

SUJET :	VAE	THEME :	<i>Les nouvelles mobilités individuelles</i>
Question sociétale :	<i>Comment développer l'utilisation du vélo ?</i>		

ACTIVITE : COMPARAISON D'UN VAE AVEC UN SCOOTER

Compétences
Analyser le besoin, l'organisation matérielle et fonctionnelle d'un produit par une démarche d'ingénierie système
Caractériser la puissance et l'énergie nécessaire au fonctionnement d'un produit ou un système
Repérer les échanges d'énergie sur un diagramme structurel
Caractériser les grandeurs physiques en entrées – sorties d'un modèle multi-physique (transmission de puissance)
Associer un modèle aux composants d'une chaîne de puissance
Modéliser sous une forme graphique un circuit
Déterminer les grandeurs flux (courant) et effort (tension) dans un circuit électrique
Prévoir l'ordre de grandeur de la mesure
Conduire des essais en toute sécurité à partir d'un protocole expérimental fourni

I. MISE EN SITUATION

La poste d'Obernai s'est équipée de Vélos à Assistance Electrique (VAE) pour ses facteurs, pour remplacer une partie des scooters qui étaient utilisés. L'objectif est de répondre aux questions suivantes :

- ✓ Est ce que les VAE peuvent remplir le même besoin que les scooters, en conservant des performances acceptables pour les facteurs ?
- ✓ Est ce qu'il y a une réelle différence en termes d'impact écologique entre les deux solutions?

La trajet moyen quotidien d'un facteur est de 40 km.

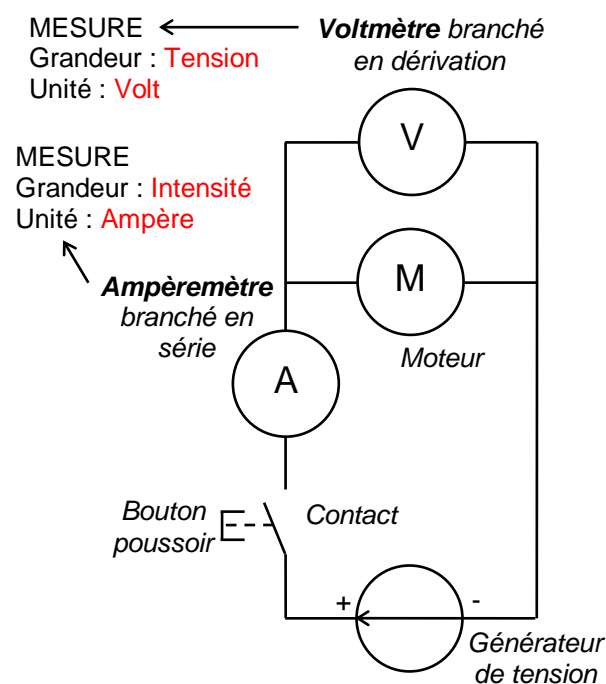
II. ETUDE DE L'AUTONOMIE ET DES EMISSIONS DE CO₂ DU VAE EASY MOUV

II.A. ETUDE EXPERIMENTALE

L'objectif de cette partie est de mesurer les grandeurs mécaniques (**force** et **vitesse**) et les grandeurs électriques (**tension** et **intensité**) caractéristiques de la roue motorisée du VAE, lorsqu'elle est alimentée par une tension de 36 V et qu'elle subit une résistance à l'avancement comparable aux conditions réelles.

- 1) A l'aide du matériel fourni, en présence du professeur, et en respectant les consignes de sécurité, réaliser le câblage électrique présenté sur le schéma ci-dessus.
- 2) Expliquer ensuite au professeur comment chaque appareil de mesure va être utilisé, et indiquer sur le schéma et les photos la grandeur mesurée par chaque appareil et l'unité qu'indique l'appareil.

DESCRIPTION DU MONTAGE EXPERIMENTAL



MESURE
Grandeur : Force
Unité : Newton

Dynamomètre fixé au bout du levier

Levier lié à l'axe de longueur égale au rayon de la roue

MESURE ← Tachymètre tangent à la roue
Grandeur : Vitesse
Unité : mètre par minute



- 3) En présence du professeur, réaliser les mesures et compléter le tableau suivant :

Tension U (en V)	Intensité I (en A)	Force F (en N)	Vitesse V (en m/s)	Puissance électrique absorbée $P_{a\ mot} = U.I$ (en W)	Puissance mécanique utile $P_{u\ mot} = F.V$ (en W)	Rendement $\eta = \frac{P_u}{P_a}$ (en %)
35 V	2,8 A	12,5	6,75	98 W	84 W	86%

- 4) Que représente le rendement ? Que représente sa différence par rapport à 100% ?

Le rendement représente la part de puissance réellement utilisable par rapport à l'énergie consommée.

La différence avec 100 % représente les pertes de puissance, ici 14% sous forme de chaleur.

II.B. SIMULATION D'UN MODELE NUMERIQUE DU COMPORTEMENT DU VAE

1. CALCUL DE LA PUISSANCE RESISTANTE A L'AVANCEMENT PAR SIMULATION

Le constructeur du VAE indique une autonomie de 30 à 60 km lorsque l'assistance électrique est sélectionnée.

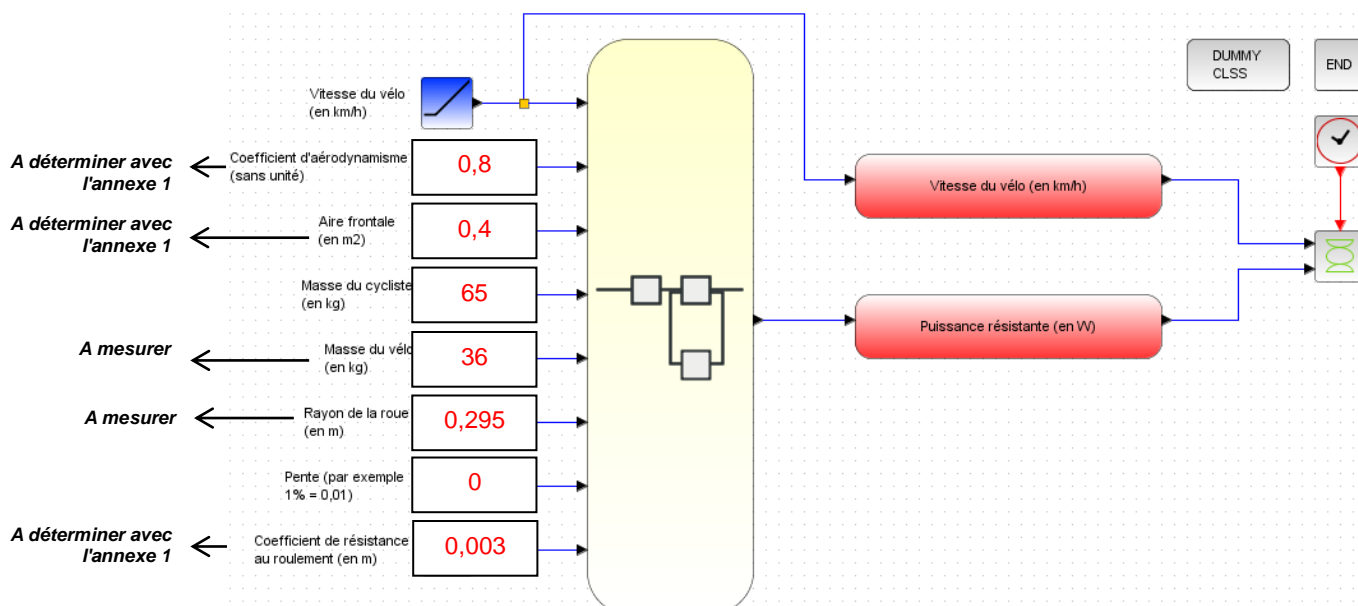
5) Lister l'ensemble des paramètres susceptibles de modifier cette autonomie :

- ✓ la masse du vélo et la masse du cycliste ;
- ✓ le rayon de la roue ;
- ✓ la vitesse d'avance et la vitesse du vent ;
- ✓ la surface de résistance à l'air et l'aérodynamisme ;
- ✓ la pente de la route ;
- ✓ l'état de la route et la nature des matériaux du pneu pour la résistance au roulement ;
- ✓ le niveau d'assistance sélectionné ;
- ✓ la capacité de la batterie et l'état de la batterie.

HYPOTHESES POUR LA SUITE DE L'ETUDE :

- ✓ le cycliste a une taille de 1,75 m, une masse de 65 kg, et il prend une position normale sur le vélo ;
- ✓ le cycliste choisit le **niveau d'assistance maximal** ;
- ✓ il n'y a **pas de vent** sur le parcours ;
- ✓ la route est en **asphalte très lisse** ;
- ✓ on cherche à connaître la puissance résistante pour une route de pente 0%, puis pour une pente de 2%.


6) Sur le diagramme suivant, indiquer la valeur de chaque paramètre pris en compte dans notre étude, et faire valider par le professeur :



7) Ouvrir le logiciel de simulation Scilab 5.5.2, puis dans l'onglet application, cliquer Xcos, et à partir de la nouvelle fenêtre ouvrir le fichier " Modélisation puissance résistante " fourni.

Les cases vertes correspondent aux **paramètres** que l'on peut modifier, et les cases rouges correspondent aux grandeurs que le modèle calcule.

8) Pour la pente de 0% :

- ✓ **compléter** les cases vertes selon les résultats précédents ;
- ✓ **simuler** le modèle en cliquant sur le bouton " Démarrer "  ;
- ✓ **faire valider** le graphique obtenu par le professeur ;
- ✓ **compléter** la colonne correspondante du tableau de l'annexe 2 (il est possible de zoomer sur la courbe pour être précis) ;
- ✓ **tracer** les points correspondants sur le graphique de l'annexe 2 en les reliant de manière harmonieuse.

9) Faire de même pour la pente de 2%.

II.C. INTERPRETATION DES RESULTATS

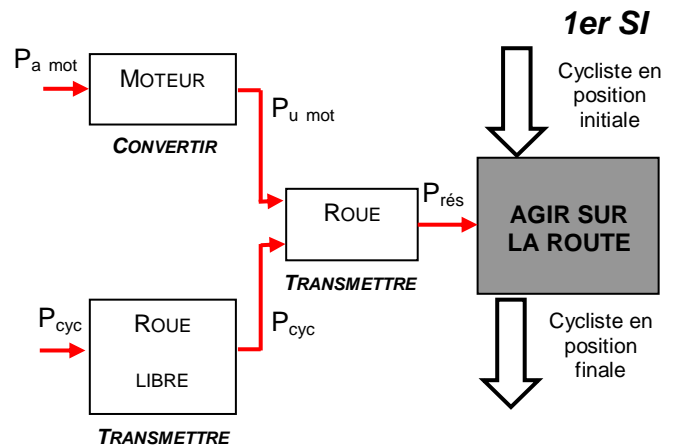
1. DETERMINATION DU POURCENTAGE D'ASSISTANCE DANS LES CONDITIONS EXPERIMENTALES

L'énergie mécanique nécessaire à l'avancement du vélo est fournie par le **moteur**, et par le **cycliste** par l'intermédiaire de la **roue libre** contenue dans la cassette de pignons.

- 10) A l'aide du schéma ci-contre, donner la formule entre la puissance utile du moteur $P_{u\text{ mot}}$, celle du cycliste P_{cyc} et celle résistante $P_{rés}$:

$$P_{u\text{ mot}} + P_{cyc} = P_{rés}$$

- 11) Sur l'annexe 2, placer dans le tableau et sur le graphique le point correspondant à la puissance $P_{u\text{ mot}}$ et à la vitesse V déterminées expérimentalement (question 3).
- 12) Sur l'annexe 2, compléter ensuite le reste du tableau.
- 13) Quelle la conséquence d'une pente élevée sur le comportement du VAE ?



Dans une pente élevée, si on veut rouler à la même vitesse que sur du plat, il faut fournir beaucoup plus d'effort.

Il est possible de fournir moins d'efforts, mais dans ce cas le déplacement sera moins rapide.

2. DETERMINATION DE L'AUTONOMIE

La **capacité énergétique réelle** $C_{réelle}$ de la batterie se mesure en A.h. Elle est liée à l'**intensité** I en A du courant de décharge et à la **durée** Δt de décharge en h selon la formule : $C_{réelle} = I \cdot \Delta t$. La capacité pouvant réellement être déchargée d'une batterie est environ égale à 80% de la capacité nominale : $C_{réelle} = 80\% C_{nom}$.

La batterie du VAE EasyMouv a une tension nominale de 36 V et une capacité nominale de 8 A.h. On suppose que la consommation électrique du VAE est due uniquement au moteur.

- 14) En déduire :

- ✓ la capacité réelle de décharge : $C_{réelle} = 80\% C_{nom} = 80\% \cdot 8 = 6,4 \text{ A.h}$
- ✓ la durée Δt de décharge en fonction de l'intensité mesurée (voir question 3) : $\Delta t = \frac{C_{réelle}}{I} = \frac{6,4}{2,8} = 2,3 \text{ h}$
- ✓ l'autonomie kilométrique en fonction de la vitesse mesurée (voir question 3) : $d = V \cdot \Delta t = 24 \cdot 2,3 = 55 \text{ km}$

- 15) Commenter les résultats obtenus compte tenu des performances annoncées par le constructeur, des hypothèses effectuées, et du besoin des facteurs :

L'autonomie kilométrique estimée à partir des résultats expérimentaux et des simulations correspond presque à la valeur haute des chiffres annoncés par le constructeur (60 km). Cette autonomie a été calculée pour un homme moyen dans un parcours sans pente. Elle serait bien sûr inférieure avec une pente non nulle.

L'autonomie semble suffisante pour les facteurs, avec une marge de près de 40% qui permettrait quelques trajets en pente. Il est tout de même indispensable de recharger les batteries tous les soirs.

3. ETUDE DES EMISSIONS DE CO₂

- 16) A l'aide de l'annexe 3, déterminer pourquoi il est préférable d'évaluer les émissions de CO₂ par la méthode ACV :

La méthode ACV prend en compte les émissions de CO₂ lors de l'utilisation de l'énergie mais aussi lors des autres phases du cycle de vie, comme la production et le transport. Elle permet donc d'évaluer les impacts globaux sur la planète.

- 17) A l'aide de l'annexe 3, expliquer pourquoi les chiffres français des émissions de CO₂ pour l'électricité sont différents suivant l'organisme qui les publie :

Ce sont des chiffres difficiles à estimer, étant donné la complexité du mix de production de l'électricité en France, et étant donné qu'il y a différents fournisseurs d'électricité en France.

D'autre part les fournisseurs peuvent avoir la tentation de donner des chiffres faibles pour valoriser leur service dans un but commercial. Des organismes indépendants sont donc indispensables.

Nous retiendrons le chiffre de Carbone 4 : le contenu CO_2 moyen en émissions ACV pour l'électricité est estimé à $94 \text{ gCO}_{2eq}/\text{kWh}$.

18) D'après les résultats expérimentaux, calculer l'énergie électrique absorbée en kWh pour charger complètement la batterie :

$$E_{\text{absorbée}} = P_{\text{amot}} \cdot \Delta t = 97,2,37 = 230 \text{ Wh} = 0,23 \text{ kWh}$$

La batterie utilisée pour le VAE est une batterie plomb, dont le principal avantage est le faible coût. Par contre elle présente un gros défaut : seulement 50% de l'énergie achetée au fournisseur d'électricité permet de réellement charger la batterie. Le reste est perdu sous forme de chaleur (le chargeur de batterie chauffe).

19) En déduire l'énergie électrique dépensée en kWh pour charger complètement la batterie :

$$E_{\text{dépensée}} = 2E_{\text{absorbée}} = 0,46 \text{ kWh}$$

20) En déduire les émissions de CO_2 liés à la consommation électrique du VAE pour 40 km de trajet :

$$94,0,46 \cdot \frac{40}{55,5} = 31 \text{ gCO}_{2eq}$$

III. ETUDE DE L'AUTONOMIE ET DES EMISSIONS DE CO_2 D'UN SCOOTER

Nous prendrons dans la suite l'exemple d'un scooter dont les caractéristiques sont les suivantes :

- ✓ moteur thermique 2 temps de cylindrée 50 cm^3 ;
- ✓ consommation moyenne d'essence SP 98 de $2,5 \text{ l}$ aux 100 km pour une vitesse moyenne de 35 km/h sur du plat (le scooter est bridé à 45 km/h) ;
- ✓ réservoir de contenance 6 l ;
- ✓ masse à vide de 100 kg .

On précise également qu'un litre d'essence Sans Plomb 98 est environ équivalent à $9,8 \text{ kWh}$ d'énergie.

21) Relever dans l'annexe 3 les émissions de CO_2 par kWh consommé par le scooter : $314 \text{ gCO}_{2eq} / \text{kWh}$.

22) Calculer les grandeurs suivantes :

✓ l'autonomie kilométrique : $d = 100 \frac{6}{2,5} = 240 \text{ km}$

✓ l'énergie dépensée en kWh pour 40 km de trajet : $E_{\text{dépensée}} = 9,8 \cdot 2,5 \cdot \frac{40}{100} = 9,8 \text{ kWh}$

✓ les rejets de CO_2 lié à la consommation en essence du scooter pour 40 km de trajet : $9,8 \cdot 314 = 3077 \text{ gCO}_{2eq}$

IV. CONCLUSION

23) En utilisant des critères économiques, écologiques, de confort et d'efficacité, et à l'aide des travaux réalisés, justifier le choix de la Poste d'Obernai de remplacer la presque totalité de ses scooters par des VAE. Préciser également les précautions qu'il a fallu prendre dans le choix du modèle de VAE.

D'un point de vue économique, un VAE coûte moins cher qu'un scooter, et comme il consomme moins, l'énergie nécessaire à son fonctionnement aura également un coût moindre.

D'un point de vue écologique, pour un trajet équivalent, le VAE émet 100 fois moins de CO_2 que le scooter thermique. De plus sa fabrication et son transport sont également moins émetteurs puisque le VAE est presque trois fois plus léger que le scooter.

D'un point de vue confort, le VAE est moins performant, puisque le facteur devra fournir une partie de la puissance en pédalant. Toutefois cette puissance reste relativement faible sur du plat (67% d'assistance pour se déplacer à 24 km/h), et peut rester faible en pente à condition que le facteur accepte de se déplacer moins vite.

D'un point de vue de l'efficacité, le VAE est moins rapide que le scooter, ce qui n'est pas vraiment gênant pour un facteur. L'autonomie énergétique est suffisante, à condition de penser à recharger tous les soirs la batterie du VAE.

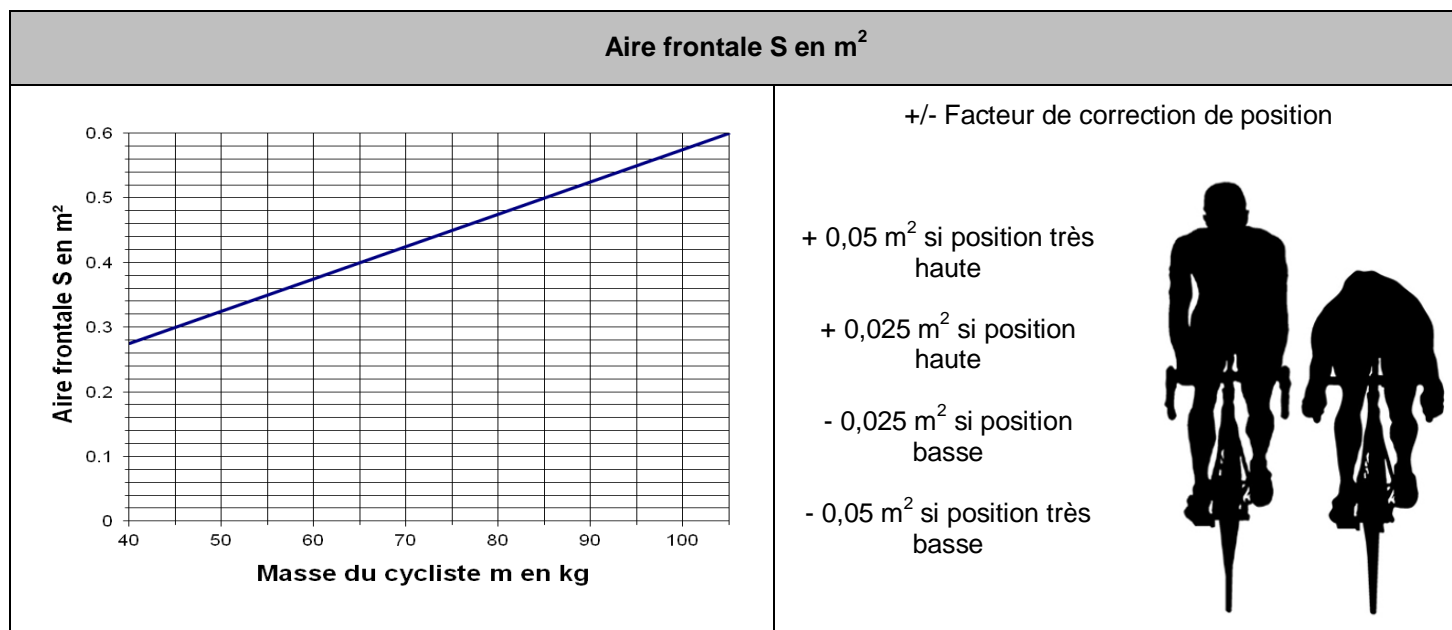
Le modèle de VAE choisi devra être tout de même un peu plus performant que celui étudié, pour garantir une autonomie supérieure. Et une technologie de batterie différente permettrait une diminution de la consommation électrique, et donc également des émissions de CO₂.

ANNEXE 1 : ÉVALUATION DE LA PUISSANCE RESISTANTE A L'AVANCEMENT D'UN VELO

Source : <http://www.sci-sport.com/dossiers/002.php>

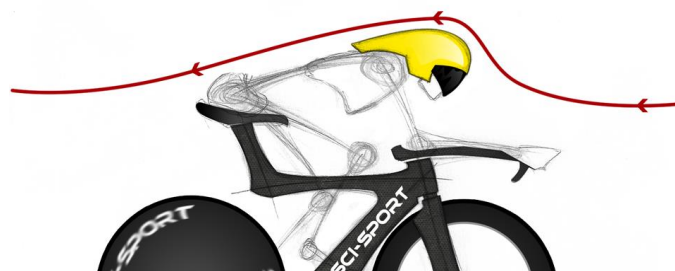
VALEURS TYPQUES DE L'AIRE FRONTALE :

L'**aire frontale S** correspond à l'aire de la surface du cycliste et du vélo prise perpendiculairement à la direction de déplacement. Elle dépend évidemment de la corpulence et de la position du cycliste sur le vélo.

**VALEURS TYPQUES DU COEFFICIENT D'AERODYNAMISME :**

Le **coefficient d'aérodynamisme C_x** dépend de la forme générale du cycliste et du vélo en déplacement dans l'air et des turbulences qui se créent, et de la position du cycliste sur le vélo.

Type de cycliste	Coefficient d'aérodynamisme C _x (pas d'unité)
Cycliste moyen	0,8
+/- Facteur de correction d'aérodynamisme -0,05 si utilisation de roues aérodynamique -0,05 si utilisation d'un prolongateur -0,012 si utilisation de casque aérodynamique +0,012 si utilisation de vêtements qui flottent au vent -0,012 si utilisation d'un vélo aérodynamique	



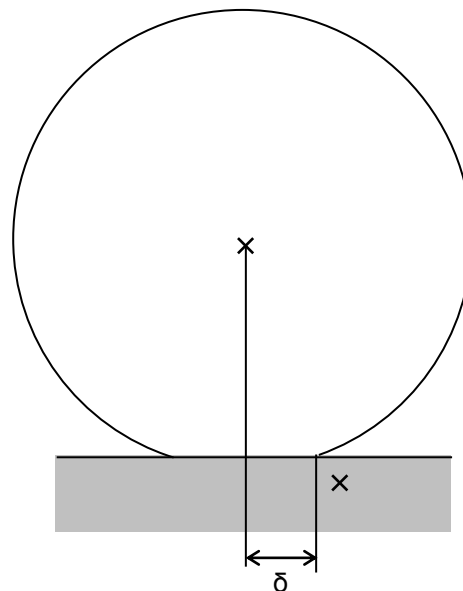
+/- Facteur de correction de position

- + 0,037 si position très haute et large
- + 0,025 si position très haute
- + 0,012 si position haute
- 0,012 si position basse
- 0,025 si position très basse

VALEURS TYPQUES DU COEFFICIENT DE RESISTANCE AU ROULEMENT :

Le **coefficient de résistance au roulement δ** correspond à la demi-longueur de contact entre la roue déformée et la route. Il dépend surtout de la nature des matériaux en contact, et du niveau de gonflage. Pour des pneumatiques standards correctement gonflés, on peut utiliser le tableau suivant :

Type de route	Coefficient δ de résistance au roulement
Vélodrome	1 mm
Ciment	2 mm
Asphalte très lisse	3 mm
Asphalte rugueux	4 mm
Asphalte médiocre	5 mm
Route en mauvais état	6 mm



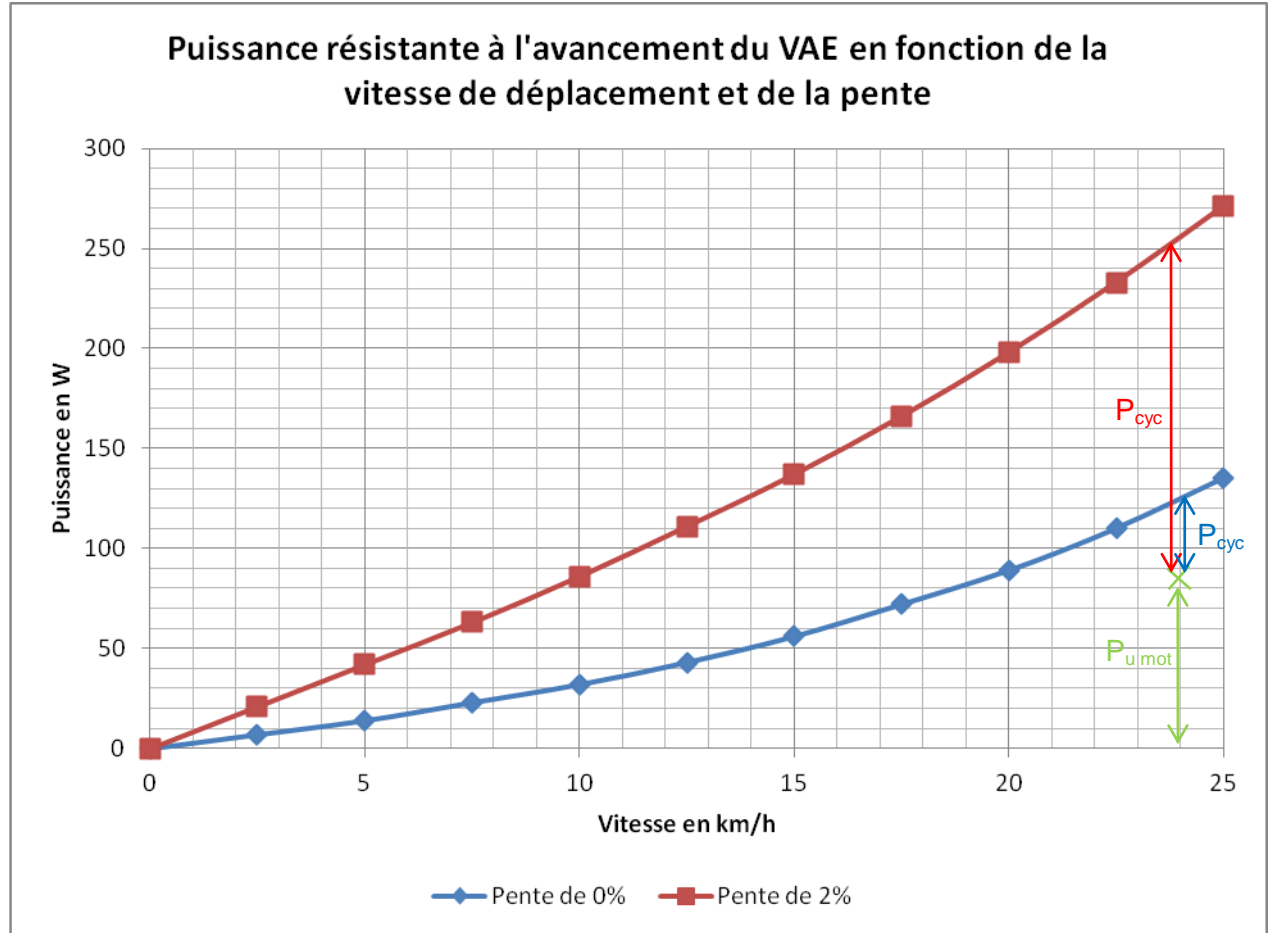
ANNEXE 2 : RESULTATS DE LA SIMULATION DE LA PUISSANCE RESISTANTE A L'AVANCEMENT D'UN VELO

Vitesse (en km/h)	Puissance résistante (en W)	
	Pente de 0%	Pente de 2%
0	0	0
2,5	7	21
5	14	42
7,5	23	63
10	32	86
12,5	43	111
15	56	137
17,5	72	166
20	89	198
22,5	110	233
25	135	271

Question 8

Question 9

Question 8, 9 et 11



Vitesse d'avance expérimentale (en km/h)	V = 24 km/h	
Puissance expérimentale fournie par l'assistance (en W)	P _{u mot} = 84 W	
	Pente de 0%	Pente de 2%
Puissance résistante simulée (en W)	P _{rés} = 125 W	P _{rés} = 255 W
Puissance fournie par le cycliste (en W)	P _{cyc} = 41 W	P _{cyc} = 171 W
Pourcentage d'assistance	84 / 125 = 67%	84 / 255 = 33%

Question 11

Question 12

ANNEXE 3 : CONTENU CO₂

Sources : https://fr.wikipedia.org/wiki/Contenu_CO2
<http://www.carbone4.com/fr/nos-initiatives/le-contenu-co2-de-l%C3%A9lectricit%C3%A9>

Les émissions de CO₂ mesurent l'impact concernant les émissions de gaz à effet de serre générés par une consommation énergétique. Elles s'expriment en grammes d'équivalent CO₂ par kilowatt heure (gCO_{2eq} / kWh), et peuvent être évaluées de deux manières :

- ✓ en **émissions directes** due à l'utilisation de l'énergie chez le consommateur final ;
- ✓ en **analyse de cycle de vie (ACV)**, qui tient compte des émissions directes, mais aussi des émissions dues à la production, au transport, à la distribution ... de l'énergie.

CONTENUS CO₂ DES COMBUSTIBLES COURANTS EN FRANCE :

Organisme	Selon l'ADEME en janvier 2015		
	Combustibles	Emissions directes (en gCO _{2eq} /kWh)	Emissions ACV (en gCO _{2eq} /kWh)
	Charbon	345	377
	Fioul lourd	283	324
	Fioul domestique	272	324
	Gazole	256	323
	Essence (SP95, SP98)	253	314
	GPL	233	260
	Gaz naturel	204	243
	Bois énergie	19	30

CONTENUS CO₂ DE L'ELECTRICITE EN FRANCE :

L'utilisation de l'électricité par le consommateur n'entraîne pas d'émissions directes de gaz à effet de serre sur le lieu d'utilisation. En revanche, l'utilisation de combustibles pour produire l'électricité ainsi que la construction et l'entretien du réseau de transport de l'électricité émettent différents gaz à effet de serre.

L'estimation des contenus CO₂ de l'électricité sont difficiles car :

- ✓ les moyens de production de l'électricité sont variables (nucléaire, hydraulique, éolien...) suivant les pays ;
- ✓ les échanges entre pays frontaliers sont fréquents ;
- ✓ les démarches commerciales de certains fournisseurs d'énergie rendent délicates de vrais études scientifiques.

Organisme	Selon l'ADEME en janvier 2015		Selon l'université de Stanford
	Filière de production de l'électricité	Emissions ACV en France (en gCO _{2eq} /kWh)	Emissions ACV en France (en gCO _{2eq} /kWh)
	Nucléaire	6	9 à 70
	Charbon	1038	
	Gaz	406	
	Fioul	704	
	Hydraulique retenue	4	17 à 22
	Photovoltaïque	55	19 à 59
	Eolienne	7	3 à 8
	Géothermie	45	15 à 55

ADEME : Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie (dépend du gouvernement français).

Université de Stanford : université américaine situé dans la Silicon Valley en Californie, et classée parmi les meilleures universités américaines dans les domaines scientifiques.

Carbone 4 : Cabinet français de conseil spécialisé dans la stratégie carbone (organisme privé).

