

Question 18 : écrire la relation entre la composante normale N_A et la composante tangentielle T_A de l'action de contact route/roue dans le cas d'un roulement sans glissement.

Question 19 : en appliquant le théorème de l'énergie cinétique à l'ensemble {cycliste+vélo}, en déduire l'expression de la puissance mécanique notée $P_{méca}$ fournie par le cycliste lors de l'ascension d'une pente d'angle α à la vitesse V . Exprimer $P_{méca}$ en fonction de $M, g, C_x, \rho, S, f, \alpha$ et V .

On se place dans le cas du duathlon du Pilat de septembre 2011.

Caractéristiques du parcours vélo

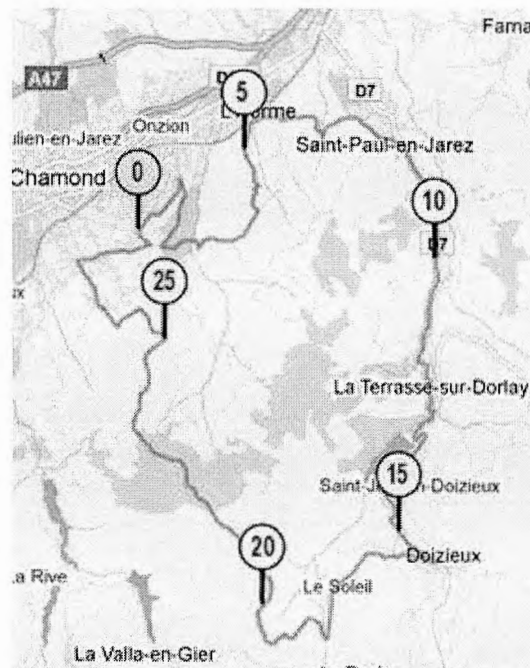


Figure 8 : parcours vélo du duathlon du Pilat

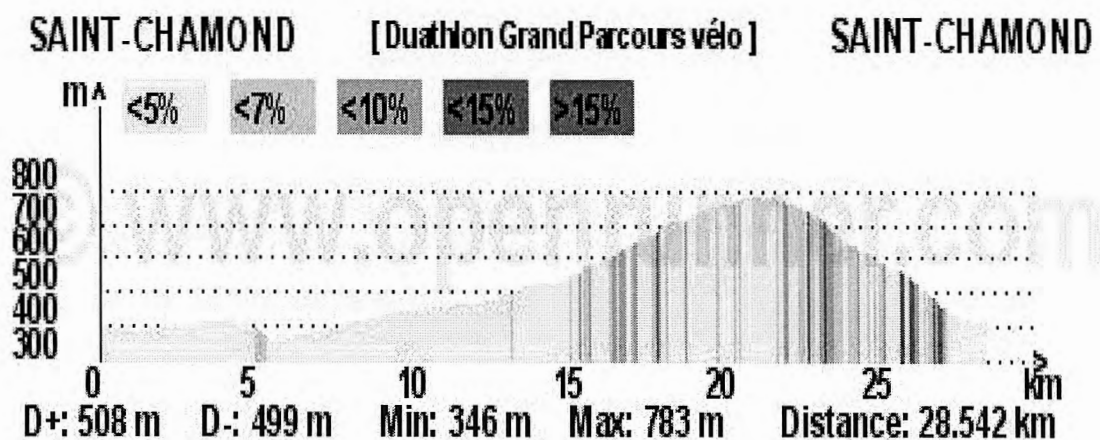


Figure 9 : dénivelé du parcours vélo du duathlon du Pilat.

Caractéristiques du vainqueur de la course

Taille : 1,70 m

Masse : 70 kg

Masse du vélo : 8 kg

Relevé des temps intermédiaires du vainqueur

Parcours	Début parcours	Début ascension		Fin ascension	Fin parcours
Kilomètre du parcours vélo	0	6	15	21	28,542
Temps intermédiaire	00:34:20	00:44:50	00:57:08	1:24:26	1:34:46

Le tableau ci-dessous indique les valeurs typiques de surface frontale S , de coefficient aérodynamique C_x , de coefficient de roulement f pneu/route et la masse volumique de l'air ρ suivant l'altitude.

Valeurs typiques de la surface frontale en m^2 notée « S » en m^2	Valeurs typiques du coefficient aérodynamique « C_x »
0,45 taille comprise entre 1,85 et 1,80 pour 80 kg	Cycliste moyen 0,800
0,425 taille comprise entre 1,80 et 1,75 pour 75 kg	+/- facteurs qui influencent le coefficient aérodynamique
0,4 taille comprise entre 1,75 et 1,70 pour 65 kg	-0,05 en cas de roues aérodynamiques
+/- Facteur de correction corporelle	-0,012 si équipement aérodynamique (casque)
+0,025 si 5 kg en plus par rapport au poids indiqué	+0,012 si équipement large ou de vêtements qui flottent au vent
-0,025 si 5 kg en moins par rapport au poids indiqué	-0,012 si vélo avec profil aérodynamique
+0,025 si position haute sur le vélo	+0,012 si position haute sur le vélo
-0,025 si position basse sur le vélo	-0,012 si position basse sur le vélo
Valeurs typiques du coefficient de roulement f	Valeurs typiques de la densité de l'air ρ ($kg \cdot m^{-3}$)
0,011 vélodrome	1,225 à 0 m
0,012 ciment	1,167 à 500 m
0,014 asphalte rugueux	1,111 à 1 000 m
0,016 asphalte route en mauvais état	1,0057 à 1 500 m

Question 20 : à l'aide des figures précédentes, déterminer la longueur de l'ascension du col du parcours vélo ainsi que son dénivelé et en déduire l'inclinaison moyenne en %.

Question 21 : dans le cadre uniquement de l'ascension du duathlon, calculer la puissance développée par le vainqueur de la course.

Question 22 : conclure quant au niveau sportif du vainqueur du duathlon du Pilat, en vous aidant de la figure 6.

Partie 2.2. : étude du capteur de puissance.

Pour maîtriser sa course, le cycliste doit connaître sa puissance développée et ainsi éviter l'épuisement lors de la compétition, le coureur cycliste a besoin de connaître sa puissance développée à tout instant. Pour cela les cyclistes professionnels munissent leurs vélos de capteur de puissance type SRM dont la précision est définie à +/- 0,5%. Un objectif de gain de puissance de 20 W sur une saison est un objectif raisonnable pour un cycliste professionnel. La précision du capteur est donc un critère fondamental pour pouvoir mesurer la progression du sportif et valider l'efficacité des séances d'entraînement.

Nous rappelons ici qu'une puissance mécanique notée $P_{méca}$ (en watt) est une quantité de travail (en joules) accomplie par unité de temps (en seconde) et que dans le cas du cyclisme, nous l'obtenons par le produit du couple (force appliquée sur les manivelles en rotation) ($N \cdot m$) par la vitesse de pédalage (en $rad \cdot s^{-1}$).

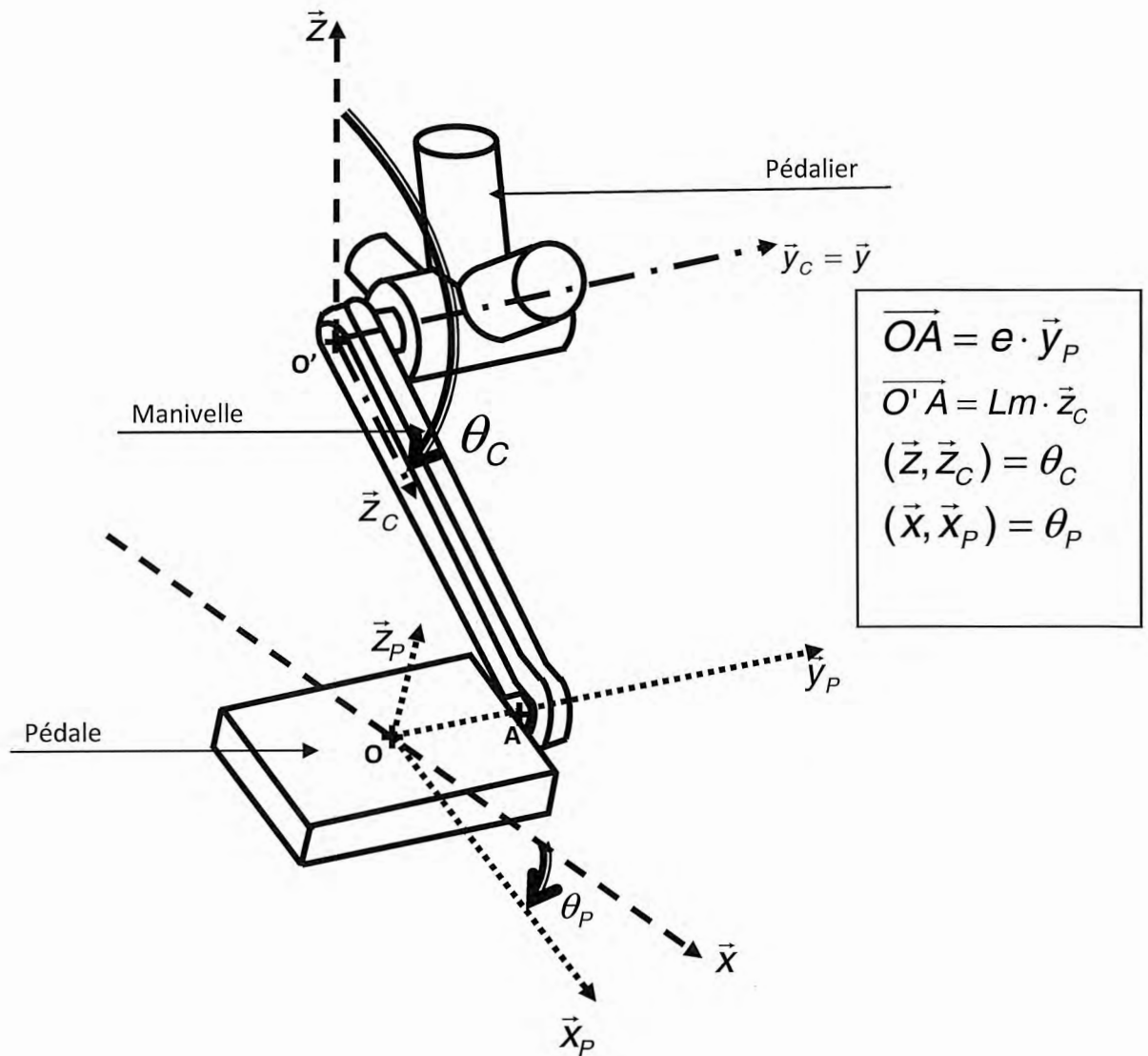
Objectif : déterminer l'endroit le plus adéquat sur le vélo pour effectuer la mesure du couple de pédalage.

La force appliquée sur les manivelles à une certaine vitesse de pédalage renvoie à la $P_{méca}$. Dans la partie précédente, nous avons vu que pour se déplacer, le cycliste doit vaincre les différentes résistances externes à son avancement. Il doit donc créer au niveau du pédalier un couple de pédalage noté C_p , à partir des moments articulaires de la hanche, du genou et de la cheville.

La figure ci-dessous schématise le système de transmission de l'action mécanique exercée par le cycliste au vélo :

Notations :

- $R(O, \vec{x}, \vec{y}, \vec{z})$ repère lié à la route où \vec{x} est la direction du déplacement du vélo (horizontale) ;
- $R(O, \vec{x}_C, \vec{y}_C, \vec{z}_C)$ repère lié à la manivelle ;
- $R(O, \vec{x}_P, \vec{y}_P, \vec{z}_P)$ repère lié à la pédale ;
- O centre de la pédale ;
- (O, \vec{y}_C) axe de rotation du pédalier dans son mouvement par rapport à la manivelle ;
- (O, \vec{y}_P) axe de rotation de la pédale dans son mouvement par rapport à la manivelle ;
- e demi-largeur de la pédale ;
- L_m longueur de la manivelle.



Hypothèses :

- la pédale est en liaison pivot parfaite avec la manivelle ;
- la manivelle est en liaison pivot parfaite avec le pédalier ;
- l'action mécanique de la chaussure sur la pédale est modélisable par un glisseur.

$$\{T(\text{chaussure} \rightarrow \text{pédale})\} = \begin{Bmatrix} Fx \cdot \vec{x}_P + Fy \cdot \vec{y}_P + Fz \cdot \vec{z}_P \\ \vec{0} \end{Bmatrix}$$

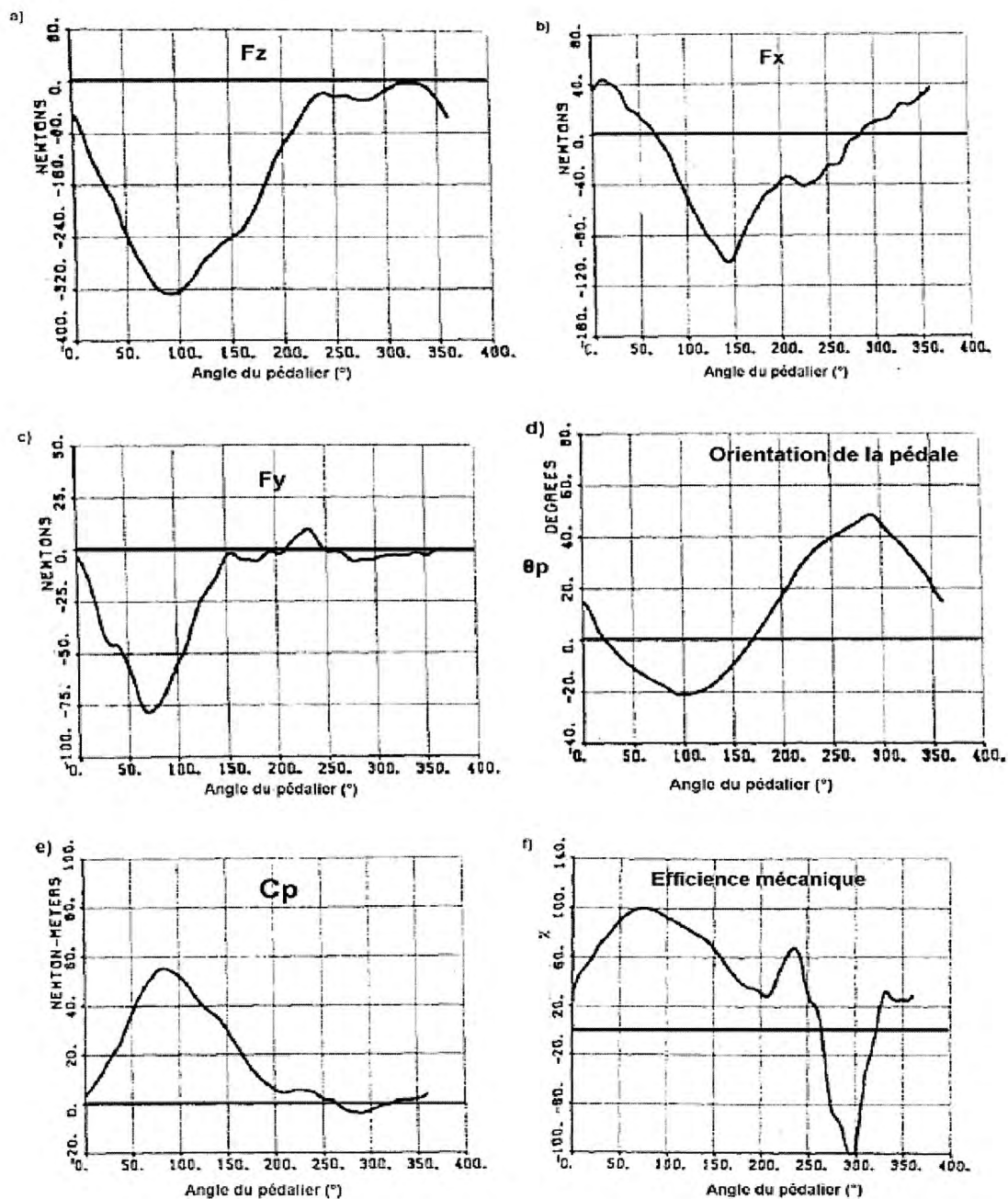
F_x est appelée la composante tangentielle
 F_y est appelée la composante transversale
 F_z est appelée la composante normale

Question 23 : tracer les figures planes faisant apparaître les angles θ_P et θ_C

Question 24 : exprimer le torseur de l'action de la chaussure sur la pédale en O' . En déduire les expressions des composantes M_x , M_y et M_z du couple de pédalage en fonction de F_x , F_y , F_z , θ_C , θ_P , e et Lm .

Question 25 : en déduire l'expression du couple propulsif notée C_p en fonction de $F_x, F_z, \theta_c, \theta_p, e$ et L_m .

Un vélo instrumenté muni de capteurs pour la mesure des efforts sur les pédales, d'un capteur de couple sur le pédalier et de capteurs d'angles a permis de réaliser les relevés suivant chez un cycliste pédalant à $80 \text{ tr}\cdot\text{min}^{-1}$ sur un ergomètre à rouleau à la vitesse de $33 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$:



Question 26 : à partir des courbes ci-dessus, indiquer la valeur du couple propulsif maximal C_{pmax} noté $C_{pmax}(\text{mesuré})$ et la position de la manivelle pour laquelle cette valeur maximale est atteinte.

Question 27 : à partir des courbes ci-dessus, relever F_z et F_x pour la position de la manivelle où le couple maximal est atteint.

Question 28 : à l'aide des valeurs de F_x et F_z relevées à la question précédente et l'expression du couple C_{pmax} de la question n°25, calculer C_{pmax} noté $C_{pmax}(\text{calculé})$.

Question 29 : comparer vos résultats C_{pmax} (mesuré) et C_{pmax} (calculé). Conclure en précisant les avantages et les inconvénients d'une mesure du couple propulsif produit par le coureur par une mesure des efforts sur les pédales, par une mesure du couple sur le pédalier ou par une mesure du couple sur le moyeu de la roue arrière.

Objectif : mesurer précisément la vitesse du vélo.

Pour mesurer la puissance, les coureurs montent des systèmes type PowerMeter SRM qui se compose d'un capteur de couple (non étudié ici) et d'un capteur de mesure de la vitesse du vélo. Le SRM existe sans fil, transmission 2,4 GHz compatible ANT+, ce qui permet de visualiser sur l'écran du PowerControl : puissance, vitesse, distance, intervalle, zones d'intensité, fréquence cardiaque, chronomètre, altitude et température.



Système PowerMeter de SRM



Système PowerControl de SRM

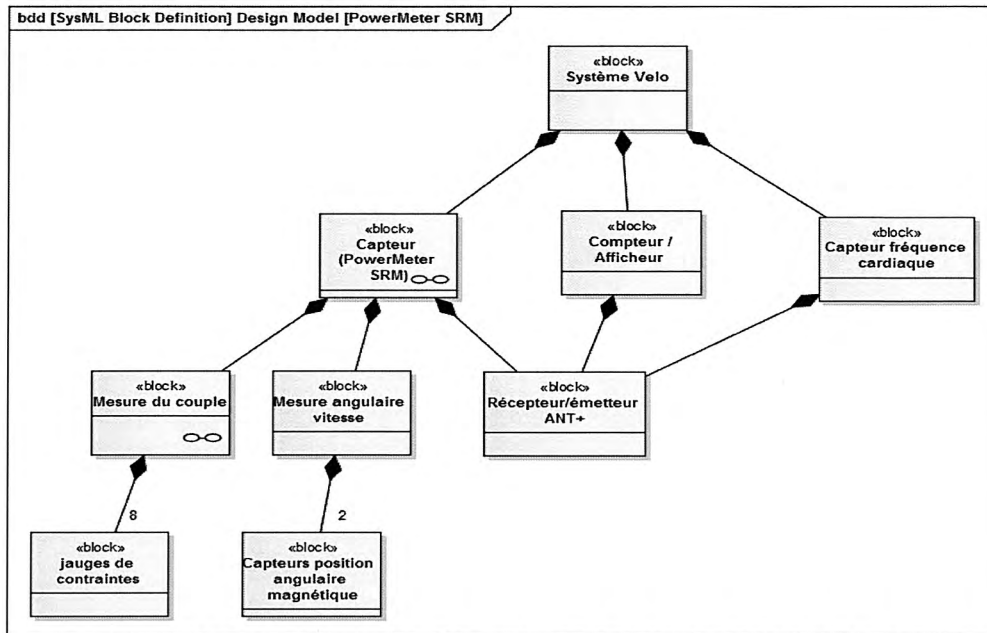


Figure 10 : diagramme de définitions de blocs du PowerMeter SRM

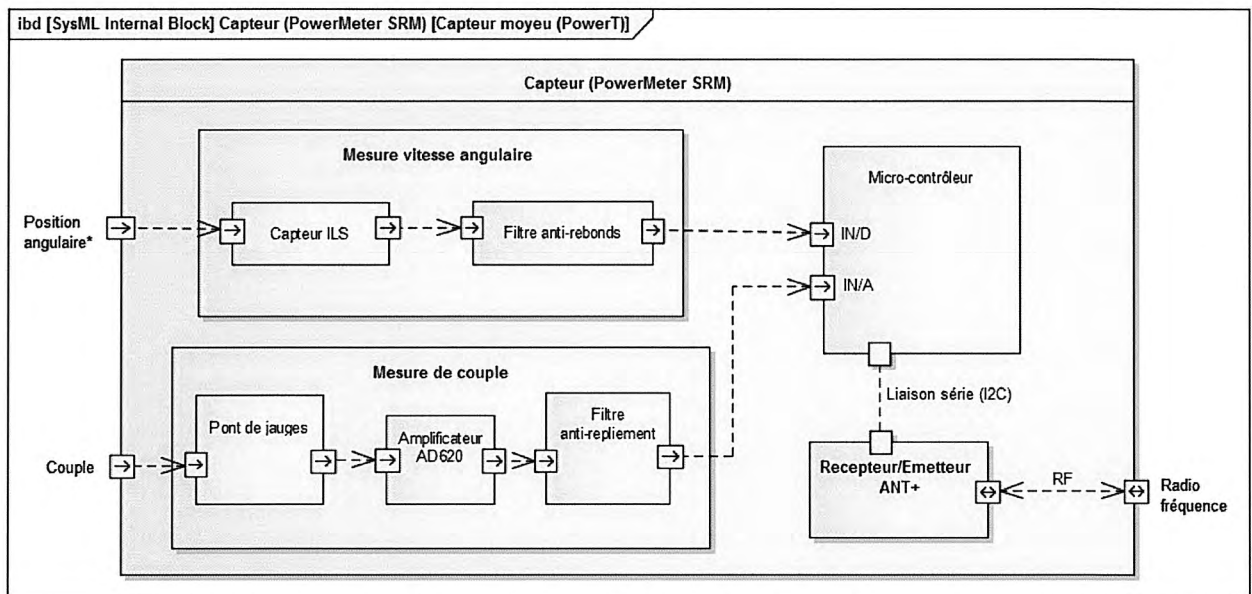


Figure 11 : diagramme de blocs interne du PowerMeter SRM

La vitesse du vélo est mesurée par un capteur magnétique qui détecte la position de deux aimants diamétralement opposés sur l'essieu.

Données

Diamètre de la roue $D_{roue} = 700$ mm

Plage de vitesses = 3 à 95 km·h⁻¹

Question 30 : exprimer le temps entre deux impulsions T_i en fonction de la vitesse d'avance du vélo V en m·s⁻¹.

Question 31 : déterminer la durée minimale T_{imin} en seconde entre deux impulsions du capteur.

Question 32 : déterminer le nombre total de commutations effectué par le détecteur de position lorsque le vélo aura parcouru 50 000 km.

Deux technologies de détecteur ont été envisagées : à effet Hall et ILS (Interrupteur Lame Souple). Les caractéristiques d'un détecteur à effet Hall et d'un détecteur ILS sont données en annexe 3.

Question 33 : écrire les principes de fonctionnement du capteur à effet Hall et de l'ILS.

Question 34 : comparer les caractéristiques des deux technologies en cochant dans le tableau du document réponses le type de détecteur qui est le plus performant pour chaque critère.

La solution retenue est le détecteur ILS.

Question 35 : conclure sur la validité du choix du détecteur ILS à répondre aux contraintes de l'application.

Objectif : adapter la cadence de pédalage en fonction de la puissance à fournir.

À vélo, la puissance à fournir pour rouler à une vitesse donnée peut être obtenue en en mettant l'accent :

- sur la cadence, on mouline alors à haute fréquence ;
- ou sur l'effort, on enroule alors un plus gros braquet (plateau-pignon) en tournant les jambes plus lentement.

Les vélos de course comportent au moins 2 braquets différents au niveau du pédalier et 10 pignons sur la roue arrière.

Braquet	Pignon
Zb1 = 53 dents	Zp1 = 11 dents
Zb2 = 42 dents	Zp2 = 12 dents
	Zp3 = 13 dents
	Zp4 = 14 dents
	Zp5 = 15 dents
	Zp6 = 16 dents
	Zp7 = 18 dents
	Zp8 = 20 dents
	Zp9 = 22 dents
	Zp10 = 24 dents

Question 36 : combien le vélo comporte-t-il de vitesses possibles ?

Question 37 : calculer le plus petit rapport de réduction de la chaîne de transmission du vélo? Justifier pourquoi cette configuration est appelée la 1^{ère} vitesse ? Dans quelle situation de route est-elle utilisée ?

Question 38 : exprimer la vitesse du vélo V en $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ en fonction de la cadence de pédalage N_p en $\text{tr}\cdot\text{min}^{-1}$, de Z_b , Z_p et D_{roue} (D_{roue} diamètre de la roue).

Question 39 : calculer N_p dans le cas où le vélo se déplace à $25 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ en première vitesse pour une roue de vélo de 700 mm de diamètre.

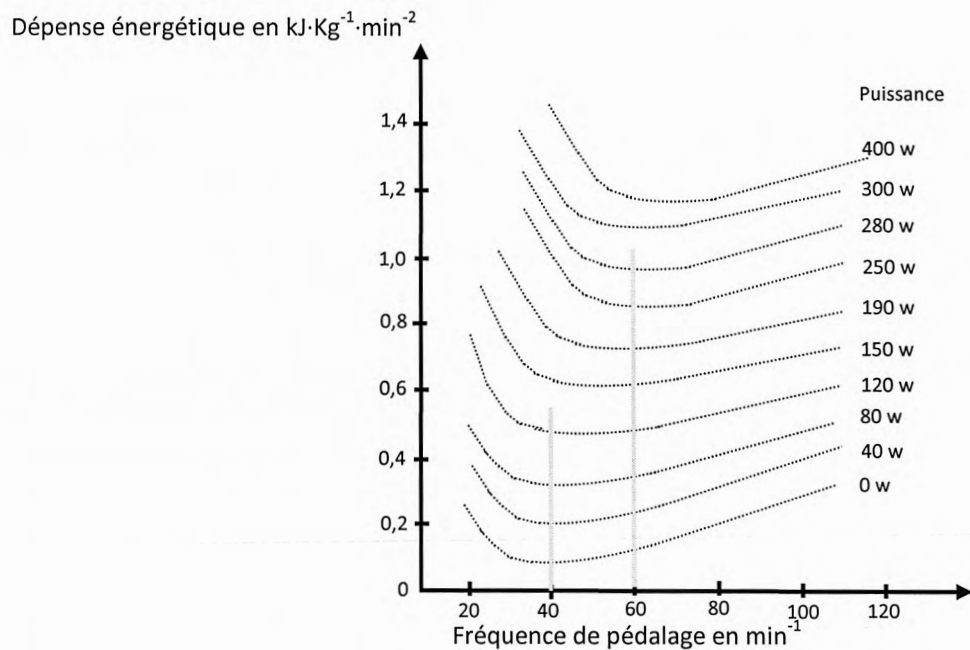


Figure 12 : dépense énergétique en fonction de la cadence.

Question 40 : en vous référant aux courbes de la figure 12 ci-dessus, déterminer la cadence de pédalage optimale pour le duathlon sachant que le vainqueur de la course a fourni une puissance de 400 W à une vitesse de $25 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ en moyenne lors de la phase montagnaise du duathlon.

Question 41 : conclure en déterminant le choix braquet-pignon qui permet le meilleur rendement énergétique, utilisé par le vainqueur de la course lors de son ascension ?

3^e PROBLÉMATIQUE : ASSURER L'ENTRAÎNEMENT DES CYCLISTES

Objectif principal : obtenir avec un système « home-trainer » un entraînement sportif sur vélo équivalant à un entraînement réel sur route.

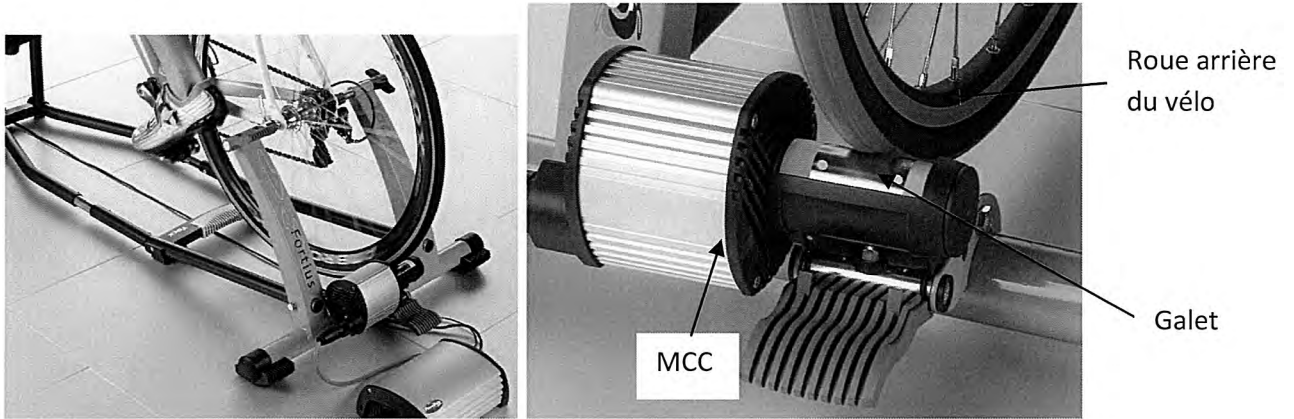
L'home-trainer est un appareil permettant d'utiliser son propre vélo pour s'entraîner chez soi lorsque les conditions climatiques ne permettent pas de le faire à l'extérieur.

L'objectif du système home-trainer est de simuler le plus fidèlement possible les sensations ressenties sur la route avec la possibilité d'évoluer dans des parcours virtuels proposés par le logiciel associé. Le logiciel simule des adversaires gérés par le système ou des adversaires réels connectés sur Internet. Dans ce module, il est également possible de paramétrer les conditions météorologiques



telles que la pluie ou le vent. Le rendu des différents parcours est particulièrement réaliste avec de nombreux détails tels que : spectateurs sur le bord de la route, promeneurs, petits et gros animaux, avions, etc.

Le home-trainer étudié est composé d'un puissant frein moteur électrique (machine à courant continu) qui simule, avec la même résistance que celle ressentie sur la route, les ascensions, mais également les descentes. La puissance maximale absorbée au niveau de la roue arrière est annoncée à 1 200 watts (moyenne sur un cycle de pédalage). Le home-trainer récupère l'énergie fournie par le cycliste pour la transmettre au réseau électrique sur lequel il est branché (230 V, 50 Hz), ce système de récupération d'énergie est identique à ceux utilisés sur les métros ou les trains lors du freinage. En fonction du contexte, la machine à courant continu (MCC) fonctionne comme un moteur dans les descentes et comme un générateur dans les montées. La puissance de la machine à courant continu est transmise directement à la roue par frottement par l'intermédiaire d'un galet situé sur l'arbre moteur.



Le vélo est fixé par la roue avant, la roue arrière est en liaison avec un galet, le galet est en liaison directe avec une machine à courant continu, la machine est alimentée par le réseau (230 V, 50 Hz) via un convertisseur alternatif/continu.

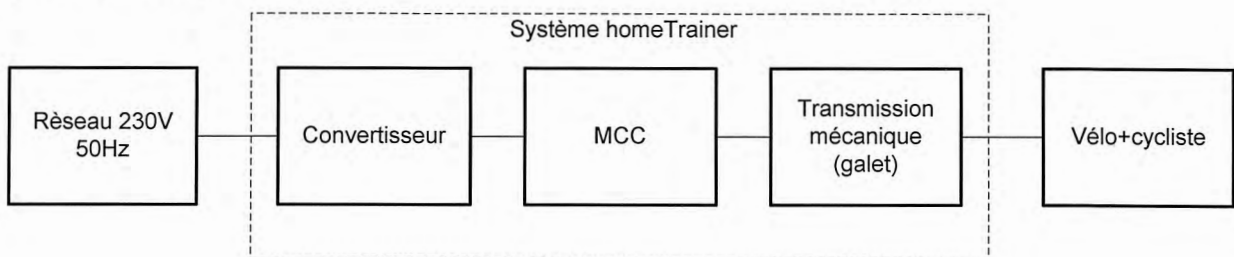


Figure 13 : chaine d'énergie du home-trainer.

Notations et grandeurs numériques

Grandeurs cinématiques

- ω_{roue} fréquence de rotation de la roue arrière du vélo par rapport au châssis
- ω_m fréquence de rotation du rotor de la machine CC par rapport au stator

Actions mécaniques

Tous les moments sont ramenés autour de l'axe de rotation du galet

- C_m moment de l'action mécanique du stator sur le rotor de la machine CC
- C_{cyc} moment de l'action mécanique du cycliste
- C_{pente} moment des actions mécaniques de pesanteur dans les conditions réelles
- C_{aero} moment de l'action mécanique des forces aérodynamiques sur le cycliste dans les conditions réelles
- C_{roulPR} moment de l'action mécanique résultant du roulement pneu/route
- C_{roulPG} moment de l'action mécanique résultant du roulement pneu/galet

Caractéristiques de la machine à courant continu

- U_m tension moteur
 I_m courant moteur
 P_n puissance nominale
 K_e constante de fem
 K_t constante de couple

Données constructeurs

- P_{mMax} = 2 000 W
 C_{mMax} = 4,8 N·m
 ω_{mMax} = 850 rad·s⁻¹

Dimensions

- R_{roue} rayon du pneu de la roue du vélo (R_{roue} = 350 mm)
 R_{galet} rayon du galet (R_{galet} = 20 mm)

Grandeurs inertielles

- J_g moment d'inertie du rotor moteur et du galet autour de leur axe de rotation
 $J_g = 0,4 \cdot 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$
 J_{cv} moment d'inertie équivalent du cycliste et du vélo autour de l'axe de rotation du galet

Autres grandeurs

- M masse de l'ensemble cycliste + vélo (M = 80 kg)

Partie 3.1. : étude de la chaîne d'énergie

Objectif : déterminer les caractéristiques principales des convertisseurs afin d'optimiser les transferts de la chaîne d'énergie.

Une simulation du système home-trainer permet d'obtenir le tracé C_m en fonction ω_m de la MCC en convention moteur (voir figure 16) dans le document réponses. Le fonctionnement représente le cas d'une descente, le cycliste part à l'arrêt en P0, il pédale jusqu'à P1 puis arrête de pédaler en P2. Entre P2 à P3 le home-trainer simule la phase de décélération puis en P3 la phase de descente à vitesse constante en roue libre.