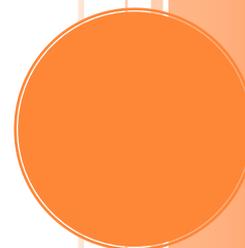


SY01 MODELISATION MULTIPHYSIQUE

TP2 : Modélisation d'un vélo électrique

Etude d'un vélo à assistance électrique, équipé d'un moteur roue à l'avant. La technologie employée est un moteur brushless autopiloté.

Sanchez Thomas & Assenat Jérémy
12/04/2012



STRUCTURATION DE LA REALISATION

Diagramme fonctionnel A-0

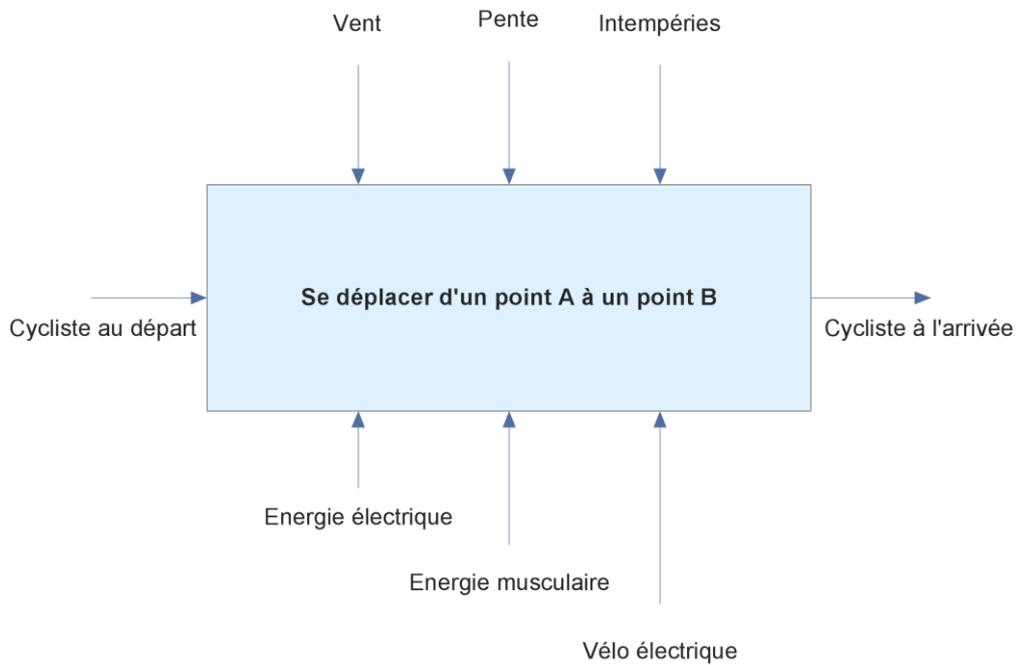
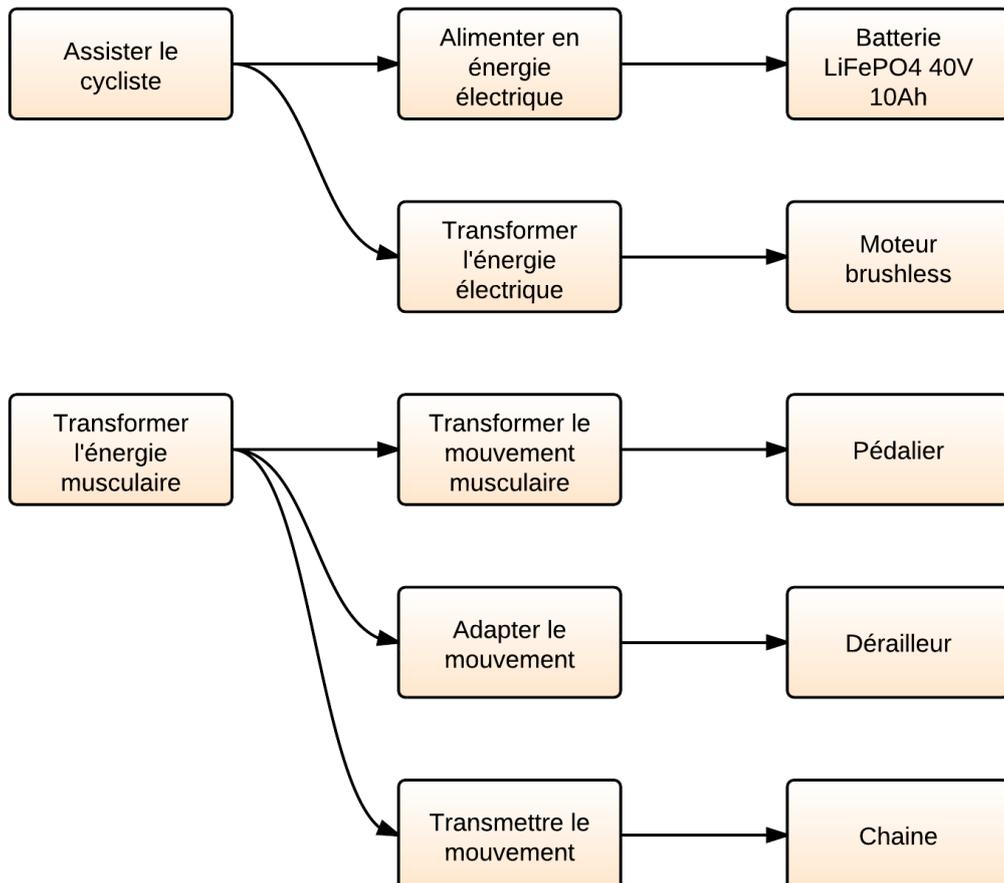


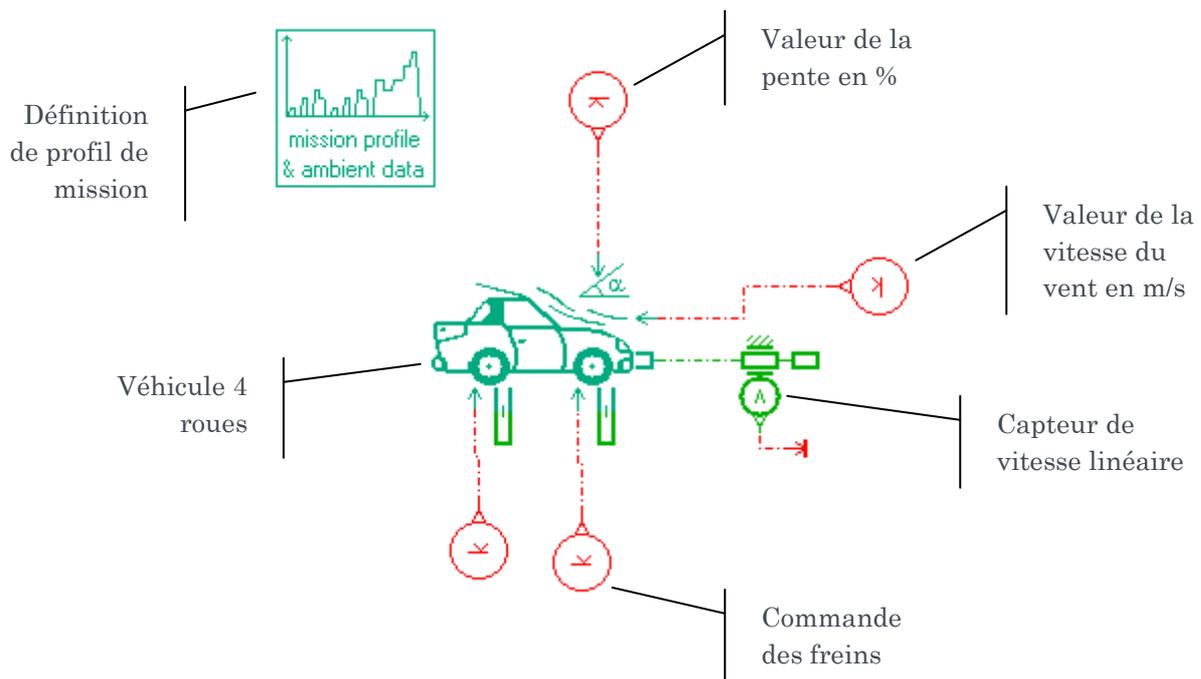
Diagramme fonctionnel A0



I. MODELISATION DU VELO

Pour modéliser le vélo, nous utiliserons un modèle de véhicule à 4 roues. Ce modèle possède plusieurs paramètres liés à l'environnement dans lequel le vélo se meut. De plus, étant donné que nous avons à notre disposition des mesures effectuées sur le vélo réel, nous pourrions agir sur ces paramètres afin de faire coller le modèle au système réel.

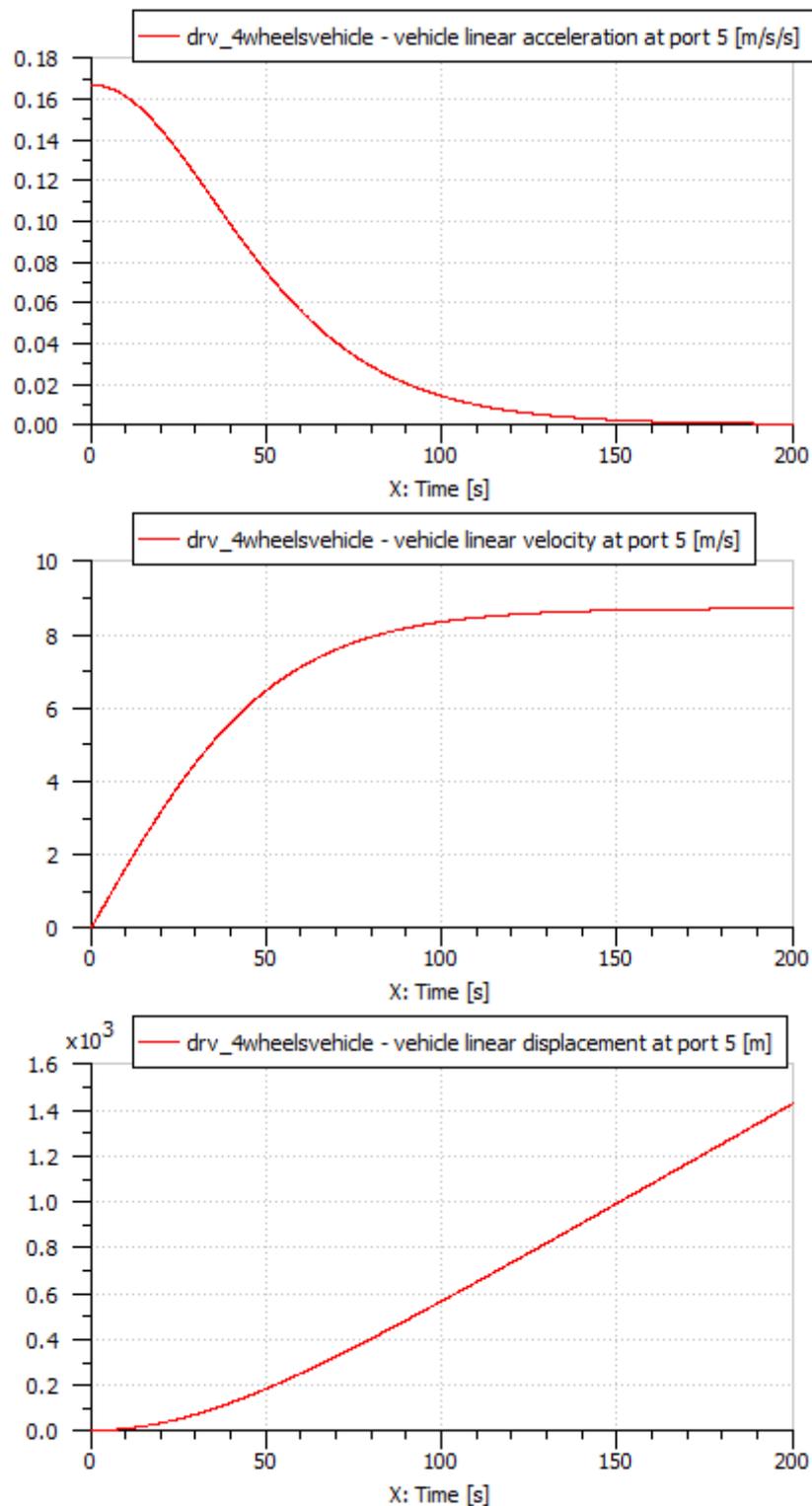
Voici à quoi ressemble le modèle de véhicule à 4 roues :



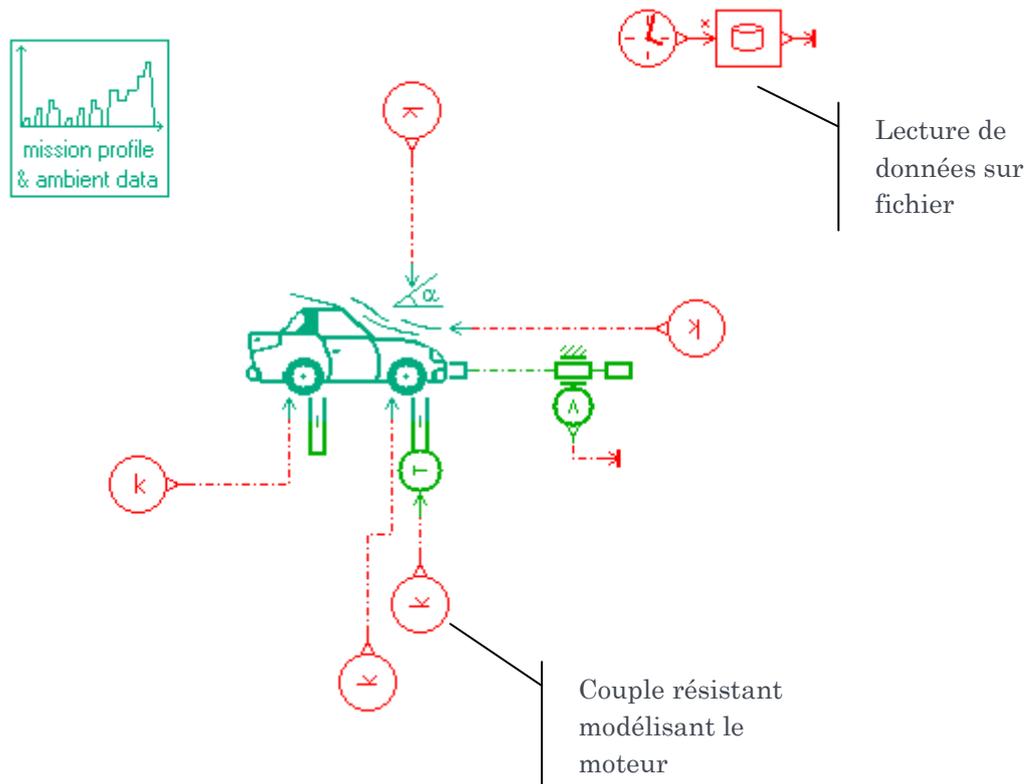
Dans un premier temps, nous laissons le vélo dévaler une pente de -2%. La stabilité du vélo est supposée parfaite, et la trajectoire rectiligne. Le poids de l'ensemble {vélo + cycliste} est fixé à 115 kg, pour pouvoir, par la suite, comparer les résultats de la simulation aux mesures effectuées. Le modèle de cette simulation est contenu dans le fichier *velo_a.ame*. Voici les tracés obtenus avec un vent de vitesse nulle, une pente de -2%, un cycliste qui ne pédale pas, et le moteur électrique désolidarisé du vélo. Ils correspondent respectivement à :

- L'accélération linéaire du vélo (en m/s^2)
- La vitesse linéaire du vélo (en m/s)
- Le déplacement linéaire du vélo (en m)

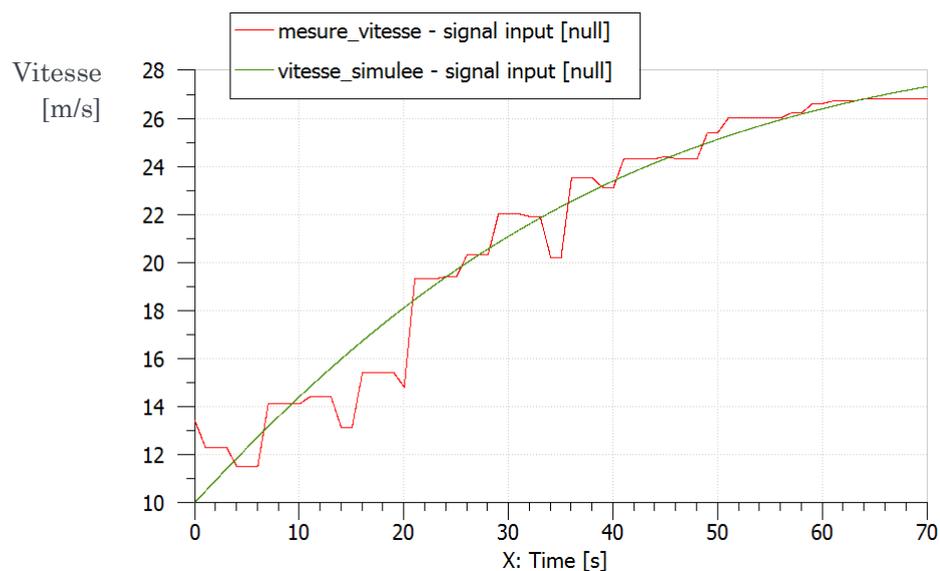
Nous remarquons que l'accélération tend vers une valeur nulle (équilibre des forces extérieures au vélo), et que la vitesse tend vers une vitesse maximale.



Maintenant nous allons considérer que le moteur est semblable à un couple résistant de -0.7Nm . Nous allons vérifier l'ordre de grandeur des paramètres du modèle en comparant la vitesse simulée à la vitesse mesurée lors d'un test avec le vélo. Ce nouveau modèle est contenu dans le fichier *velo_b.ame*. Voici le modèle créé pour cette validation :



Le but de ce modèle est de vérifier la cohérence des résultats simulés et d'ajuster les paramètres en conséquence. Le paramètre principal à régler étant la vitesse initiale du vélo, puisque lors des mesures initiales, le vélo n'était pas à l'arrêt. En modifiant cette valeur, on cherche à ce que les courbes se superposent. On suppose que la vitesse du vent est nulle et pour une vitesse initiale de 10 km/h on obtient les courbes suivantes :

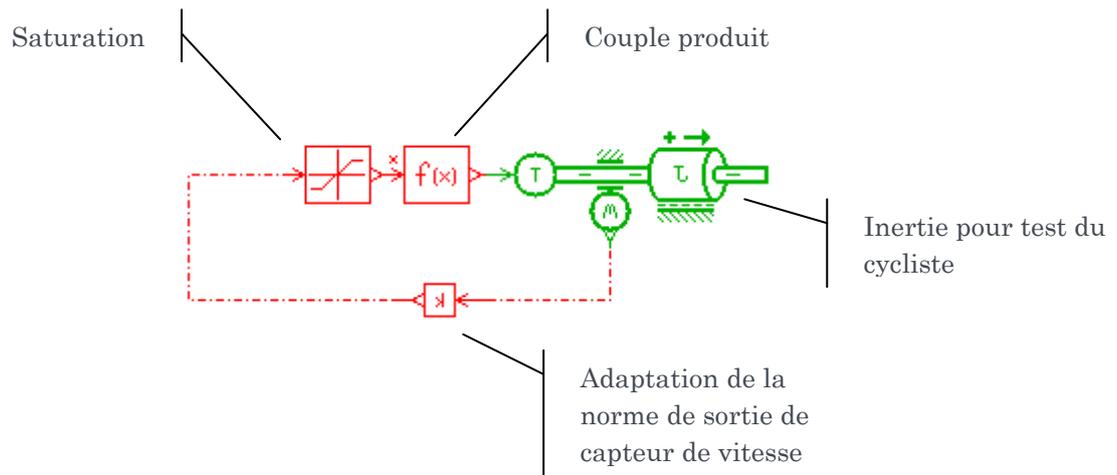


Le modèle est donc validé. Nous pouvons nous intéresser à la modélisation du cycliste.

II. MODELISATION DU CYCLISTE

Avant de faire monter le cycliste sur notre modèle de vélo, il faut qu'il passe une série de tests pour vérifier son bon fonctionnement. Nous modéliserons le cycliste par une source de couple et nous vérifierons sa consommation énergétique.

Notre cycliste est stocké dans le fichier *cycliste_a.ame* et voici à quoi il ressemble :

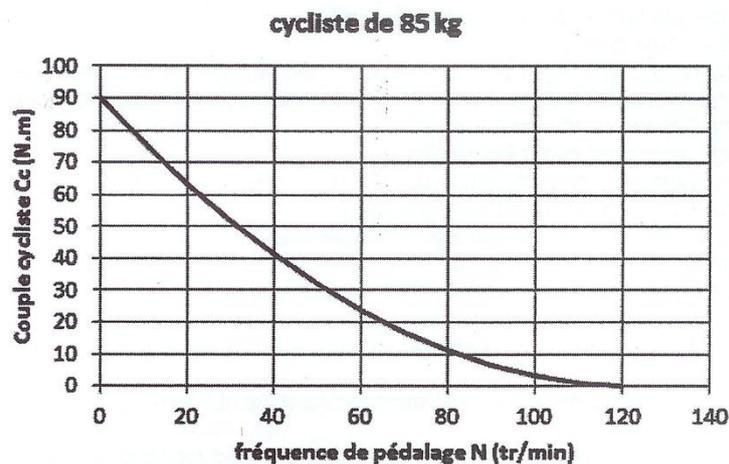


Le couple produit est donné par l'expression analytique suivante :

$$C_c(N) = m \left[0.25 * \left(\frac{N}{60} \right)^2 - 1.03 * \left(\frac{N}{60} \right) + 1.06 \right]$$

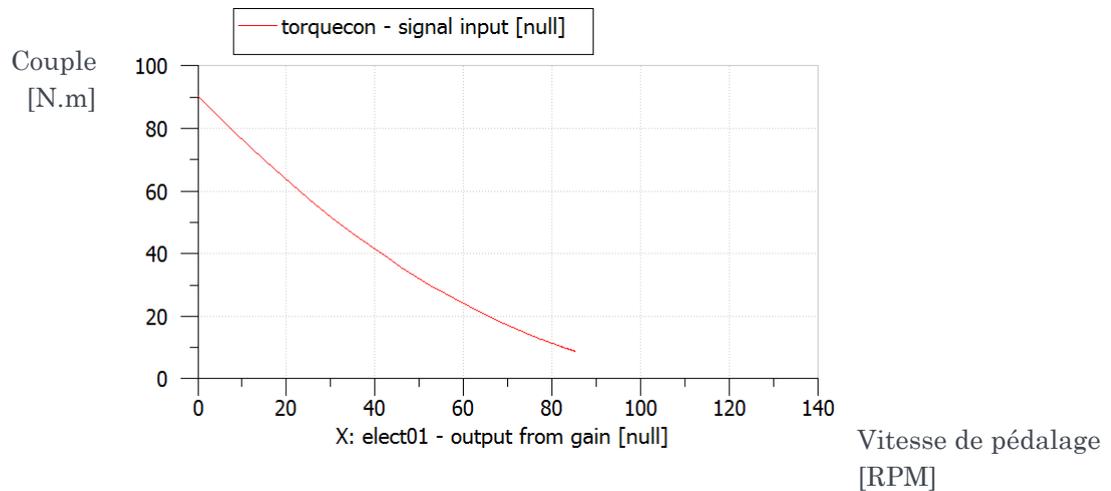
Le couple produit par un cycliste est alors proportionnel à sa masse et est une fonction de la vitesse de pédalage.

Finalement, les données à notre disposition pour la vérification de notre modèle est le tracé du couple fourni par le cycliste en fonction de sa vitesse de pédalage, pour une masse de cycliste de 85 kg.



Le but de ce banc de tests n'est réellement que de tester le bon fonctionnement du cycliste avant de l'intégrer au modèle du vélo que nous avons déjà créé.

Puisque la simulation de ce modèle nous donne le résultat suivant :



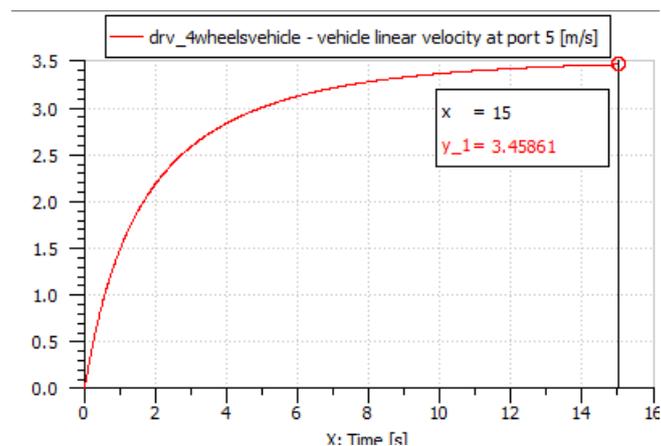
Le cycliste est donc bien modélisé.

Vérifions maintenant que le cycliste est toujours aussi efficace mais, cette fois-ci, sur le vélo.

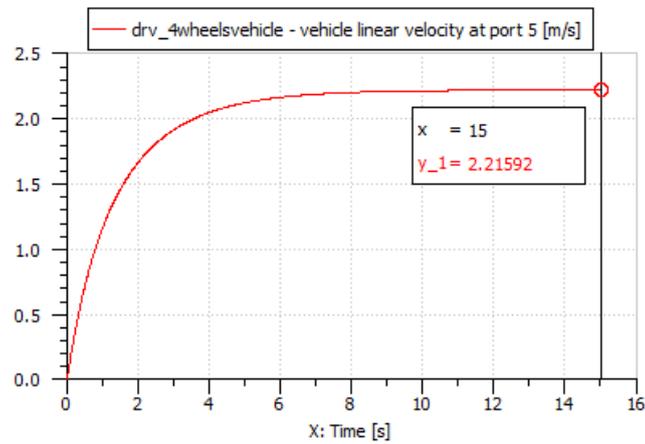
III. LE CYCLISTE SUR SON VELO

Pour le test du cycliste sur son vélo, nous évaluons par la simulation les vitesses maximales atteintes dans plusieurs cas :

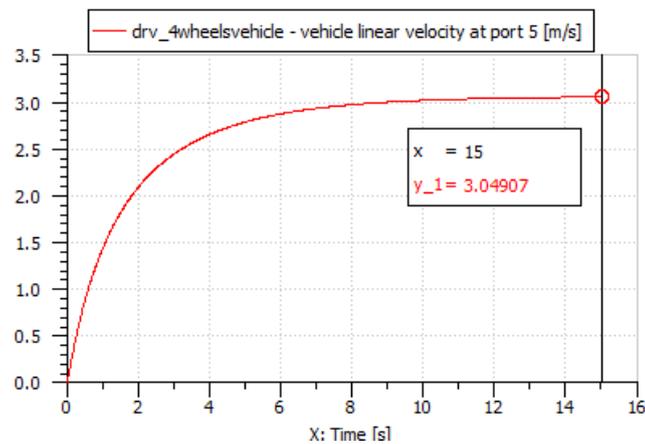
- Pas de vent, avec une pente nulle : 3.46m/s soit 12.45km/h



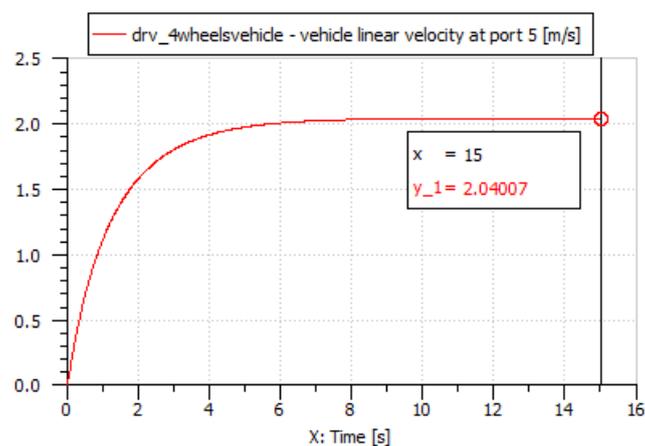
- Pas de vent, avec une montée de +5% : 2.22m/s soit 8km/h



- Avec du vent de 5m/s et une pente nulle : 3m/s soit 11km/h



- Avec du vent de 5m/s et une montée de +5% : 2m/s soit 7km/h



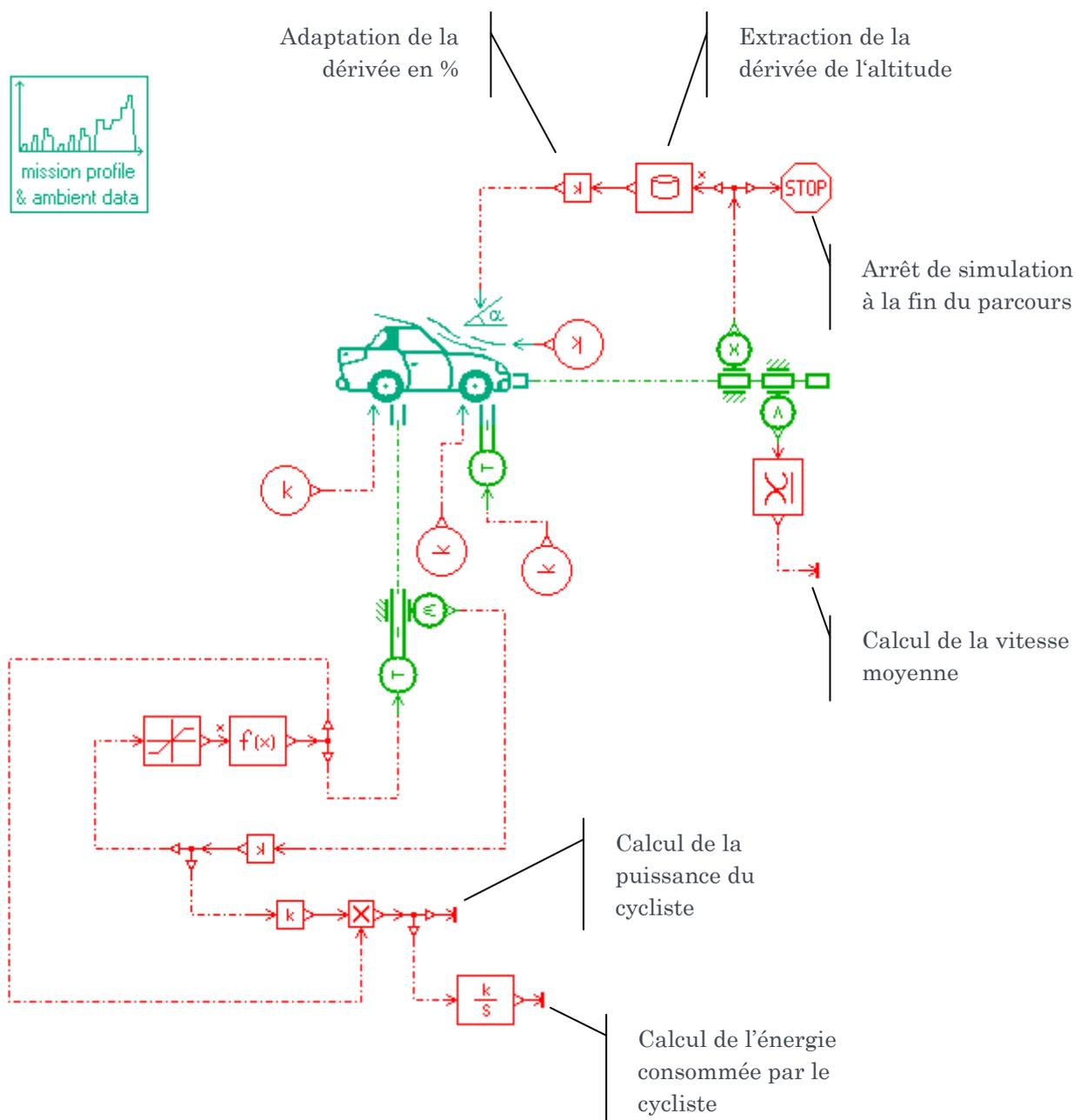
Nous rajoutons également deux sinks pour le calcul de la puissance et de l'énergie consommées par le cycliste, qui seront utilisés plus tard. Cette version du cycliste sur son vélo se trouve dans le fichier *velo_et_cycliste_b.ame*.

Intéressons nous maintenant à la modélisation de la pente.

IV. MODELISATION DE LA PENTE

Jusqu'à présent, la pente appliquée à notre modèle de vélo ne pouvait qu'être une constante. Et de façon plus qu'évidente, il faut améliorer cette modélisation de la pente pour qu'elle évolue en fonction de la distance parcourue par le cycliste. Pour se faire, nous avons à disposition, une série de relevé d'altitude sur le même trajet que pour les mesures de vitesse. Il faut alors traiter ces données et les intégrer à notre modèle.

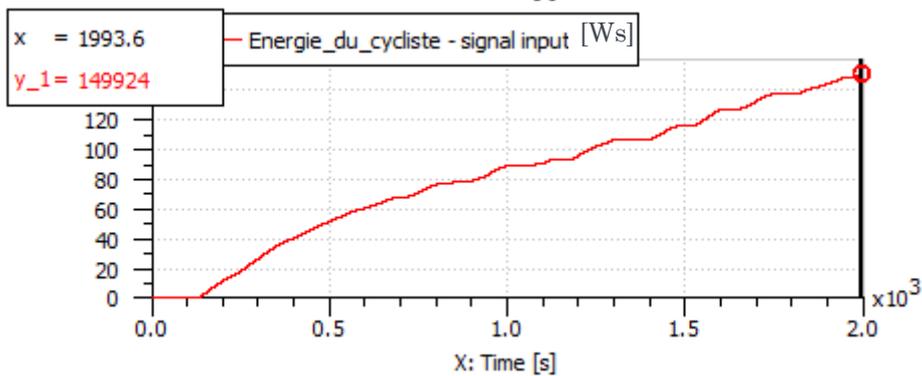
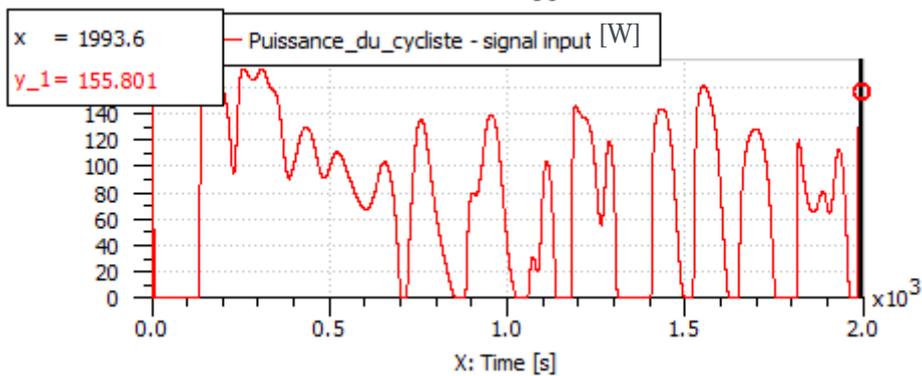
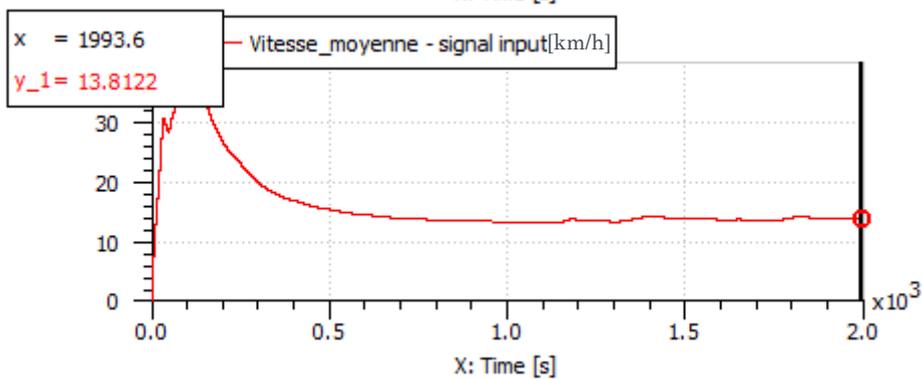
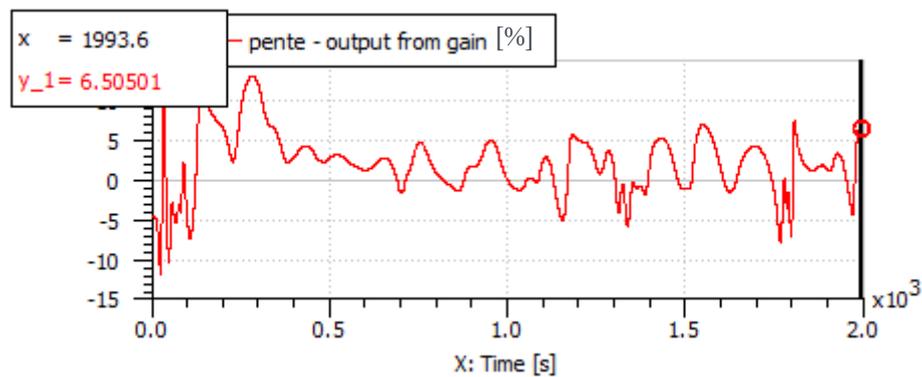
Voici la description du modèle obtenu :



Ce modèle se trouve dans le fichier *pente_a.ame*.

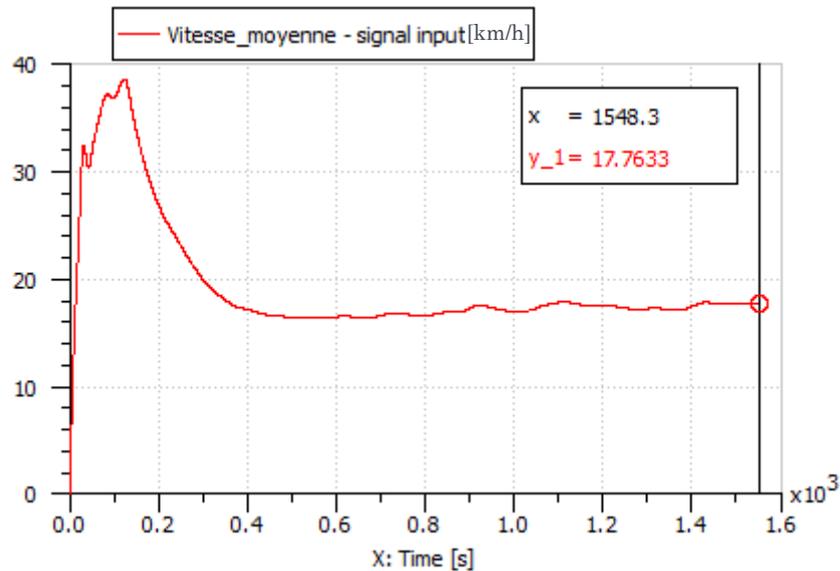
Lors de la simulation basée sur ce modèle, le vélo franchit les pentes qui se trouvent sur le trajet, et nous relevons le temps que le cycliste met pour arriver à destination, ainsi que sa vitesse moyenne et l'énergie qu'il a consommée :

- Temps du trajet : 1993 secondes soit 33 minutes
- Vitesse moyenne du parcours : 13.81km/h
- Energie consommée : 149924Ws soit 41.65Wh

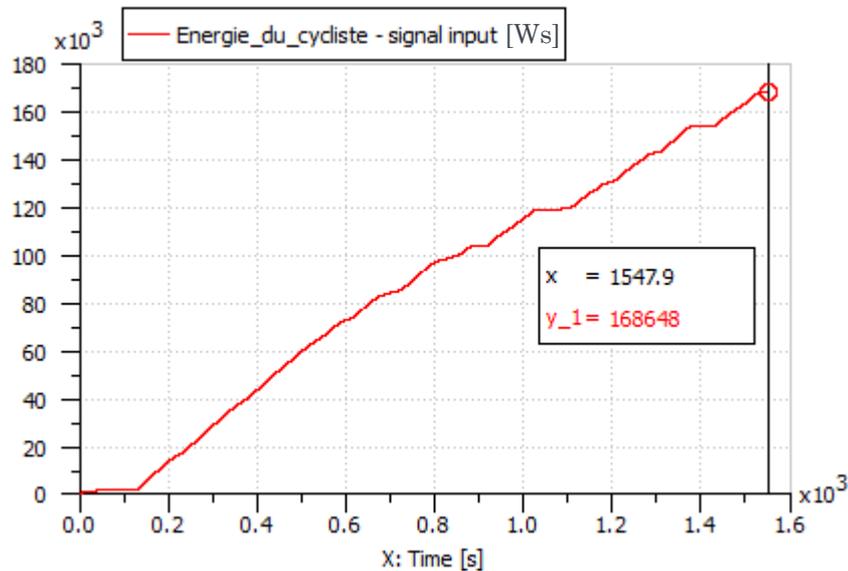


Le dérailleur étant implanté, il est possible de comparer les nouvelles valeurs de vitesse moyenne, temps de parcours et énergie consommée à celles obtenues sans dérailleur :

- Temps du trajet : 1548 secondes soit 25 minutes et 48 secondes
- Vitesse moyenne du parcours : 17.76 km/h



- Energie consommée : 168648Ws soit 46.85Wh



De façon évidente, le temps du trajet étant moins longue, l'énergie consommée par le cycliste est plus grande que celle consommée lors du trajet avec le vélo sans dérailleur.

Remarque :

Dans un souci de sauvegarde de l'énergie électrique stockée dans la batterie, il aurait été possible d'inverser les rapports de transmission du dérailleur. Le cycliste mettrait plus de temps, mais l'autonomie de la batterie serait plus grande.

Cependant le problème avec ce modèle est que lorsqu'on utilise des *switch*, des discontinuités peuvent apparaître lorsque l'on passe d'un état à l'autre. C'est pour cette raison qu'une autre modélisation de la loi de commande du dérailleur a été élaborée à partir de la fonction atan().

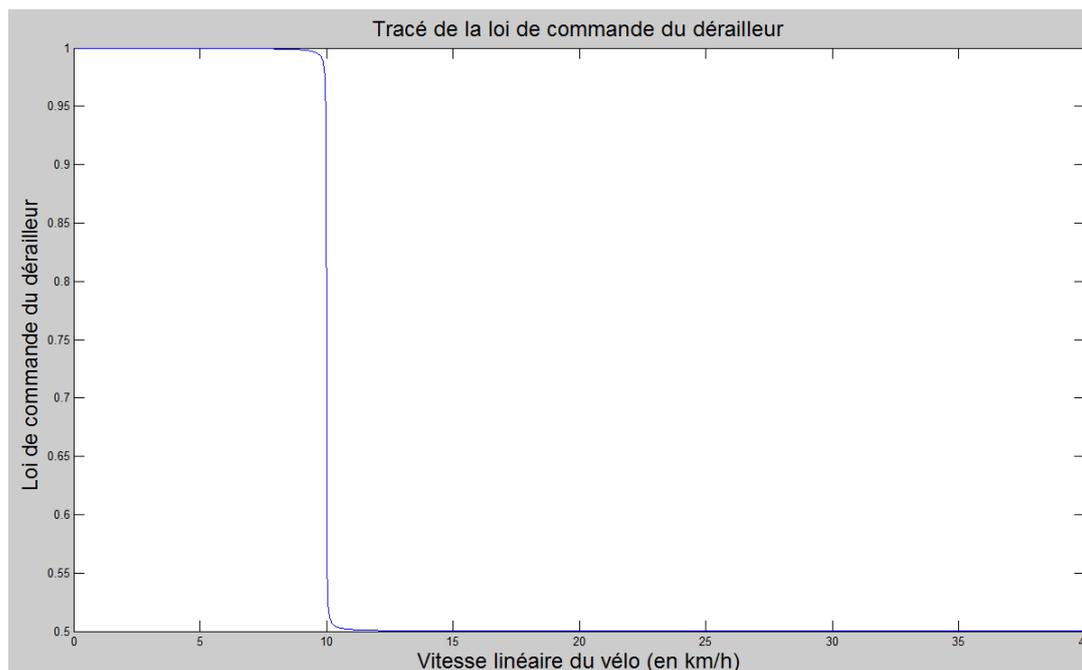
Cette loi de commande est la suivante :

$$\frac{-\operatorname{atan}\left(\frac{100 * (x - V_{\text{dérailleur}})}{2 * \pi}\right)}{2 * \pi} + 0.75$$

Avec x la vitesse linéaire du vélo.

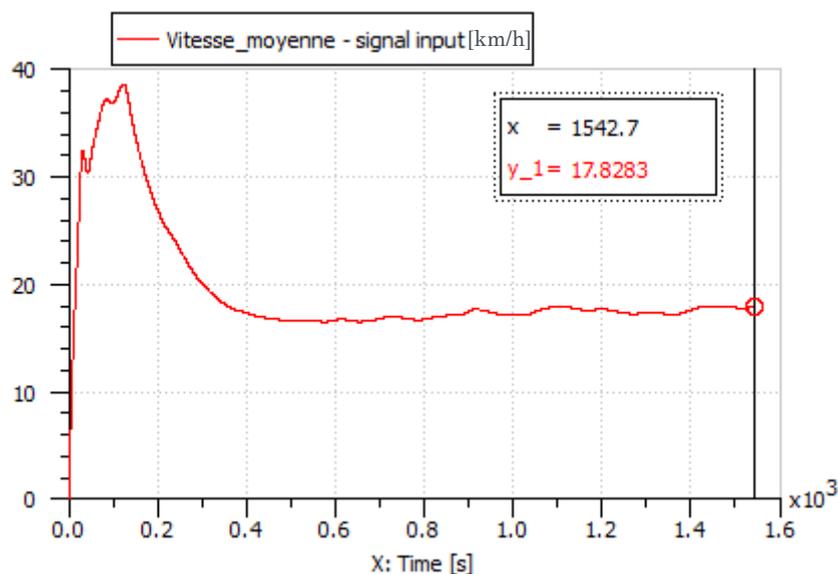
Et $V_{\text{dérailleur}}$ la vitesse à laquelle le rapport de transmission change. Ici $V_{\text{dérailleur}} = 10\text{km/h}$

La représentation de cette loi de commande est :

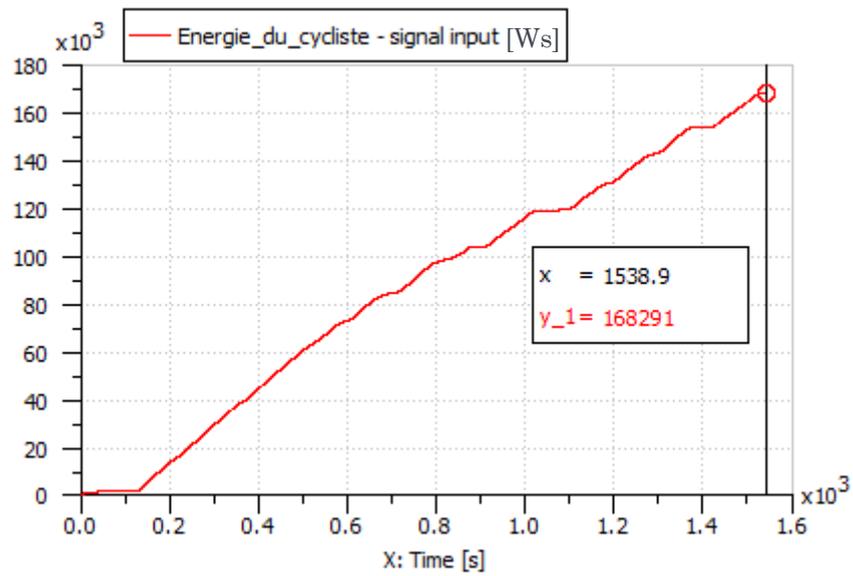


Avec cette nouvelle loi de commande nous obtenons les résultats suivants :

- Temps du trajet : 1542 secondes soit 25 minutes et 42 secondes
- Vitesse moyenne du parcours : 17.82 km/h

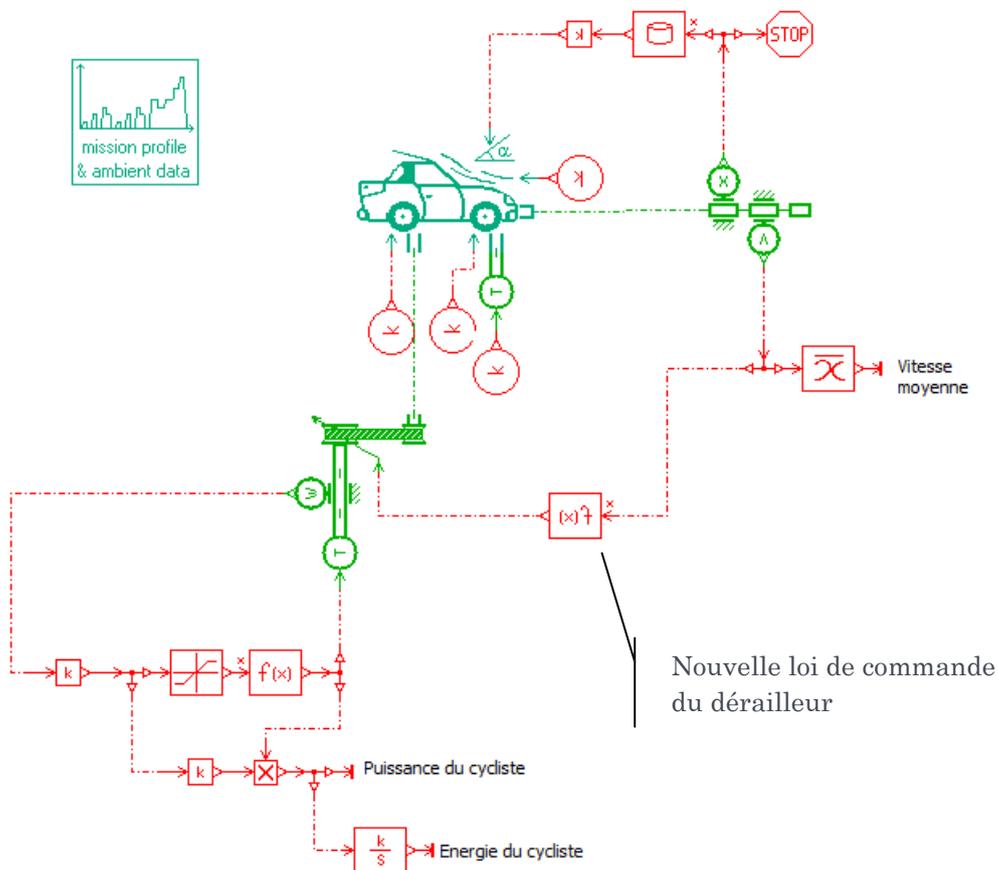


- Energie consommée : 168291Ws soit 46.75Wh



Nous remarquons qu'avec cette loi de commande l'énergie consommée par le cycliste est légèrement inférieure à celle consommée avec l'autre modélisation de commande.

Cette deuxième loi de commande se trouve dans le *derailleur_b.ame*. Voici à quoi ressemble ce modèle :



Abordons maintenant l'implantation du moteur électrique.

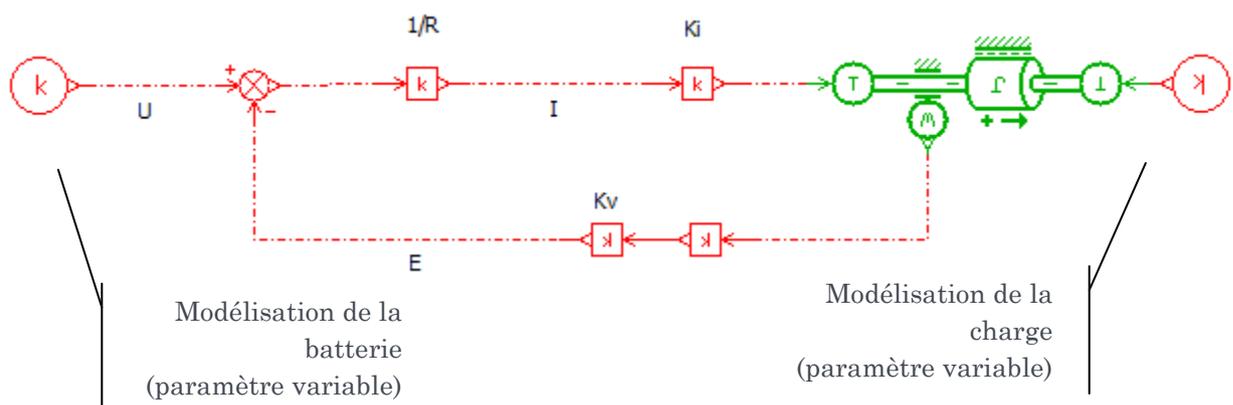
VI. MODELISATION DU MOTEUR ELECTRIQUE

Avant de l'implanter, il faut élaborer un banc de test virtuel pour valider ses paramètres en comparant mesures disponibles et résultats de simulation.

Les mesures à notre disposition sont principalement : le courant absorbé et la vitesse de rotation en fonction de la tension aux bornes de la batterie et du couple résistant appliqué à l'arbre moteur.

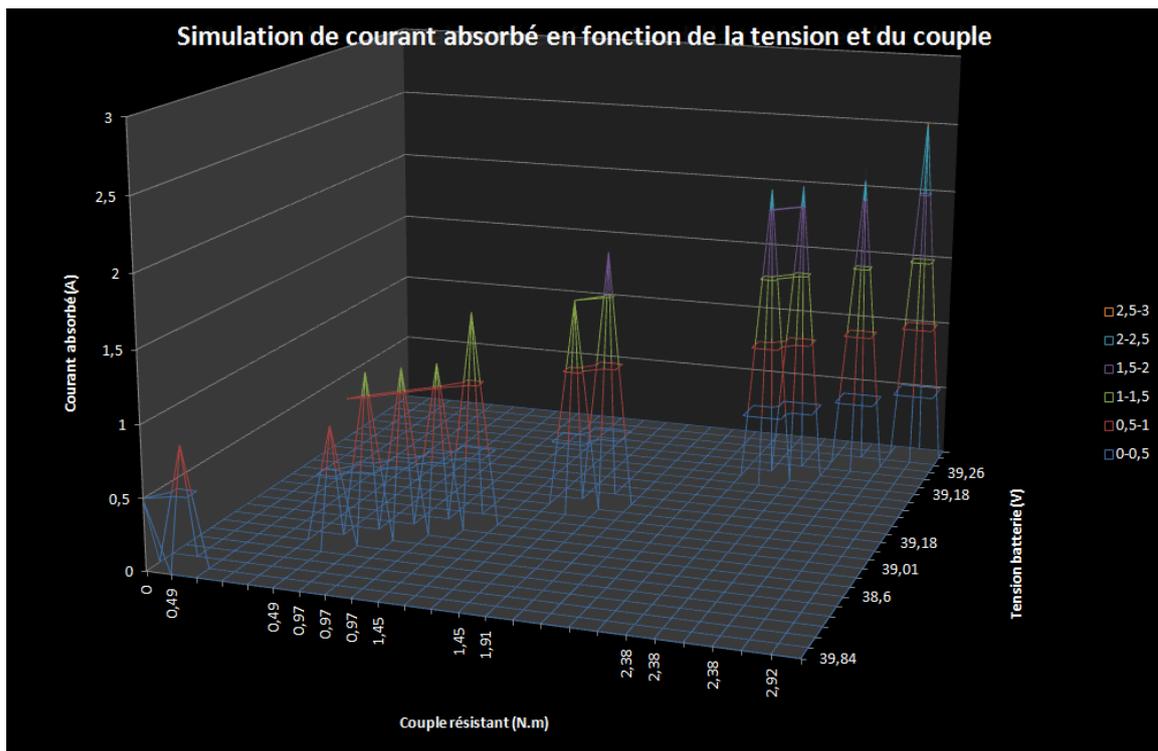
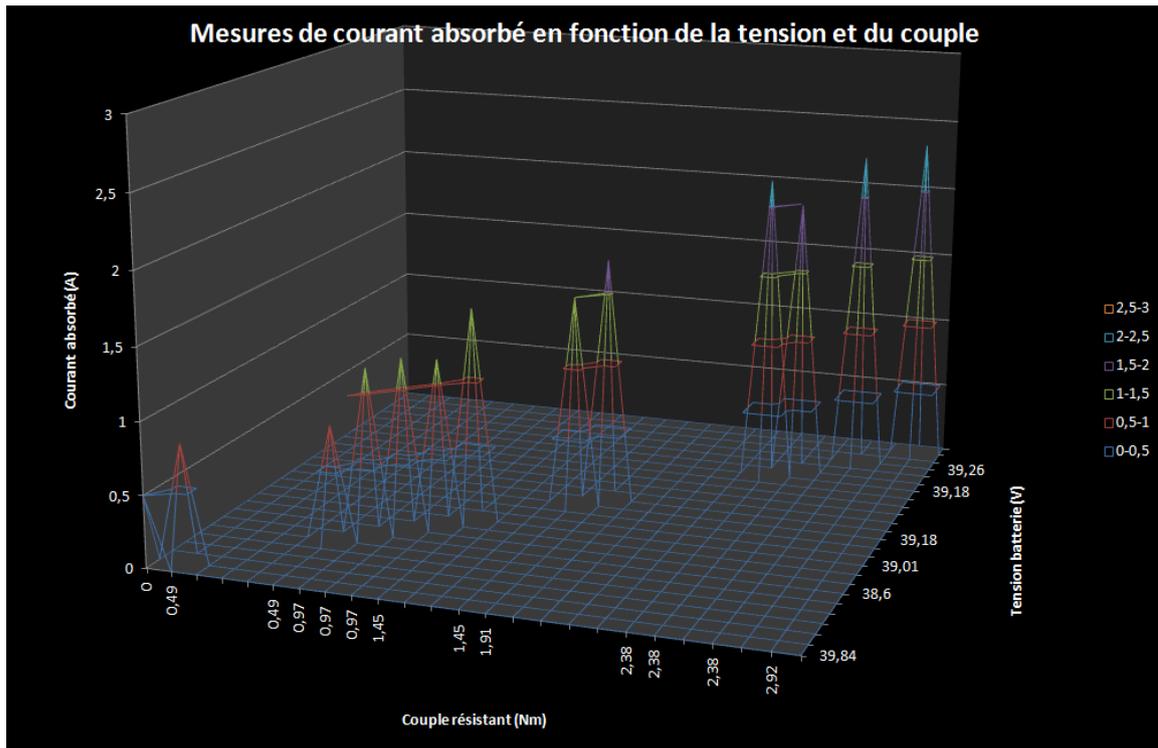
Afin de vérifier les paramètres, nous comparons alors les valeurs en régime établi de la simulation pour diverses valeurs de mesures en tension de batterie et en charge appliquée à l'axe.

Le banc de tests, contenu dans le fichier *moteur_c.ame*, est modélisé comme suit :



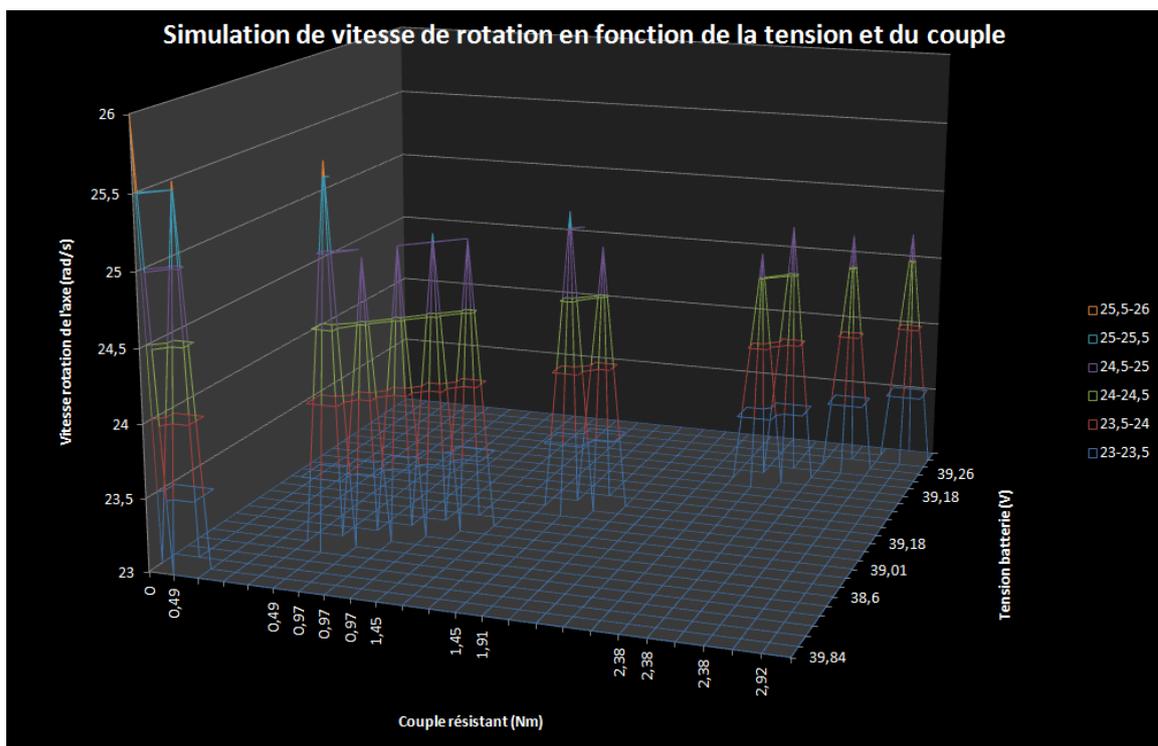
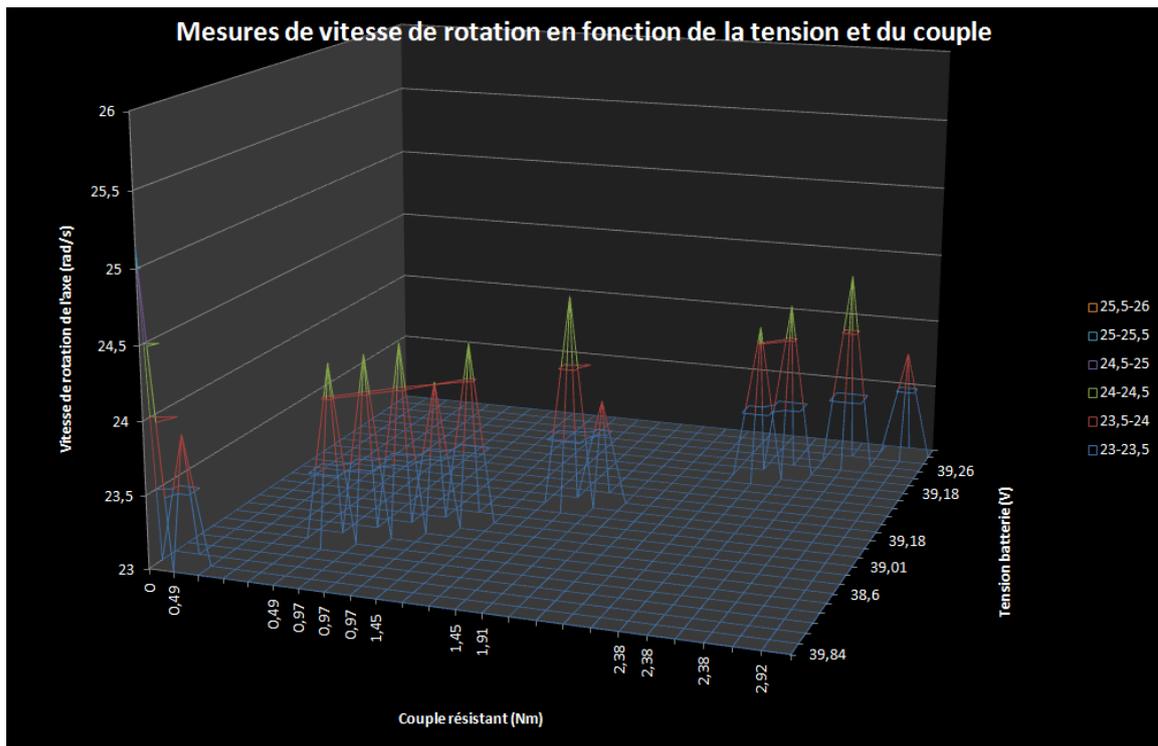
Afin de valider le paramétrage du moteur, nous traçons une partie des données et les résultats des simulations correspondants dans des graphiques 3D :

Tout d'abord pour le courant absorbé :



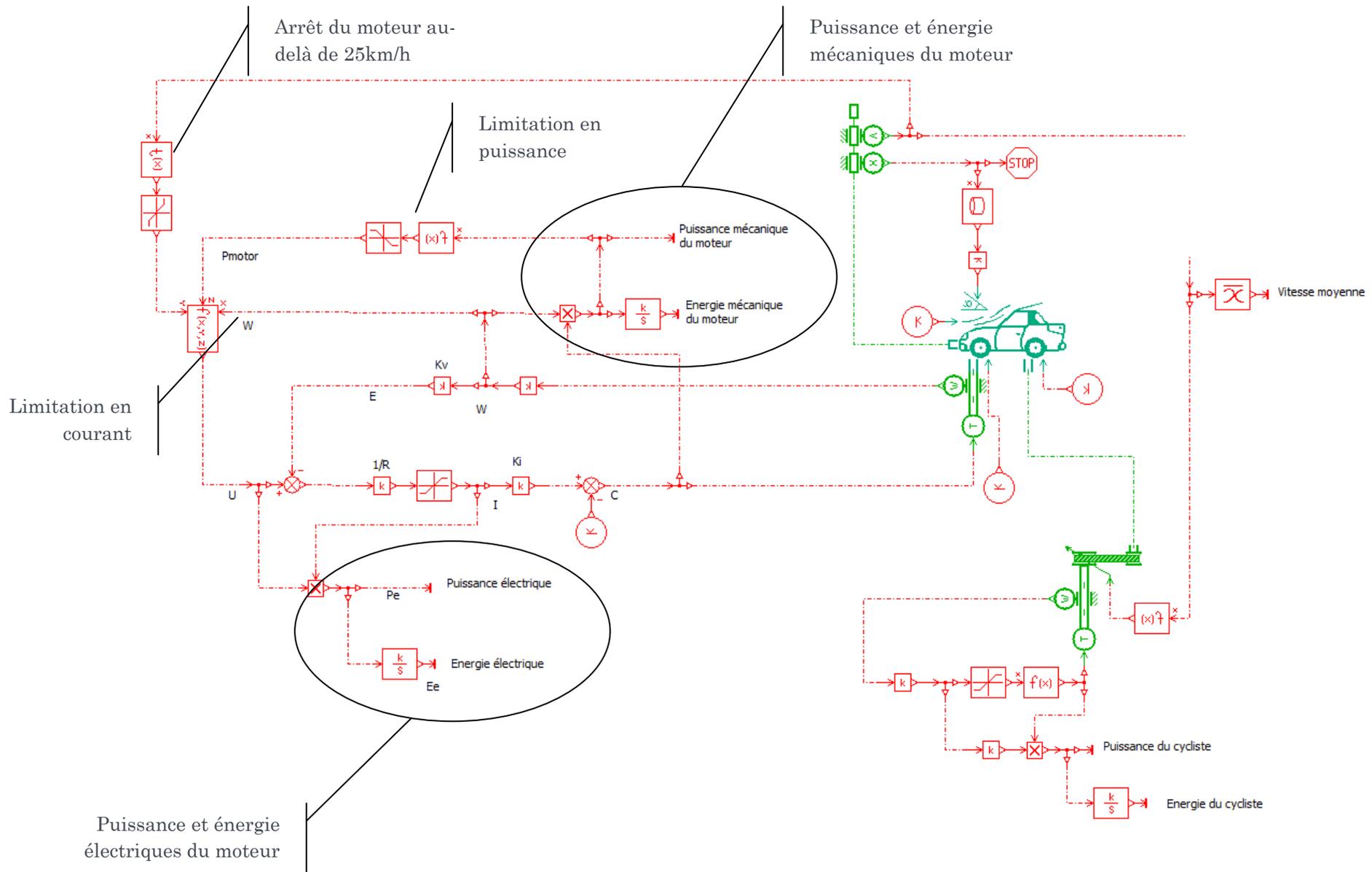
Nous remarquons que les résultats obtenus avec notre modèle correspondent aux mesures effectuées sur le moteur.

Et pour la vitesse de rotation de l'axe moteur :



De ce côté, nous pouvons voir une petite translation de la valeur des résultats obtenus par simulation par rapport aux mesures effectuées sur le moteur.

Nous validons le modèle du moteur malgré ce petit défaut minime.



Ce nouveau modèle se trouve dans le fichier *velo_motorise_g.ame*.

Remarque :

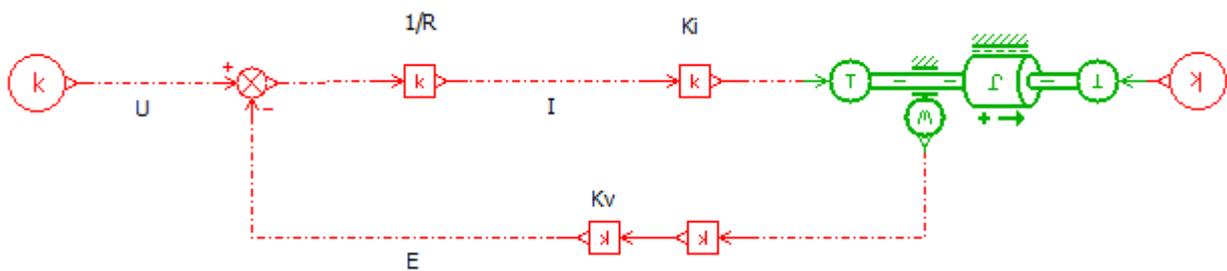
La disposition du vélo a été changée afin de faciliter l'implantation du moteur, sans procéder à des rotations ou symétries sur la modélisation du moteur.

Saturation en courant

Nous introduisons dans ce modèle, une saturation en courant entre 0 et 20A.

Pour cela, nous utilisons une saturation pour la borne inférieure, mais la borne supérieure ne peut pas être saturée de la sorte.

Voyons le modèle du moteur :



Nous avons donc :

$$I = \frac{1}{R}(U - K_V \Omega)$$

Donc :

$$I_{MAX} = \frac{1}{R}(U_{MAX} - K_V \Omega)$$

$$U_{MAX} = R * I_{MAX} + K_V \Omega$$

Nous pouvons alors commander le moteur avec la tension :

$$U_{commande} = \min(40 ; R * I_{MAX} + K_V \Omega)$$

Saturation en puissance

La saturation en puissance est assurée par les informations issues du capteur de vitesse angulaire et de la commande en couple du moteur.

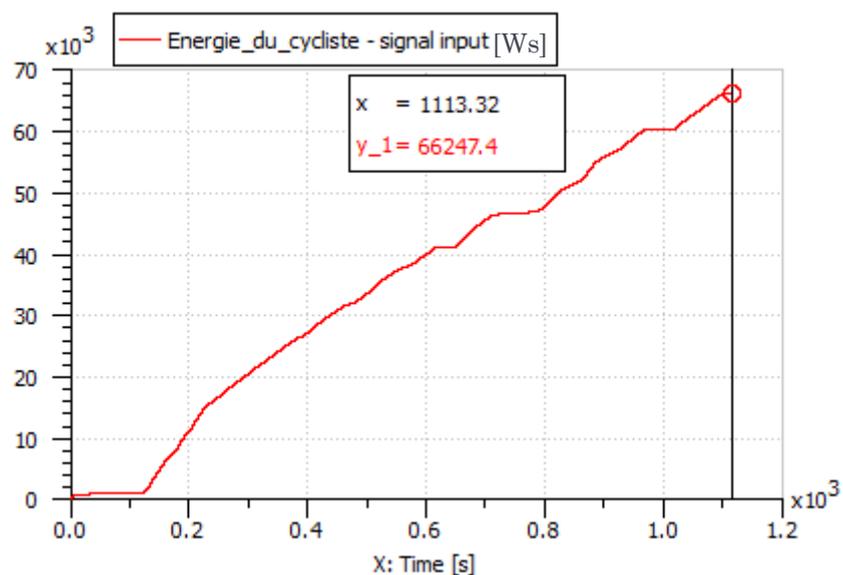
Grace à une fonction affine nous convertissons cette puissance en une sorte de signal comparable à une tension qui tend vers zéro lorsque la puissance mécanique se rapproche de 250 W.

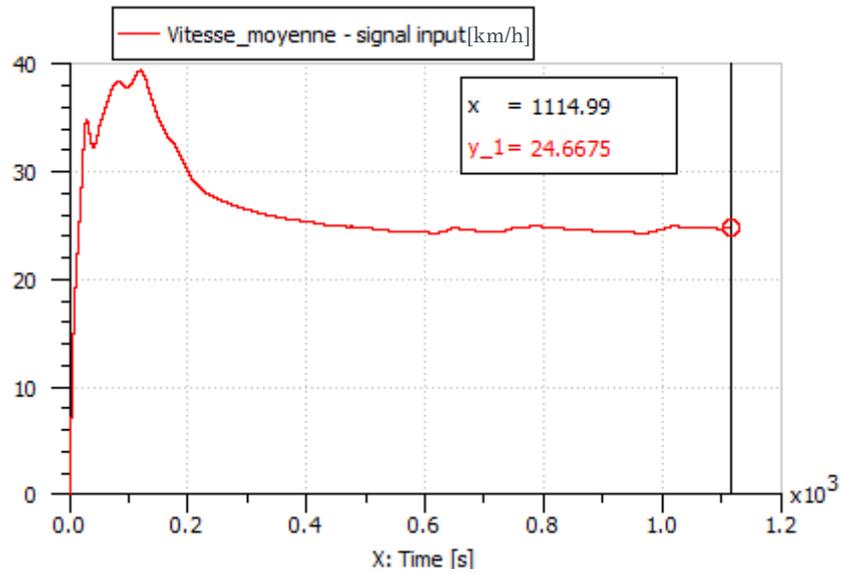
Nous procédons de même pour cesser l'alimentation du moteur électrique dès lors que le vélo dépasse les 25km/h.

Résultats de simulation

Nous allons maintenant pouvoir comparer le temps de parcours, la vitesse moyenne et les énergies consommées avec et sans assistance électrique :

	Sans assistance	Avec assistance
Temps parcours	25' 42"	18' 33"
Vitesse moyenne	17,83km/h	24,67km/h
Energie consommée par le cycliste	46.75Wh	18.4Wh

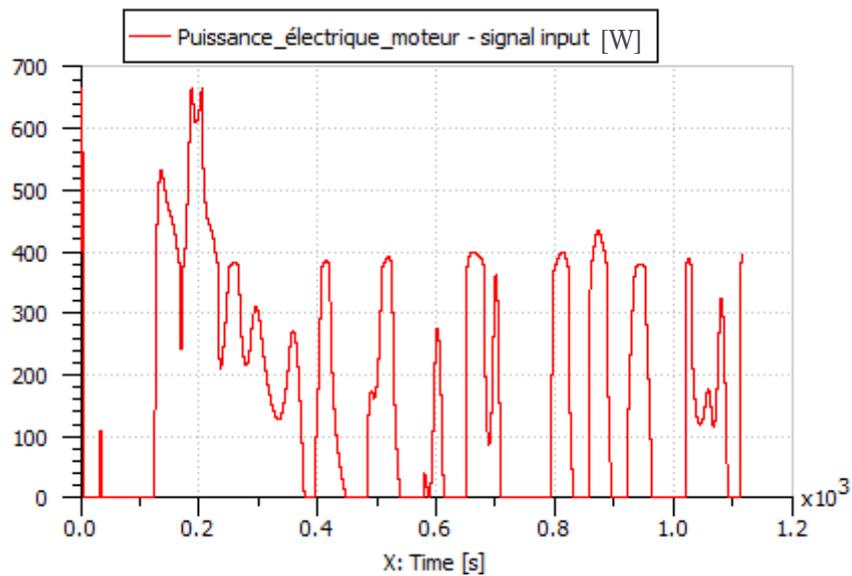




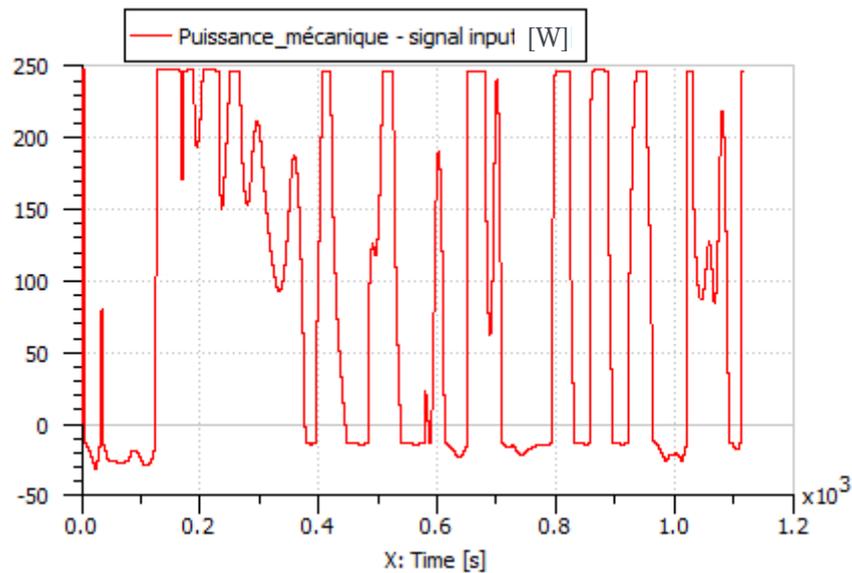
Consommations du moteur électrique

Nous pouvons évaluer le rendement du moteur en comparant la puissance électrique consommée à la puissance mécanique disponible :

Voici la puissance électrique consommée :



Et voici la puissance mécanique disponible (saturée à 250W) :

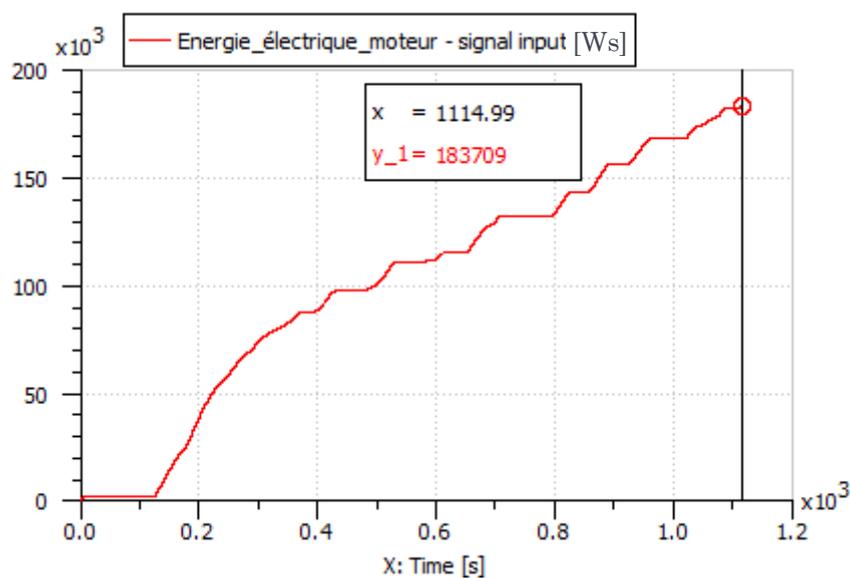


Le rendement avoisine alors :

$$\eta \approx \frac{250}{400} \approx 62.5\%$$

Le moteur est médiocre.

Voyons l'énergie qu'il a consommée sur le trajet :



Le moteur consomme 51.03Wh durant le trajet.

Sachant que la batterie installée sur le vélo est une batterie LiFePO₄ 40V 10Ah, son énergie est de 400Wh.

Puisque le moteur a consommé 51.03Wh pour un trajet de 18.5 minutes, nous pouvons estimer l'autonomie de la batterie à :

$$\frac{400}{51.03} * 18,5 = 145 \text{ minutes}$$

Ceci est une estimation sur un trajet donné. L'autonomie dépend fortement de la pente.

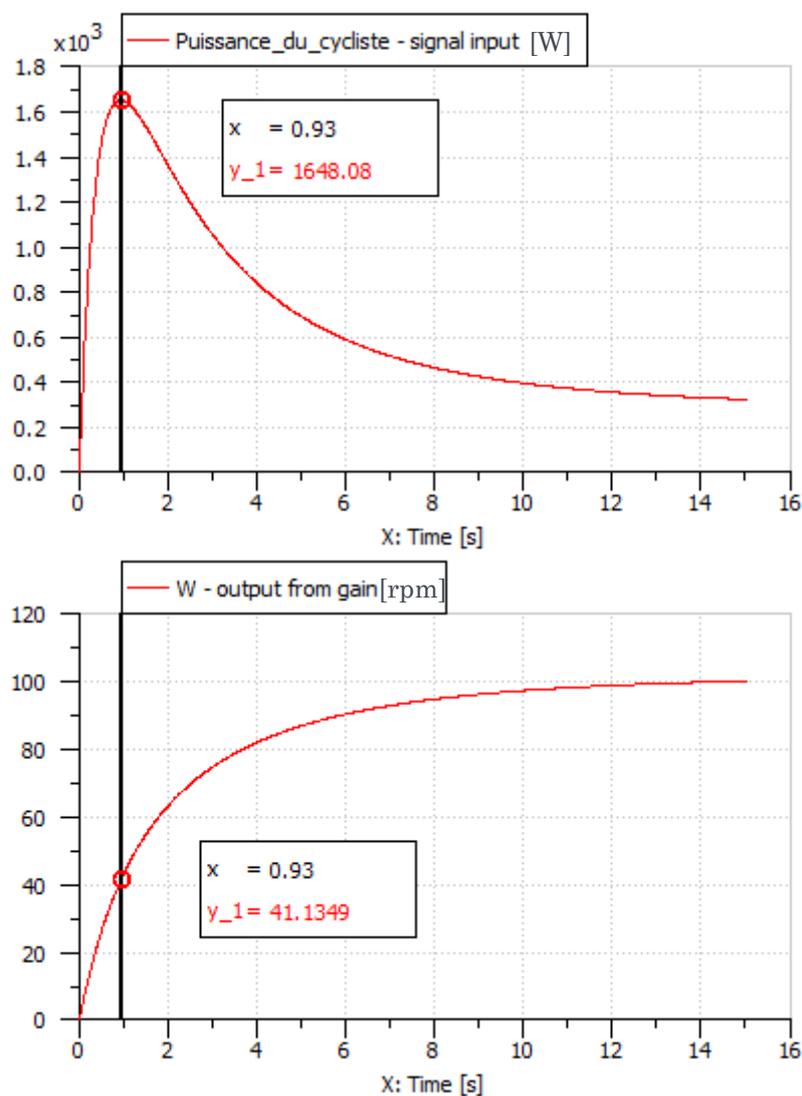
VII. POUR ALLER PLUS LOIN

Nous considérons maintenant que le vélo possède un dérailleur 8 vitesses.

$$k \in \left\{ \frac{42}{32}; \frac{42}{26}; \frac{42}{21}; \frac{42}{18}; \frac{42}{16}; \frac{42}{14}; \frac{42}{12}; \frac{42}{11} \right\}$$

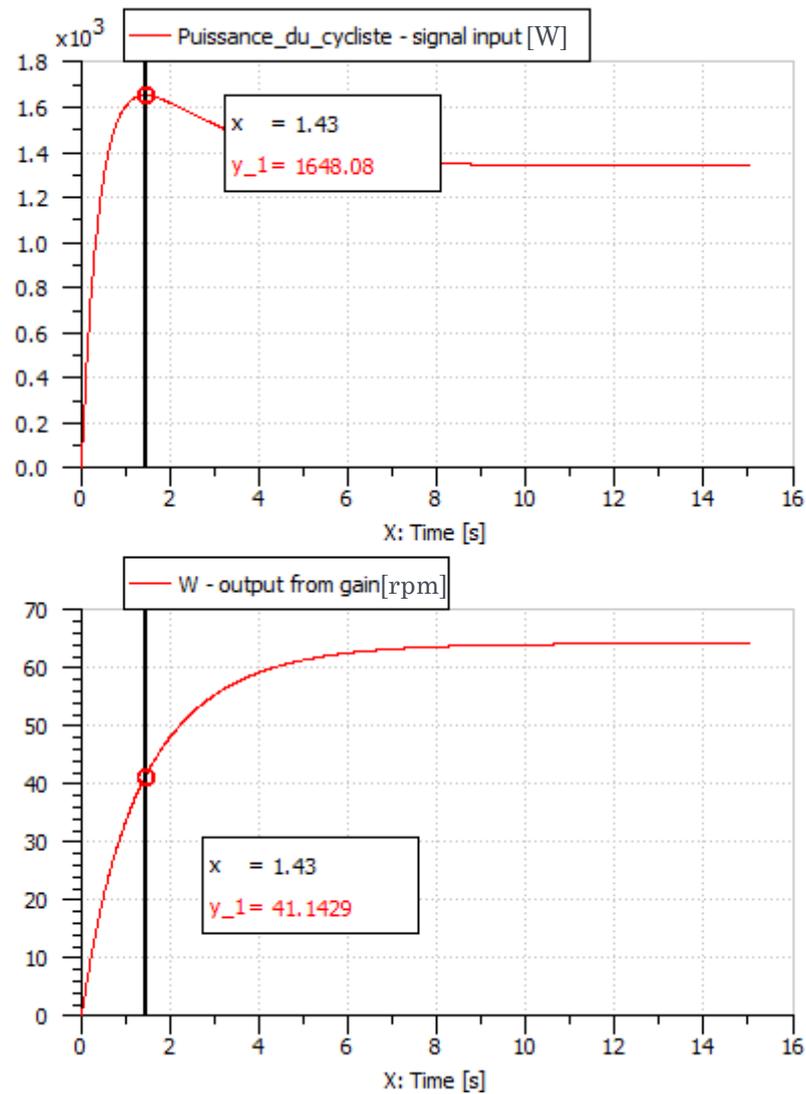
Trouvons tout d'abord la vitesse de pédalage qui maximise la puissance mécanique fournie par le cycliste. Pour cela, reprenons notre modèle de cycliste sur le vélo sans dérailleur, et sans assistance électrique, et traçons la puissance fournie dans diverses situations :

- A plat :



A plat, la vitesse de pédalage optimale est de 41.13rpm

- Dans une pente de +5% :



Dans une pente de +5%, la vitesse de pédalage optimale est de 41.14rpm

Nous estimons la vitesse de pédalage optimisant la puissance fournie par le cycliste à 42rpm.

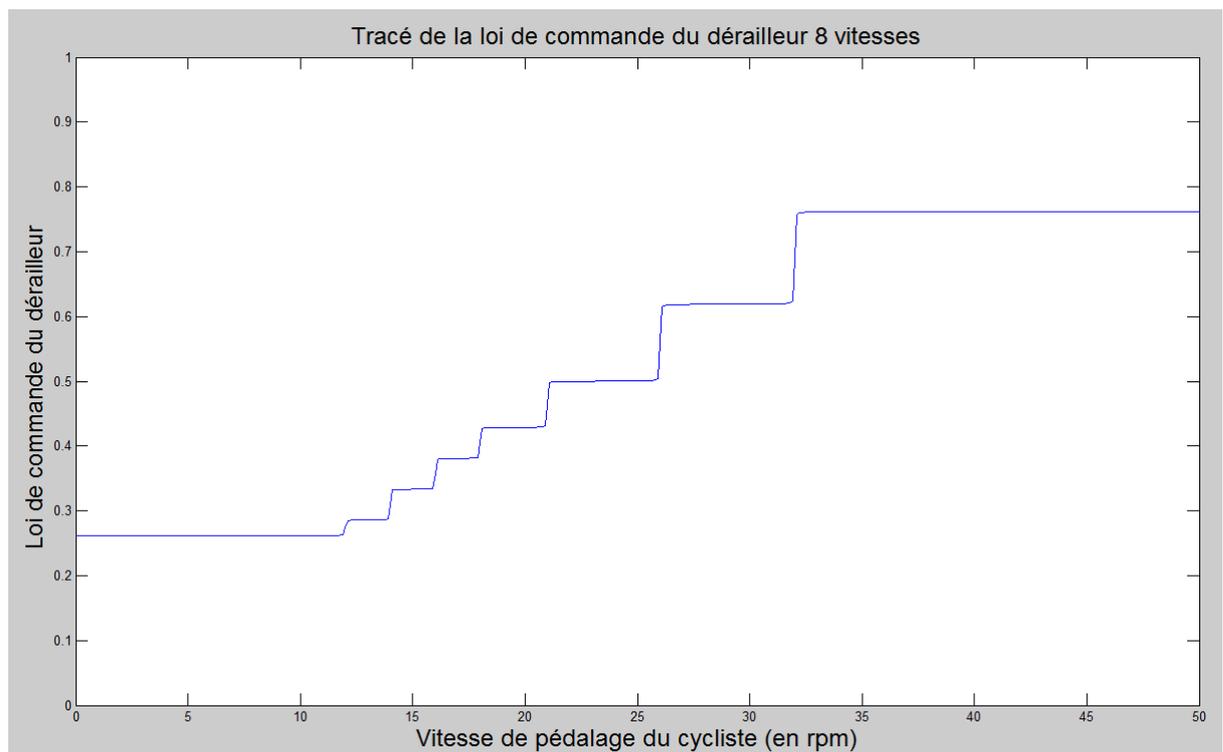
Elaborons alors la loi de commande correspondante.

Pour cela, nous allons à nouveau utiliser la fonction atan(). Voici l'expression de cette loi :

$$\begin{aligned}
 & \frac{1}{42} * \left\{ 11 + 1 * \left(\frac{\text{atan}(100 * (x - 12))}{\pi} + \frac{1}{2} \right) + 2 \right. \\
 & * \left[\left(\frac{\text{atan}(100 * (x - 14))}{\pi} + \frac{1}{2} \right) + \left(\frac{\text{atan}(100 * (x - 16))}{\pi} + \frac{1}{2} \right) \right. \\
 & \left. \left. + \left(\frac{\text{atan}(100 * (x - 18))}{\pi} + \frac{1}{2} \right) \right] + 3 * \left(\frac{\text{atan}(100 * (x - 21))}{\pi} + \frac{1}{2} \right) + 5 \right. \\
 & \left. * \left(\frac{\text{atan}(100 * (x - 26))}{\pi} + \frac{1}{2} \right) + 6 * \left(\frac{\text{atan}(100 * (x - 32))}{\pi} + \frac{1}{2} \right) \right\}
 \end{aligned}$$

Première vitesse (pointing to the first atan term)
 Passage de la deuxième vitesse (pointing to the second atan term)
 Passage de la septième vitesse (pointing to the seventh atan term)
 Passage de la huitième vitesse (pointing to the eighth atan term)

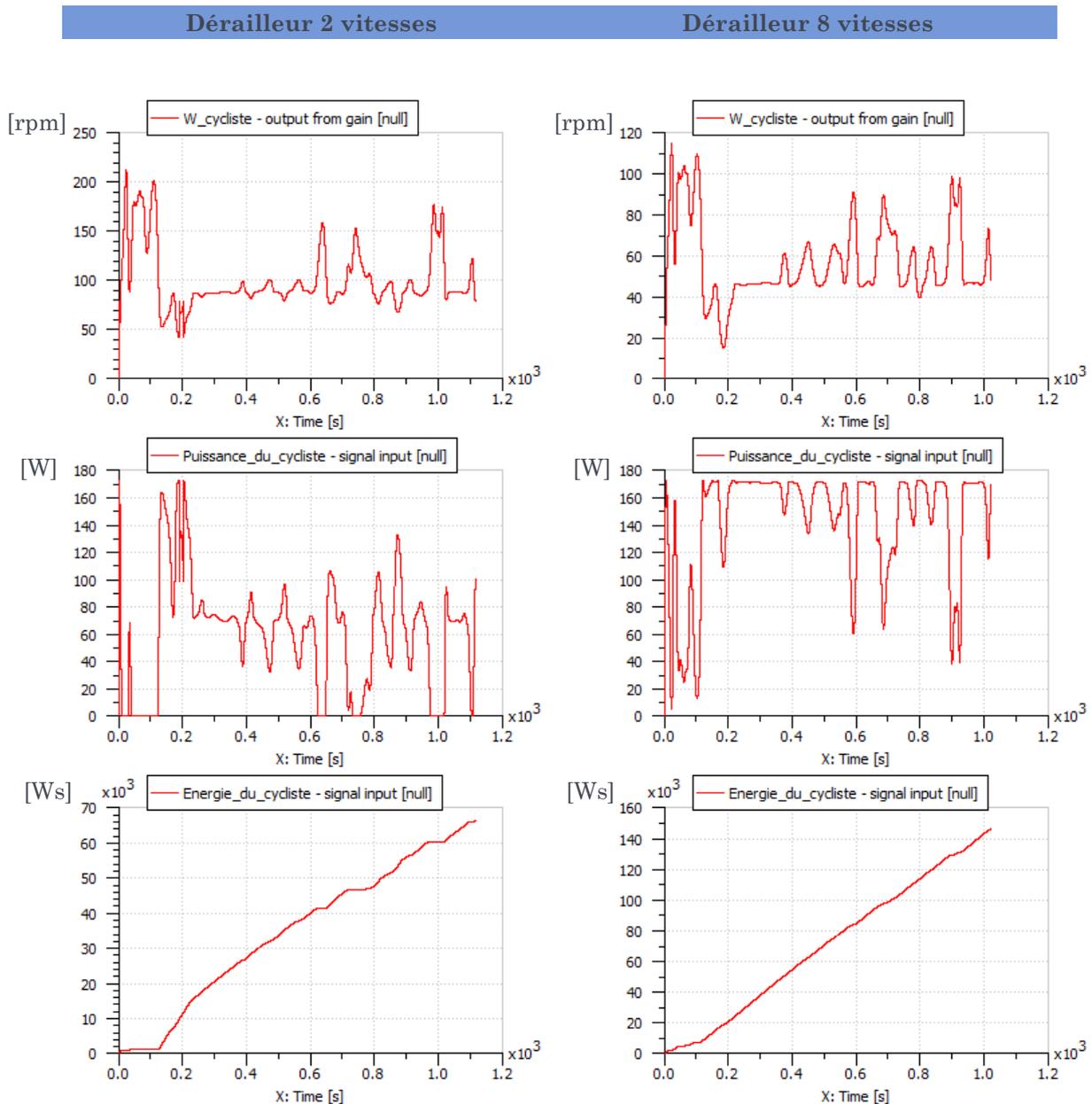
La représentation graphique de cette nouvelle loi de commande est :



Le fichier matlab permettant de visualiser cette loi est nommé *derailleur_8vitesses.m*.

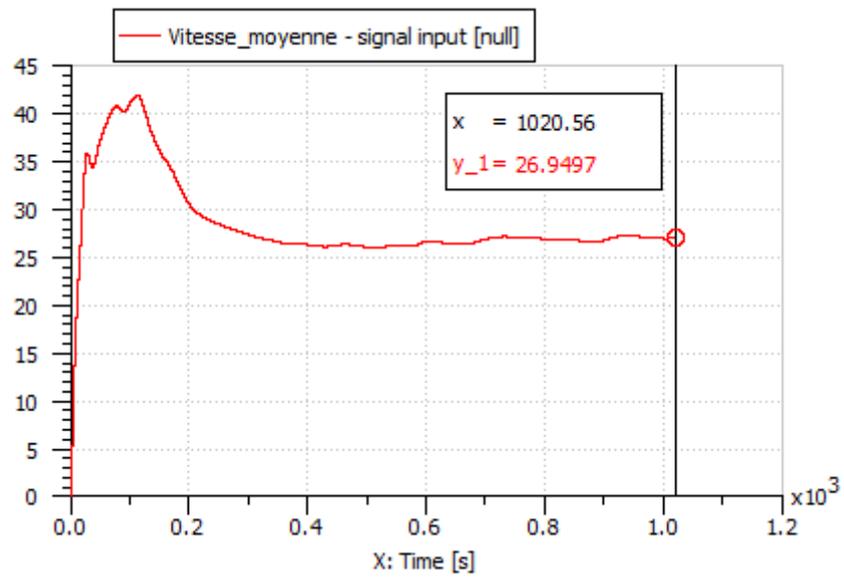
Il suffit maintenant d'adapter le modèle du vélo motorisé obtenu précédemment. Ce nouveau modèle se trouve dans le fichier *derailleur_8_vitesses_a.ame*.

Résultats de simulation



Nous pouvons remarquer que la vitesse de pédalage du cycliste s'est rapprochée d'une vitesse de 42 tours par minutes. La puissance dégagée par le cycliste est alors optimisée à son maximum et se stabilise à 170W. Mais ceci à un coût. Le cycliste consomme beaucoup plus d'énergie : Un total de 40.42 Wh sur le trajet total.

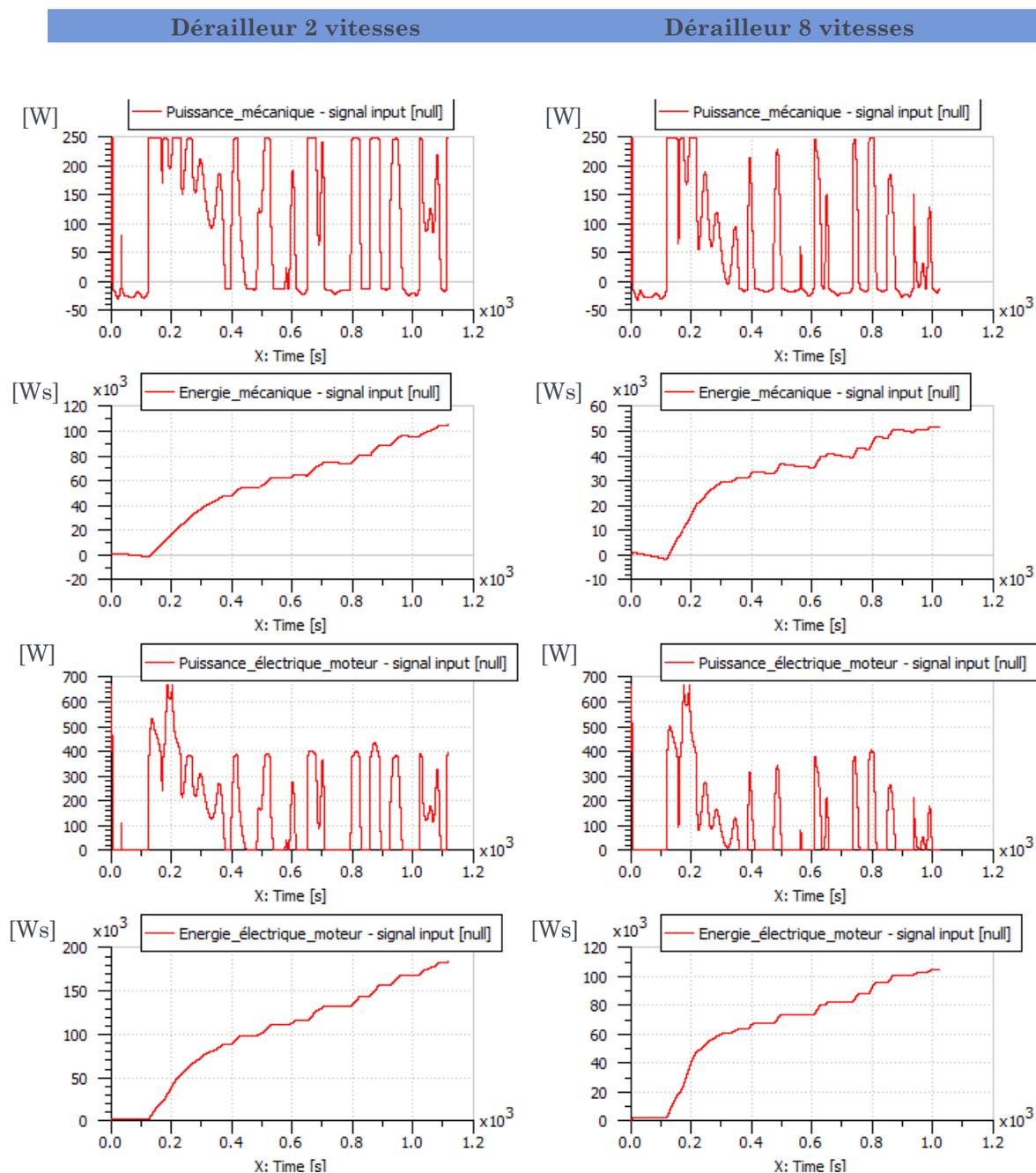
Intéressons nous alors aux consommations énergétiques du moteur électrique. Mais tout d'abord, voyons en combien de temps notre cycliste parcourt le trajet total et quelle est sa vitesse moyenne :



En comparant les deux dérailleurs :

	2 vitesses	8 vitesses
Temps parcours	18' 33"	17' 00"
Vitesse moyenne	24,67km/h	26,95km/h
Energie consommée par le cycliste	18,4Wh	40,42Wh

Au niveau du moteur électrique :



Avec notre nouveau dérailleur, les puissances consommées par le moteur électrique sont fortement diminuées. Voici un récapitulatif comparatif :

	2 vitesses	8 vitesses
Energie mécanique	29,04Wh	14,24Wh
Energie électrique	50,81Wh	29Wh
Autonomie batterie	145 minutes	234 minutes