

Bilan d'une chaîne énergétique et conséquences

par Richard LAFFONT
Lycée Victor Duruy - 40000 Mont-de-Marsan

Le T.P. proposé dans cet article concerne la classe de première S et éventuellement la classe de terminale.

Prérequis

Professeur : utilisation d'un tableur de type WORKS ou EXCELL.

Élèves : utilisation de multimètres et oscilloscope.

1. OBJECTIFS

- Quantifier les transferts d'énergie entre trois réservoirs par l'intermédiaire de deux convertisseurs.
- Analyser le bilan au sein de chaque convertisseur et de la chaîne afin d'en dégager le meilleur régime de fonctionnement.
- Remarquer qu'un alternateur est plus difficile à entraîner lorsqu'il débite un courant et en dégager une conséquence sur la consommation d'une automobile de nuit.

2. ÉQUIPEMENT

– Un ordinateur avec une feuille de calcul prédéfinie qui permettra l'affichage de divers graphiques (possibilité d'échanger, avec les collègues intéressés, la disquette contenant le fichier fonctionnant sous WORKS).

Par binôme il faut :

- un module moteur-génératrice «courant continu»,
- une alimentation pour le moteur,
- une alimentation pour les optocoupleurs,
- un rhéostat de charge à sept lampes en dérivation,

- quatre multimètres,
- un oscilloscope.

3. DISPOSITIF EXPÉRIMENTAL

Voir livre de physique première S - Collection Durandeu - pages 238-239-240. La valeur de la constante de torsion du ressort est $C = 3.10^{-3} \text{ N.m.rad}^{-1}$ (comme indiqué sur le matériel) et non pas celle imprimée à la page 239.

4. DÉROULEMENT DE LA SÉQUENCE DE T.P.

Il est préférable que les élèves prennent connaissance du protocole en lisant le manuel avant la séquence.

Le câblage du dispositif est assez rapide.

La première série de huit mesures correspond à la variation de la charge aux bornes de la génératrice sans modifier l'alimentation du moteur ($U_M = \text{cste}$). En effet on peut alimenter de une à sept ampoules ou ne pas mettre de charge en la faisant tourner «à vide». Les élèves reporteront leurs mesures dans des tableaux vierges préalablement distribués par le professeur.

La deuxième série de huit mesures correspond toujours au nombre de lampes branchées en parallèle aux bornes de la génératrice mais cette fois on augmente la tension aux bornes du moteur pour maintenir la vitesse de rotation (de l'arbre coupleur) constante. Ainsi on compense le couple résistant, développé par la génératrice quand elle débite un courant.

Chaque binôme doit rentrer ses mesures à l'ordinateur ; imprimer sa feuille de calcul et quelques graphiques (disponibles dans l'affichage).

5. COMPTE-RENDU DES ÉLÈVES

(travail du binôme à rédiger pour la semaine suivante)

- Les élèves disposent ensuite d'un questionnaire (les réponses souhaitées sont en italique).

Ils doivent prendre conscience du domaine pratique d'utilisation d'un convertisseur (rendement maximum).

Après avoir rafraîchi leurs notions sur l'induction et la force de Laplace les élèves pourront remarquer que la génératrice est plus difficile à entraîner quand elle débite un courant.

Peut être est-il possible de toucher du doigt la loi de Lenz (de façon qualitative) ?

– Enfin un schéma d'une «automobile» roulant de jour ou de nuit leur permettra de faire le bilan des différents échanges d'énergie et d'arriver à la conclusion...

Une voiture consomme plus avec les phares allumés...

Nota : Cette hausse n'est quasiment pas sensible.

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier M. Gérard PINOT qui m'a converti à l'usage des tableurs pour de nombreux travaux pratiques.

T.P. 1 : MESURES

T.P. 2 : EXPLOITATION ET CALCULS

1° série de mesures à UM=cste

Charge		Moteur		Génératrice		Signaux des Optocoupleurs						
		UM en V	IM en mA	UG en V	IG en mA	Période et fréquences du signal OPC1			Retard du signal OPC2 / OPC1			
Nb de lampes	Rc en Ohms					Base de temps	Nb de div	T en s	f en Hz	Base de temps	Nb de div	t2-t1 en s
0	infinie	6,18	340	4,5	0	2,0E-03	6,9	1,380E-02	72,46	5,0E-04	1	5,00E-04
1	2,00	6,13	503	3,17	178	2,0E-03	7,9	1,580E-02	63,29	5,0E-04	4,2	2,10E-03
2	1,00	6,1	606	2,31	295	2,0E-03	8,8	1,760E-02	56,82	5,0E-04	6,8	3,40E-03
3	0,67	6,08	683	1,7	380	2,0E-03	9,6	1,920E-02	52,08	5,0E-04	9	4,50E-03
4	0,50	6,06	736	1,27	439	5,0E-03	4,2	2,100E-02	47,62	1,0E-03	5,5	5,50E-03
5	0,40	6,06	771	0,963	477	5,0E-03	4,3	2,150E-02	46,51	1,0E-03	6,2	6,20E-03
6	0,33	6,05	809	0,735	512	5,0E-03	4,45	2,225E-02	44,94	1,0E-03	6,8	6,80E-03
7	0,29	6,04	826	0,54	530	5,0E-03	4,6	2,300E-02	43,48	1,0E-03	7,3	7,30E-03

Exploitation de la 1° série de mesures

CHARGE		COUPLAGE				MOTEUR		GÉNÉRATRICE		CHAÎNE	
		vitesse de rotation w en rad/s	angle de torsion teta en rad	couple de rappel M en N.m	Puissance mécanique PM en W	P élec reçu PEM en W	rM en %	P élec cédée PEG en W	rG en %	rCH en %	
0	infinie	455,3	0,228	6,830E-04	0,311	2,10	14,80	0,000	0,00	0,00	
1	2,00	397,7	0,835	2,505E-03	0,996	3,08	32,31	0,564	56,64	18,30	
2	1,00	357,0	1,214	3,641E-03	1,300	3,70	35,17	0,681	68,42	18,43	
3	0,67	327,2	1,473	4,418E-03	1,446	4,15	34,82	0,646	64,68	15,56	
4	0,50	299,2	1,646	4,937E-03	1,477	4,46	33,12	0,558	57,75	12,50	
5	0,40	292,2	1,812	5,436E-03	1,589	4,67	34,00	0,459	28,92	9,83	
6	0,33	282,4	1,920	5,761E-03	1,627	4,89	33,24	0,376	23,13	7,69	
7	0,29	273,2	1,994	5,983E-03	1,634	4,99	32,76	0,286	17,51	5,74	

2° série de mesures à w=este

Charge		Moteur		Génératrice		Signaux des Optocoupleurs						
Nb de lampes	Re en Ohms	UM en V	IM en mA	UG en V	IG en mA	Période et fréquence du signal OPC1			Retard du signal OPC2 / OPC1			
						Phase de temps	Nb de div	T en s	f en Hz	Base de temps	Nb de div	t2-t1 en s
0	infinie	6,6	375	4,84	0	2,0E-03	6	1,200E-02	83,33	1,0E-04	1,3	1,30E-04
1	2,000	7,47	590	3,96	195	2,0E-03	6	1,200E-02	83,33	2,0E-04	7,2	1,44E-03
2	1,000	8,17	765	3,27	352	2,0E-03	6	1,200E-02	83,33	5,0E-04	5	2,50E-03
3	0,667	8,68	900	2,7	472	2,0E-03	6	1,200E-02	83,33	5,0E-04	6,6	3,30E-03
4	0,500	9,17	1020	2,29	573	2,0E-03	6	1,200E-02	83,33	5,0E-04	7,8	3,90E-03
5	0,400	9,56	1080	1,82	638	2,0E-03	6	1,200E-02	83,33	5,0E-04	8,4	4,20E-03
6	0,333	9,65	1120	1,5	686	2,0E-03	6	1,200E-02	83,33	1,0E-03	4,6	4,60E-03
7	0,286	10,03	1160	1,19	748	2,0E-03	6	1,200E-02	83,33	1,0E-03	5	5,00E-03

Exploitation de la 2° série de mesures

CHARGE	Nombre de lampes	Rc en Ohms	vitesse de rotation w en rad/s	COUPLAGE			MOTEUR			GENERATRICE		CHAINE	
				angle de torsion teta en rad	couple de rappel M en N.m	Puissance mécanique PM en W	P élec reçu PEM en W	rM en %	rG en %	rCH en %			
0	infinie	523,6	523,6	0,068	2,042E-04	0,11	2,48	4,32	0,00	0,00	0,00	0,00	
1	2,00	523,6	523,6	0,754	2,262E-03	1,18	4,41	26,87	0,77	65,20	17,52	17,52	
2	1,00	523,6	523,6	1,309	3,927E-03	2,06	6,25	32,90	1,15	55,98	18,42	18,42	
3	0,67	523,6	523,6	1,728	5,184E-03	2,71	7,81	34,74	1,27	46,95	16,31	16,31	
4	0,50	523,6	523,6	2,042	6,126E-03	3,21	9,35	34,29	1,31	40,91	14,03	14,03	
5	0,40	523,6	523,6	2,199	6,597E-03	3,45	10,32	33,46	1,16	33,61	11,25	11,25	
6	0,33	523,6	523,6	2,409	7,226E-03	3,78	10,81	35,01	1,03	27,20	9,52	9,52	
7	0,29	523,6	523,6	2,618	7,854E-03	4,11	11,63	35,35	0,89	21,65	7,65	7,65	

T.P. 3 : GRAPHIQUES

- Sélectionner les graphiques voulus (représentations cartésiennes prédéfinies dans le menu «affichage»).
- Relier les points expérimentaux si nécessaire.
- Analyser la variation de vos couples de grandeurs physiques.

Transformateur d'énergie électrique en énergie mécanique

$rM = f(PEM)$ à $UM = cste.$

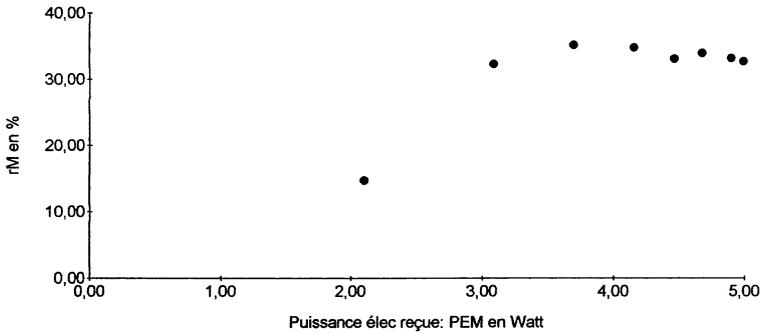


Figure 1

Transformateur d'énergie mécanique en énergie électrique

$rG = f(PM)$ à $UM = cste.$

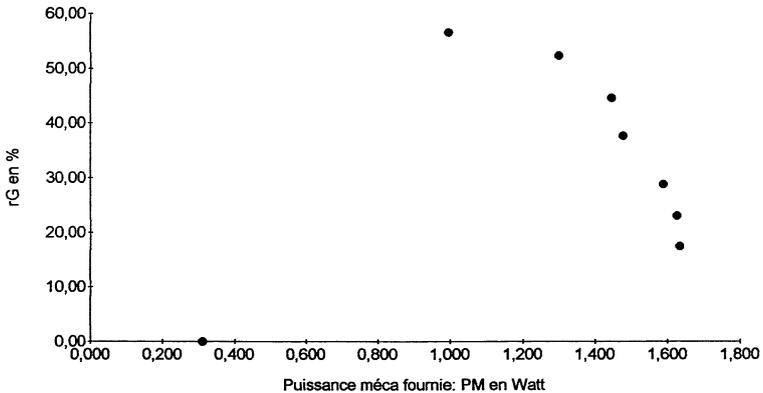


Figure 2

Rendement de la chaîne en fonction de la charge

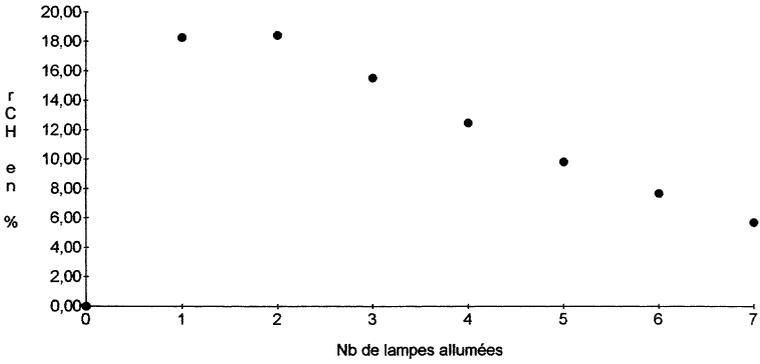


Figure 3

Énergie électrique restituée

$rCH = f(PEM)$ à $UM = cste.$

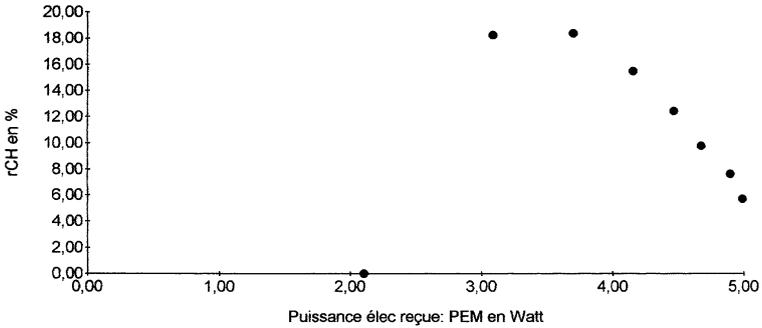


Figure 4

Couple de torsion en fonction de w

$M = f(w)$ à $UM = \text{cste.}$

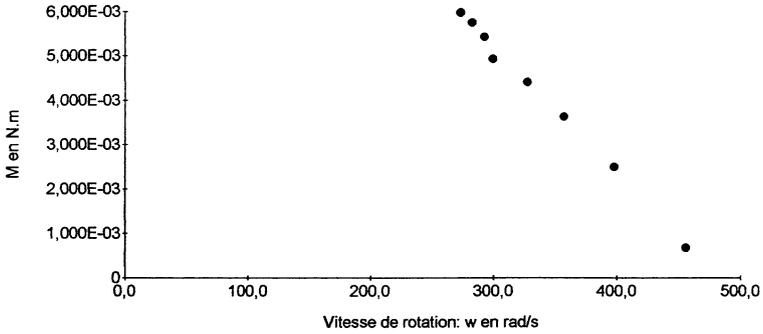


Figure 5

Couple de torsion en fonction de I_m

$M = f(I_m)$ à $UM = \text{cste.}$

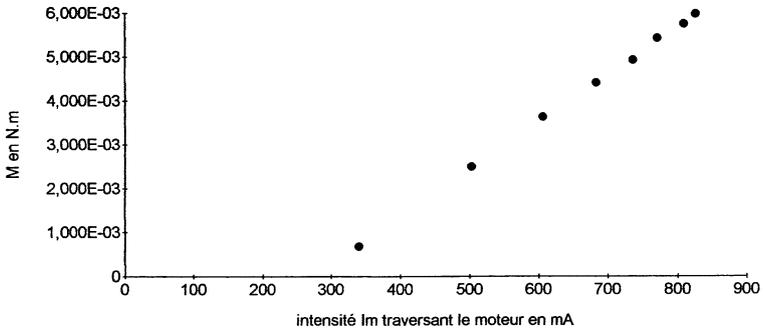


Figure 6

Caractéristique de la génératrice

$U_g = f^\circ(I_g)$ à vitesse de rotation CSTE.

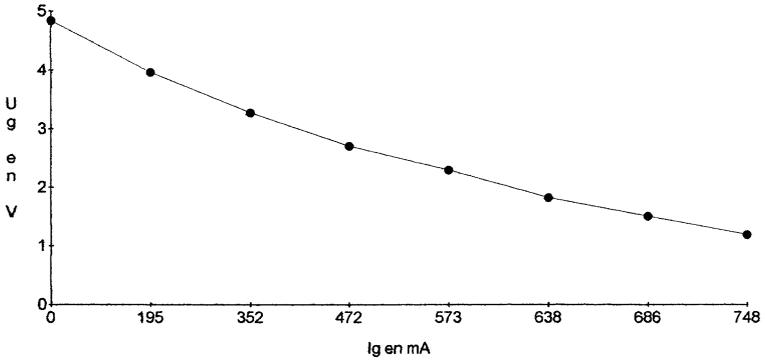


Figure 7

Fonctionnement du moteur en charge

$w = f(I_m)$ à $U_M = cste$.

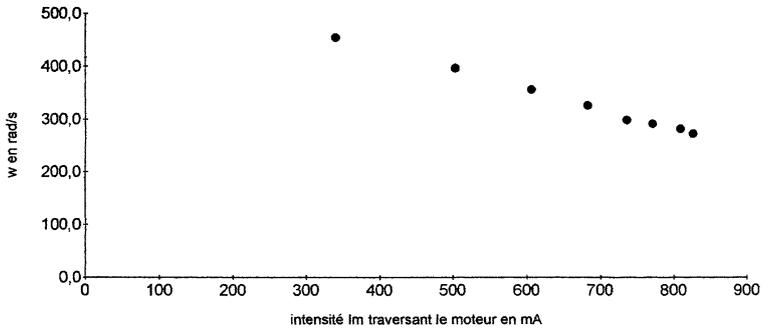


Figure 8

T.P. 4 : OBSERVATIONS

- Quels sont les deux principaux constituants d'un moteur ? (seconde)
- Quels sont les deux principaux constituants d'une génératrice ? (seconde)

De par leurs conceptions similaires, ils peuvent tous les deux changer de l'énergie mécanique en énergie électrique et réciproquement.

En classe de seconde, on a pu constater que la tension induite aux bornes de la génératrice augmentait avec la vitesse de déplacement de l'aimant par rapport à la bobine.

- Dès qu'on allume une lampe, que se passe-t-il ? (observation)

Ce courant débité par la génératrice semble créer un effet antagoniste à la rotation de l'ensemble. Tout se passe comme si le courant généré pour alimenter la charge incitait la génératrice à se comporter comme un moteur résistant au mouvement qu'elle subit.

- Comment varie la charge aux bornes de la génératrice quand on augmente le nombre de lampes allumées ?

Si on fait l'approximation de considérer les sept ampoules en parallèle comme une association de sept conducteurs ohmiques en dérivation (formule de calcul retenue dans le tableur), alors la charge a une résistance équivalente qui diminue avec le nombre de lampes connectées.

Si la résistance d'un circuit série diminue alors l'intensité augmente.

Remarque : *En toute rigueur la caractéristique d'une ampoule est différente de celle d'une résistance. Ce n'est pas une droite mais une branche croissante courbée vers l'axe des tensions.*

- Cette augmentation du courant (débité par la génératrice) confirme-t-elle votre analyse faite quand on allume la première ampoule ?

Oui, *plus la génératrice débite, plus elle semble résister au mouvement qu'elle subit.*

- Résumer ce phénomène observé «d'auto régulation» (ou de rétroaction).

Les effets (tension induite et donc courant débité) semblent s'opposer à leur cause (rotation de la génératrice).

Remarque : Cette loi de Lenz sera revue en classe de terminale de façon plus approfondie.

- Analyser vos courbes, délimiter pour chaque convertisseur et pour la chaîne des domaines d'utilisation rentable. Comparer la caractéristique de la génératrice à celle d'une pile.

D'après notre étude :

– le moteur converti au mieux 35 % de l'énergie électrique reçue en énergie mécanique. Il faut alors lui fournir entre 3,5 et 4 Watts pour avoir une moindre proportion de pertes par frottement et par effet Joule ;

– la génératrice converti au mieux 57 % de l'énergie mécanique reçue en énergie électrique. Il faut alors lui fournir 1 Watt ;

– la chaîne restituée au mieux 18,5 % de l'énergie électrique reçue. Ce rendement maximum correspond au meilleur rapport entre l'énergie cédée par la génératrice et la dépense nécessaire pour lui communiquer ce mouvement de rotation correspondant. Au-delà, il faut trop «dépenser» pour entraîner une génératrice qui n'arrive pas forcément à alimenter correctement le trop grand nombre d'ampoules. On peut imaginer un cycliste, qui ayant mal choisi sa génératrice ainsi que la charge à ses bornes, peine pour progresser au ralenti sans obtenir la puissance nominale pour ses différents appareils ;

– la caractéristique de la génératrice n'est pas linéaire. Elle décroît plus vite que celle d'une pile dès qu'on lui demande une intensité plus forte.

T.P. 5 : CONCLUSION

En accord avec les observations et les graphiques obtenus, on peut conclure que :

- plus la génératrice débite, plus elle résiste et donc la vitesse de rotation diminue,
- soit encore : plus le moteur force pour l'entraîner (c'est-à-dire qu'à tension constante, l'intensité qui le traverse augmente), plus l'angle de torsion augmente (ainsi que le moment qui lui est proportionnel).

T.P. 6 : CONSÉQUENCES

Si l'on veut bénéficier d'une même vitesse de rotation de l'arbre, tout en connectant une ampoule à la génératrice, il faudra fournir plus de puissance au moteur pour compenser ce couple résistant.

Évaluer l'augmentation relative de puissance à fournir au moteur, pour allumer une ampoule sans modifier la vitesse de rotation.

Cela revient à simuler une automobile qui maintient son allure tout en mettant les phares. Ici l'accélérateur est un potentiomètre.

D'après la deuxième série de mesures et le tableau de calcul correspondant, on a :

pour : $T = 6 \times 2 \text{ ms} = 12 \text{ ms} = 0,012 \text{ s}$

ou : $f = 83,33 \text{ Hz}$

la fréquence d'un signal aux bornes d'un optocoupleur ce qui correspond à une rotation de 83,33 tr/s soit 5 000 tr/min.

Si la génératrice ne débite pas, le moteur doit recevoir une puissance électrique $P_{EM} = 6,6 \times 0,375 = 2,48 \text{ W}$ pour tourner à 5 000 tr/min.

Si la génératrice débite pour alimenter une ampoule alors elle résiste et freine la rotation. Et donc pour maintenir 5 000 tr/min, je dois (grâce au potentiomètre) fournir plus de puissance au moteur. En effet $P_{EM} = 7,47 \times 0,59 = 4,41 \text{ W}$.

Maintenir la rotation à 5 000 tr/min tout en alimentant une ampoule nécessite 78 % de puissance en plus...

Remarque : Heureusement que pour une voiture l'ordre de grandeur est bien moindre.

*Étude des transformations d'énergie au sein d'une voiture
«en plein jour»*

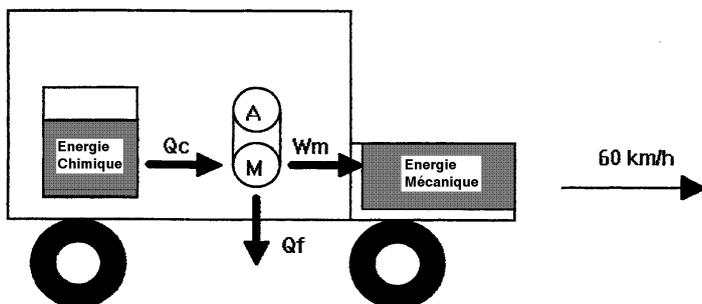


Figure 9

*Étude des transformations d'énergie au sein d'une voiture
phares allumés*

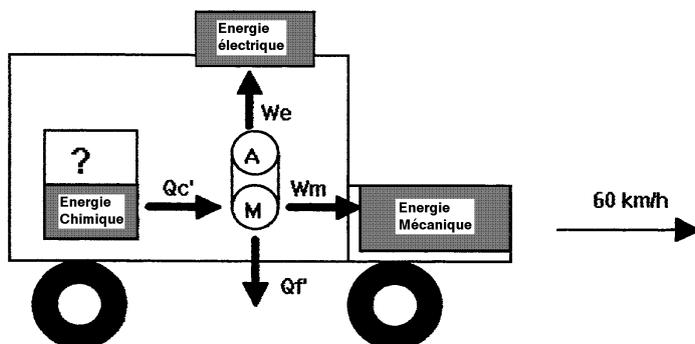


Figure 10

Ce dessin a pour vocation d'inviter les élèves à faire un bilan énergétique au sein de la voiture pour une même vitesse mais avec deux configurations différentes pour l'alternateur.

Dans le premier cas l'alternateur ne débite pas (de jour).

Dans le deuxième cas l'alternateur débite pour alimenter les phares (de nuit).

Qualitativement les élèves doivent arriver à la conclusion escomptée : **«une voiture consomme plus les phares allumés».**

Légende

Réservoirs d'énergie

- *Énergie chimique* : carburant + air.
- *Énergie mécanique* : rotation du moteur ainsi que toutes les pièces qui lui sont couplées.
- *Énergie électrique* : disponible aux bornes de l'alternateur pour alimenter les différents dipôles branchés en dérivation.

Convertisseurs

- *M* : moteur.
- *A* : alternateur entraîné en permanence par le moteur grâce à une courroie.

Échanges d'énergie

- *Q_c* et *Q_c'* : échanges de chaleur entre la source de chaleur «chaude» et le moteur.
- *Q_f* et *Q_f'* : échanges de chaleur entre le moteur et la source de chaleur «froide».
- *W_m* : travail mécanique fourni par le moteur pour entraîner l'alternateur et les différents éléments nécessaires à la traction du véhicule.
- *W_e* : travail électrique fourni par l'alternateur aux différents dipôles branchés en parallèle.

Cette liste d'échanges d'énergie pourrait prendre en compte des transferts de chaleur par frottement mécanique, par effet Joule, etc.