

## 1. Clefs de compréhension des motorisations : le véhicule

« Impose ta chance, serre ton bonheur, et va vers ton risque

A te regarder, ils s'habitueront. »

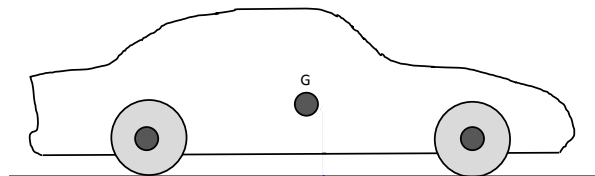
René Char (1907 – 1988), in Les Matinaux.

Cette séance se focalise sur l'analyse des besoins de motorisation d'un système, en analysant ses principaux usages. Cette analyse s'appuie sur les outils fondamentaux de la mécanique établis par Newton. Dans cette première séance, le cas d'usage retenu est celui du véhicule routier. Nous la finirons par un petit détour par le véhicule hybride. En 1997, Toyota se lançait seul, mais résolu, dans la commercialisation de ce type de véhicule. Avec l'opiniâtreté des peuples qui savent vivre chaque jour avec l'incertain, Toyota a su créer puis imposer la révolution électrique qui secoue aujourd'hui les fondements de l'industrie automobile et plus largement de la mobilité.

### 0. Avant la séance : préparer sa boîte à outils

0.1. Rappeler les 3 lois de Newton orchestrant la mécanique.

0.2. Donner leur cadre d'application.



On s'intéresse au dimensionnement de la motorisation d'un véhicule de segment moyen. Les paramètres du véhicule et du parcours sont données ci-dessous :

#### Véhicule :

- Masse :  $M = 1300 \text{ kg}$
- Coefficient de trainée de roulement :  $f = 0,01$

Note 1 : Pour assurer le roulement sans glissement de la roue sur le sol, il existe une force de contact à la liaison roue-sol proportionnelle à la réaction normale du sol (charge verticale N) :

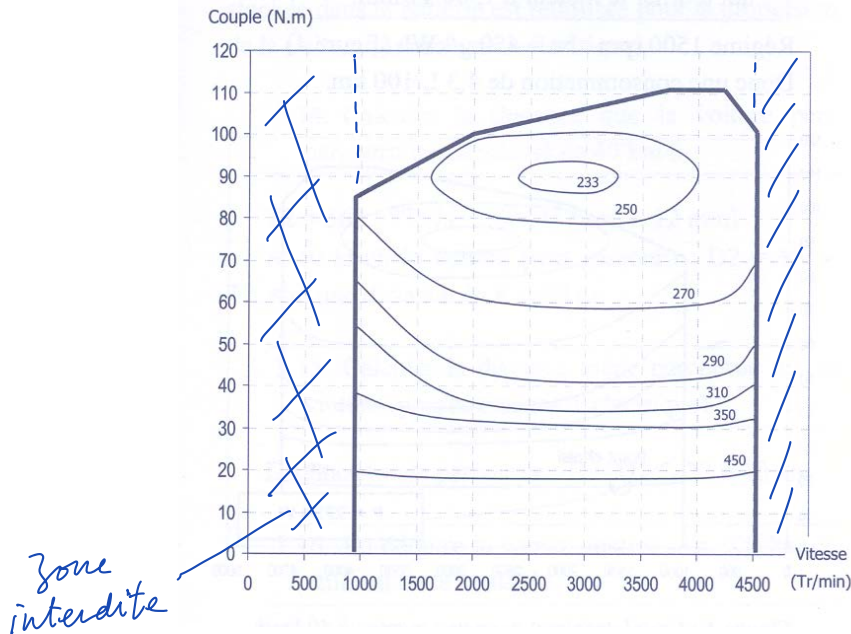
$$F_{\text{contact}} = fN$$

- Surface frontale :  $S = 2,50 \text{ m}^2$
- Coefficient de trainée aérodynamique :  $C_x = 0,30$

Note 2 : La force nécessaire pour déplacer l'air est donnée par l'expression :

$$F_{\text{aero}} = \frac{1}{2} \rho S C_x V^2$$

- Diamètre des roues :  $D = 643 \text{ mm}$
- Moteur thermique du groupe motopropulseur : (cartographie reproduite à la dernière page)



- Boîte de vitesse à 5 rapports donnant, pour une rotation du moteur de 1000 *tour/min*, les 5 vitesses suivantes :
  - $V_1 = 7,3 \text{ km.h}^{-1}$
  - $V_2 = 13,7 \text{ km.h}^{-1}$
  - $V_3 = 19,3 \text{ km.h}^{-1}$
  - $V_4 = 25,4 \text{ km.h}^{-1}$
  - $V_5 = 32,3 \text{ km.h}^{-1}$

Parcours routier étudié (à plat et sans vent) :

- Distance à parcourir entre deux feux :  $D = 1 \text{ km}$
- Accélération de démarrage :  $a_a = +1 \text{ m.s}^{-2}$
- Accélération d'arrêt :  $a_d = -1 \text{ m.s}^{-2}$
- Vitesse de croisière :  $V_p = 80 \text{ km/h}$

Données supplémentaires :

- Masse volumique de l'air ambiant :  $\rho = 1,3 \text{ kg.m}^{-3}$
- Accélération de la pesanteur :  $g = 10 \text{ m.s}^{-2}$
- Valeurs maximales d'adhérence sollicitée  $\mu_{max}$  pour des pneumatiques en bon état :
  - Pneumatique – goudron sec : 0,8 à 1,0
  - Pneumatique – goudron humide (0,2 mm d'eau) : 0,50 à 0,65
  - Pneumatique – goudron mouillé (1 mm d'eau) : 0,3 à 0,50
  - Pneumatique – glace : 0,1 au plus !

Note 3 : On appelle « adhérence sollicitée »  $\mu$  le rapport entre l'effort horizontal  $|T|$  et la charge verticale  $N$  :

$$\mu = \frac{|T|}{N}$$

Note 4 : le but du fabricant de pneumatiques est de maximiser  $\mu_{max}$  et de minimiser  $f$ .

- Essence :
  - Pouvoir calorifique inférieur (PCI):  $47,3 \text{ MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$
  - densité :  $d = 0,72$



✍ On demande :

### 1. Point dimensionnant – montée à vitesse constante

Le véhicule doit être capable de maintenir une vitesse de  $108 \text{ km/h}$  lorsqu'il suit une rampe de 8%. (La pente est le rapport entre la différence d'altitudes et la distance horizontale entre ces deux points. Une pente de 100% correspond donc à une inclinaison de  $45^\circ$ .)

- 1.1. Déterminer la force motrice nécessaire pour hisser le véhicule à cette vitesse.
- 1.2. En déduire la puissance nominale du moteur.
- 1.3. En se fondant sur la cartographie du moteur thermique (cf annexe), déterminer le(s) rapport(s) de la boîte de vitesse qui est(sont) mobilisable(s) pour assurer ce point de fonctionnement.

### 2. Etude d'un trajet typique

Le véhicule doit être également capable d'effectuer le trajet typique décrit en annexe.

- 2.1. Etablir la durée  $T$  du parcours type.
- 2.2. Etablir la force motrice  $F_{mot}$  nécessaire tout au long du trajet.
  - a) Donner son expression
  - b) Tracer son allure temporelle, en donnant les valeurs numériques de ses points caractéristiques.
- 2.3. En déduire la puissance que doit développer le moteur  $P_{mot}$  tout au long du trajet.
  - a) La puissance établie en 1 est-elle suffisante ?
  - b) Quels sont les points les plus contraignants du parcours ?
- 2.4. En déduire, l'énergie de traction nécessaire sur le trajet dans les deux cas.
  - a) véhicule à moteur thermique.
  - b) véhicule à moteur électrique alimenté par batterie.
- 2.5. Cas du véhicule électrique avec motorisation de l'essieu avant :
  - a) Pourquoi ne peut-on pas récupérer l'intégralité de l'énergie cinétique de translation ? Est-ce dommageable ?

- b) Les moteurs électriques des véhicules ont une vitesse maximale d'environ 12000 *tours/min*. Pour pouvoir assurer une vitesse de croisière allant jusqu'à 130 *km/h*, que faut-il placer entre le moteur et les roues ?
- c) Une boîte de vitesses à plusieurs rapports est-elle nécessaire ?
- d) En s'appuyant sur l'hypothèse (très approximative) d'une charge verticale identique sur chaque essieu, il vous est demandé de déterminer l'adhérence sollicitée au freinage
- dans le cas classique de  $a = -1 \text{ m.s}^{-2}$
  - dans le cas de l'arrêt d'urgence de  $a = -5 \text{ m.s}^{-2}$
- et d'indiquer l'implication sur la récupération effective d'énergie au freinage du véhicule.



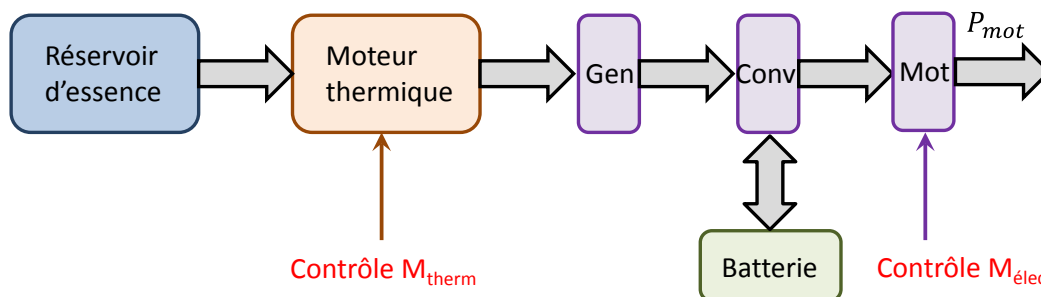
Fin de la partie visée. La curiosité peut nous pousser plus loin...

### 3. Hybridation

Dans cette partie, on souhaite indiquer quel avantage énergétique on cherche à tirer de l'hybridation des motorisations. On se place dans le cas de l'hybridation série que l'on retrouve dans les locomotives diesel, les paquebots, ... et même dans la BMW i3 lorsqu'elle utilise son prolongateur d'autonomie connecté à son petit réservoir d'essence (5 L).

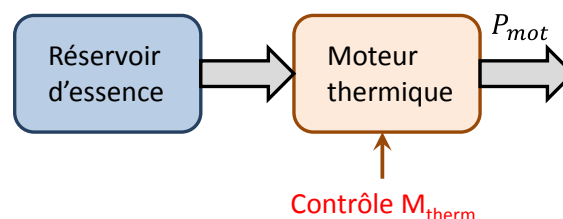
Le principe de l'hybridation série est donné dans le synoptique ci-dessous dans lequel « Gen » et « Mot » sont deux machines électriques permettant

- pour « Gen », de générer de l'énergie électrique à partir de la puissance mécanique fournie par le moteur thermique auquel cette machine est accouplée ;
- pour « Mot », de générer la puissance de traction/freinage en étant reliée à l'essieu avant par l'intermédiaire d'un réducteur à rapport de transformation unique.



#### 3.1. Véhicule purement thermique

- a) Dans le cas d'un véhicule purement thermique, comment est déterminée la commande du moteur thermique ?



- b) En se fondant sur la cartographie du moteur thermique fournie en annexe, déterminer la consommation du véhicule « thermique pur » lors d'un trajet (plat et sans vent) à la vitesse de croisière de  $80 \text{ km/h}$ . Pour cela :
- Etablir le rapport de vitesse le plus intéressant du point de vue énergétique pour effectuer ce parcours.
  - En déduire la consommation minimale d'essence en  $L$  pour  $100 \text{ km}$  parcourus.

### 3.2. Véhicule hybride

Dans le cas du véhicule hybride, comment sont déterminées les commandes

- du moteur électrique ?
- du moteur thermique ?

### 3.3. Véhicule hybride : étude d'une stratégie de pilotage du moteur thermique.

Dans cette stratégie, le moteur thermique suit un cycle constitué de 2 phases consécutives :

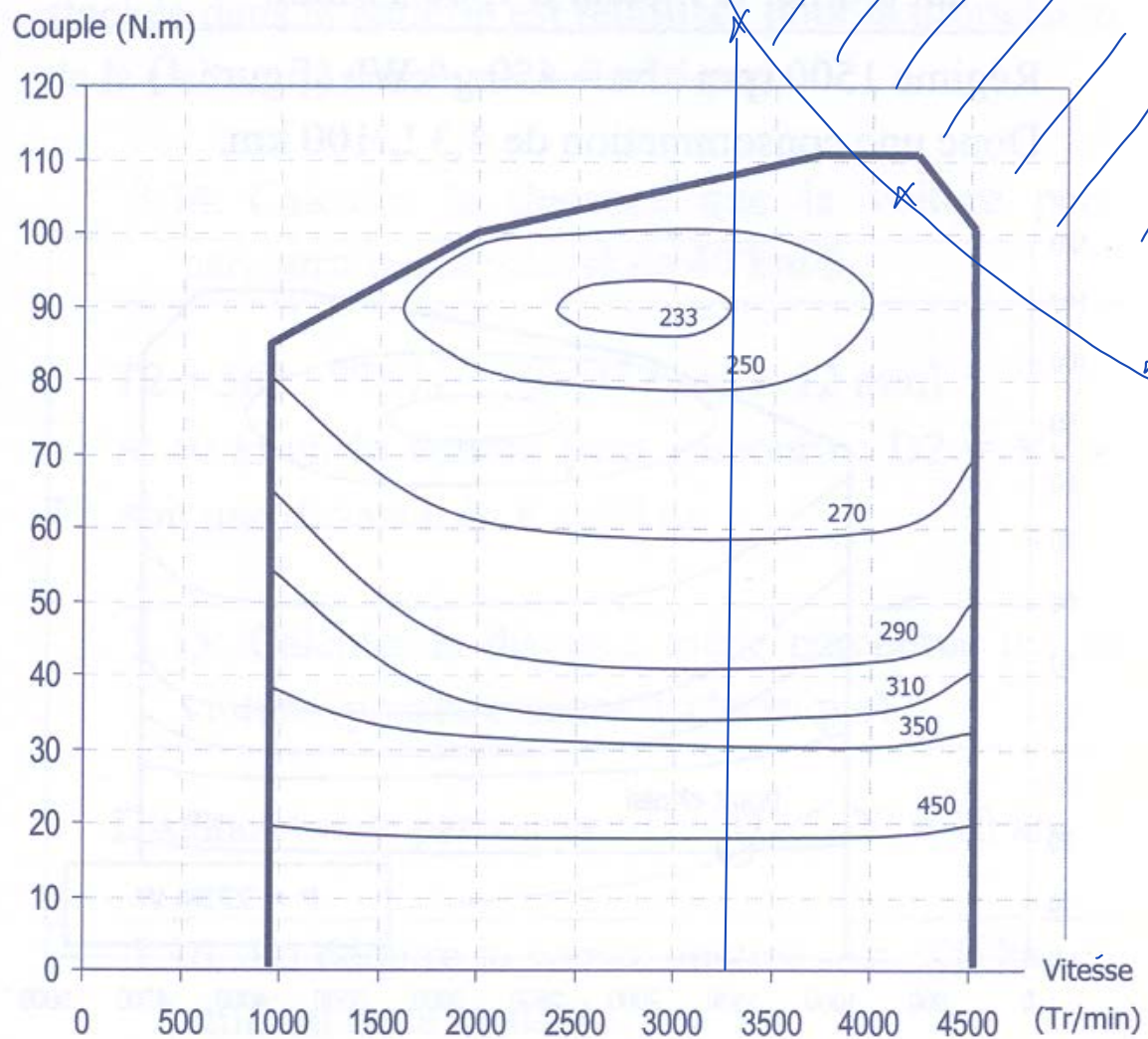
- Dans un premier temps, le moteur à essence fonctionne 10 minutes en tournant à son point de fonctionnement optimal.
- Dans un second temps, le moteur thermique est coupé.

Pour comparer la consommation obtenue à celle du véhicule purement thermique, on vous demande de :

- Déterminer le volume d'essence consommé lors de la première phase.
- Déterminer la durée  $T_2$  de la seconde phase.
- Déduire la consommation d'essence en  $L$  pour  $100 \text{ km}$  parcourus.
- La réalité est moins intéressante que les promesses. Pourriez-vous en trouver quelques raisons ?



👉 A bientôt pour une mise en application de ces principes sur un autre objet technique...

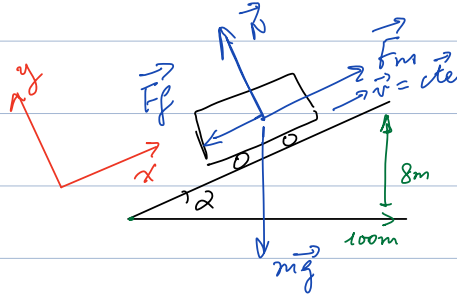


👉 Cartographie du moteur : **iso-consommation – explication et unité**

Sur la cartographie moteur, les courbes en très fin correspondent aux iso-consommations du moteur. Ces iso-consommation sont données en énergie. L'unité est en grammes d'essence par kWh mécanique fourni par le moteur.

$$I) \quad \sum \vec{F}_{ext} = m \frac{d\vec{v}}{dt}$$

$$P_{mot} = \vec{F}_{mot} \cdot \vec{v}$$



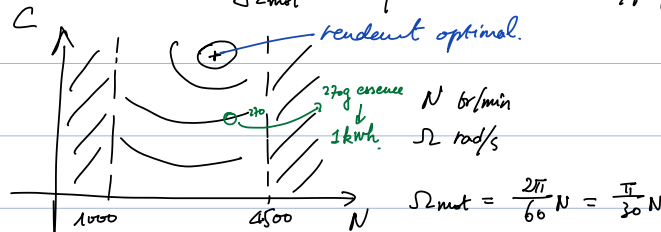
$$\alpha = \arctan(0.08) \approx 0.08 \text{ rad}$$

$$\sum \vec{F}_{ext} = \vec{0} \Rightarrow \begin{cases} \text{Sur } O_x: F_{mot} - F_f - mg \sin \alpha + 0 = 0 \\ \Rightarrow F_{mot} = (mg \sin \alpha) + (fN + \frac{1}{2} \rho C_x V^2) \\ \text{Sur } O_y: 0 - mg \cos \alpha + N = 0 \\ \Rightarrow N = mg \cos \alpha \approx mg = 13000 \text{ N} \end{cases}$$

limite puissance moteur

$$P_{mot} = Fv = 1605 \cdot 30 = 48.2 \text{ kW} = C_{mot} \cdot \Omega_{mot}$$

$$C_{mot} = \frac{P_{mot}}{\Omega_{mot}} \quad \text{à puissance donnée, hyperbole.}$$



$$\textcircled{5} \quad \Omega = 350 \text{ rad/s} \rightarrow C = 137 \text{ Nm}$$

$$\textcircled{4} \quad \Omega = 445 \text{ rad/s} \rightarrow C = 108 \text{ Nm}$$

$$\textcircled{3} \quad \Omega = 586 \text{ rad/s} \rightarrow C = 82 \text{ Nm}$$

$$\begin{array}{rcl} 8.97 & & \\ 32.3 & 30 & \\ 1000 & \downarrow & \\ & 3230 \text{ tr/min.} & \\ & \Omega = 350. & \end{array}$$

$$\begin{aligned} a &= 1 \text{ m/s}^2 \\ v(t) &= \int a(t) dt = a \cdot t \\ t_a \hookrightarrow v(t_a) &= 22 \text{ m/s} = a \cdot t_a \\ t_a &= \frac{v}{a} = \frac{22}{1} = 22 \text{ s} \end{aligned}$$

$$d_a = \frac{1}{2} \cdot v_c \cdot t_a = \frac{22^2}{2} = 242 \text{ m}$$

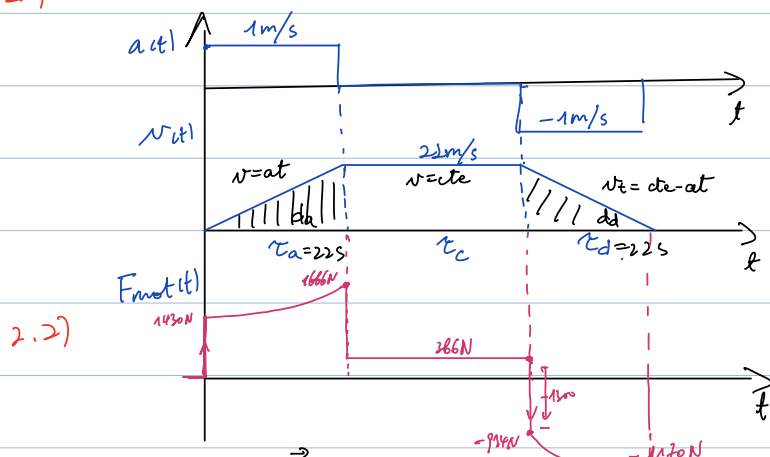
$$d_d = d_a = 242 \text{ m}$$

$$d_c = L - 2d_a = 516 \text{ m}$$

$$= v_c \cdot t_c \Rightarrow t_c = \frac{516}{22} = 23.1 \text{ s}$$

$$\begin{array}{c} A \xrightarrow{1 \text{ km}} B \\ \textcircled{2.1) \quad 67.1 \text{ s}} \end{array}$$

II)



$$\sum \vec{F} = m \frac{d\vec{v}}{dt}$$

$$F_m - f = m a_x \Rightarrow F_m = f + m a_x$$

$$F_m = (fN + \frac{1}{2} \rho S C_x V^2) + (m a_x)$$

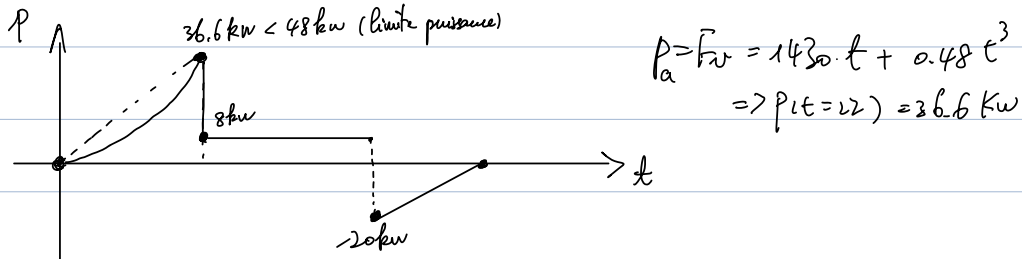
$$f = \frac{1}{2} \rho S C_x = \frac{1.3 \cdot 2.5 \cdot 5}{2} = 0.48$$

a)  $\bar{f}_m = \overset{\text{max}}{1300} + \overset{fN}{130} + (\frac{1}{2} \cdot 9.81 \cdot t^2)$   $1430 + 0.48 \cdot t^2 = 266.732 \text{ N}$

c)  $F_m = 0 + 130 + 236 = 366 \text{ N}$   $= 1430 + 0.48 \cdot t^2 \quad (v = at)$

d)  $F_m = -1300 + 130 + (\frac{1}{2} v^2)$

2.3)



2.4)

thermique: pousser les gaz (donc freiner)

inertie dans le moteur thermique

électrique: puissance freinage récupérable  $\rightarrow$  frein actif.

thermique: frein par frottement  $\rightarrow$  chaleur, perdue.

$$P(t) = \frac{dE}{dt} \Rightarrow E(t) - E(0) = \int_0^t P(t) dt$$

$$\begin{aligned} \Sigma_a E(t) &= \int_0^t P(t) dt \\ &= 1430 \frac{t^2}{2} + 0.48 \frac{t^4}{4} \\ E(t=22) &= 374.2 \text{ kJ} \end{aligned}$$

