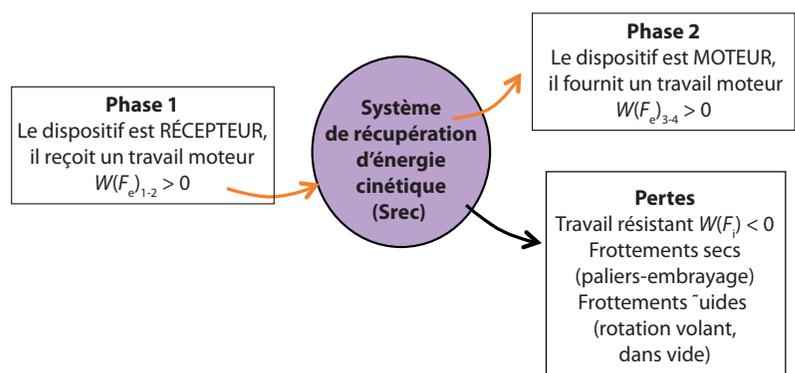
Les pertes au palier proviennent du travail des forces intérieures $W(F_i)_{2-3}$. Le calcul se fait dans la phase freinage, entre l'instant 2 (décrochage cordon) et l'instant 3 (arrêt) :

$$\begin{aligned} \Delta(E_k + E_p)_{2-3} &= \Delta E_m = W(F_i)_{2-3} \\ \frac{1}{2} J\omega_3^2 - \frac{1}{2} J\omega_2^2 &= W(\overrightarrow{F_e})_{2-3} + W(\overrightarrow{F_i})_{2-3} \\ &= 0 \text{ connue (calcul)} = 0 \text{ calculée} \end{aligned}$$

Conclusion

L'élève déduit de l'expérience précédente qu'un palier à roulements réduit les pertes, donc améliore le rendement du système.

Par ailleurs, le concepteur a réduit les frottements fluides en plaçant le volant dans un carter sous vide [4].



10 Échanges énergétiques avec l'extérieur

Synthèse

L'élève consigne par écrit le bilan des échanges énergétiques du Srec [10].

Conclusion

Cette démarche d'apprentissage – toujours reliée à une problématique technique – part de l'expérience pour aller vers la loi, jamais l'inverse. Mais l'observation, à elle seule, ne fait pas jaillir la théorie ; la démarche doit être structurée en faisant varier un paramètre à la fois, par exemple. Les élèves sont guidés dans le processus d'apprentissage par des protocoles simples, rapides à mettre en œuvre, sans instrumentation complexe. Il y a souvent des obstacles, des surprises, dans les résultats qui stimulent l'imagination. Les observations associent les perceptions du corps sensible (vue, toucher, ouïe) pour donner du sens aux définitions des grandeurs et des lois que l'élève retrouve dans le dossier ressource. Les essais avec les maquettes peuvent ensuite être comparés à une simulation numérique. Il sera alors possible d'interpréter les écarts, car les hypothèses simplificatrices ont du sens. Ces maquettes modélisent les systèmes de façon analogique. Elles reprennent leurs caractéristiques cinématiques (rotation), de frottement, de masse et d'inertie. Elles sont une interface entre le comportement du système réel et sa formalisation. ■

[4] Solution technologique développée dans un article prochain « Maquettes sensorielles en dynamique ».