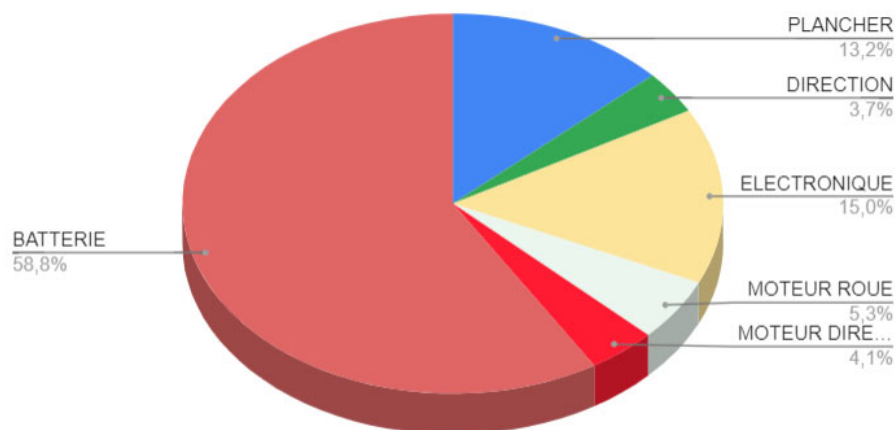


5. DOSSIER ÉNERGÉTIQUE

5.1 Bilan matière

Au travers d'un outil nommé Ecolizer, nous avons pu étudier l'impact des différents éléments de notre plateforme. L'écolizer est un outil d'aide à l'ACV basé à partir de données du logiciel SimaPro et diffusé par le pôle Eco-conception. L'indicateur est un indicateur au sens littéral du terme, il sert à donner une indication. La valeur absolue n'a pas beaucoup de signification pratique. Il s'agit de comparaisons relatives de matériaux et de procédés. Un point d'éco-indicateur correspond à un millième de l'impact environnemental annuel total d'un Européen moyen. L'unité utilisée est le millipoint (Mpt) est correspond à un millionième de cet impact.



L'élément le plus lourd est le châssis pesant 31 kg et est composé d'aluminium EN AW5754. Celui-ci étant sous forme de panneau sandwich, nous avons décomposé la fabrication en laminage en plaques et en soudage par ultrasons. Nous retrouvons un total de 17 350 mPt.

Nous retrouvons ensuite les batteries LiMNCO₂, il en faut 3 et chacune pèse 4.2kg. L'écolizer indique 7720 mPt/kg pour les batteries Li-ion rechargeables. On remarque que les batteries NiMH (batterie Nickel-Metal Hydride) sont plus respectueuses de l'environnement (6119 mPt/kg) car moins d'éléments toxiques mais sont moins dense en énergie. A ce jour, nous n'avons pas réussi à sourcer ce type de batterie. D'après l'écolizer en raison du fort impact environnemental des batteries et du poids présent sur notre plateforme, les batteries représentent 60% des impacts de la plateforme avec un total de 77 000 mPt.

Pour les moteurs, nous avons repris des éléments présents sur le forum pour les compositions où nous avons repris des pourcentages de masse par matériaux. Il était

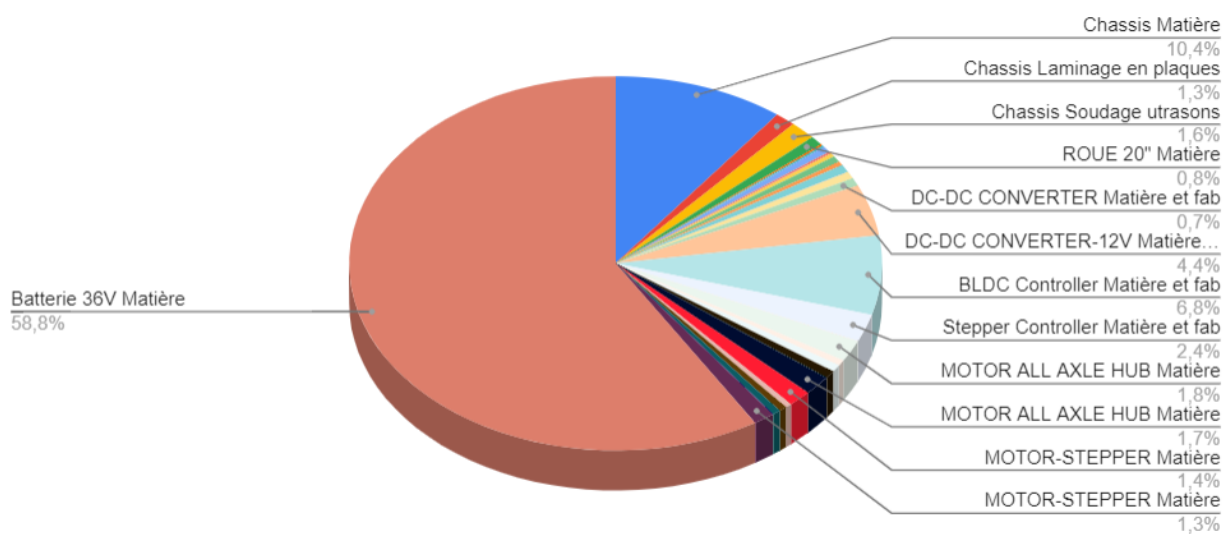
proposé de prendre les pourcentages suivants (Cuivre 30%, Aimants 10%, Fer 40%, Alu 20%). Nous avons décomposé les aimants en 3% de néodyme et 7% de fer pour essayer de retrouver des matières utilisables par l'écolizer. Ainsi, nous avons pu faire le calcul pour les moteurs roues et pour les moteurs de directions et trouver un total de 12340 mPt auquel il serait toutefois nécessaire d'ajouter des impacts liés aux différents procédés .

Au niveau des impacts, il s'en suit les différents composants électroniques. Nous avons 804 mPt pour l'Arduino pour 22360 mPt/kg pour ce type de carte imprimée. Des estimations ont été réalisées pour les autres composants électroniques et nous retrouvons un total de 20 000 mPt pour l'électronique. L'ensemble des dimensions de chaque carte est résumé dans la BOM avec également le poids.

Concernant les longueurs de câble électrique à utiliser, nous avons fait une première estimation à 10m mais cela pourra être réduit lors du câblage réel.

Pour la fin de vie, le châssis aluminium est entièrement recyclable pour un procédé de recyclage à 130 mPt/kg soit 4030 mPt. Utiliser de l'aluminium recyclé en produit fait passer les impacts de production de 439 mPt/kg à 134 mPt/kg. Les batteries usagées sont aussi valorisées mais nous n'avons pas de valeur à travers l'écolizer.

Le sourcing des composants pour la vie série n'est pas finalisé. Une partie des composants actuels sont des composants sur étagère qui permettent de montrer la faisabilité du projet et de pouvoir réaliser un premier prototype. L'origine des approvisionnements sera à revoir pour trouver les composants les plus locaux ou avec les technologies les plus durables.



Voici le tableau récapitulatif de l'étude Ecolizer en complément des graphiques.

Article	Fournisseur	Qté	Materiau	Item	Unité	Valeurs	Indicat	Résulta	Somme
Chassis	METAWELL	1	Aluminium EN A	Matière	/Kg	31	439	13609	17343
Chassis	METAWELL	1	Aluminium EN A	Laminage en plaques	/Kg	31	53	1643	
Chassis	METAWELL	1	Aluminium EN A	Soudage ultrasons	/m	12300	0,17	2091	
ROUE 20"		4	Aluminium	Matière	/Kg	0,6	439	1053,6	
ROUE 20"		4	Caoutchouc	Matière	/Kg	0,1	444	177,6	
LEVIER		4	Acier	Matière	/Kg	0,2	231	184,8	
BARRE DE DIRECTION		2	Acier	Matière	/Kg	1,5	231	693	
LAME CARBONE		2	Acier carbone	Matière	/Kg	0,5	231	231	
CREMAILLERE ROND	MICHAUD CHAI	2	Acier	Matière	/Kg	0,89	231	411,18	
CREMAILLERE ROND	MICHAUD CHAI	2	Acier	Tournage	/Kg	0,89	398	708,44	
PALIER COMPACT	MICHAUD CHAI	4	Aluminium	Matière	/Kg	0,25	439	439	
PALIER COMPACT	MICHAUD CHAI	4	Aluminium	Fraisage	/Kg	0,25	874	874	
EMBOUT ROTULE	MICHAUD CHAI	4	Acier	Matière	/Kg	0,02	231	18,48	
EMBOUT ROTULE	MICHAUD CHAI	4	Acier	Moulage	/Kg	0,02	11	0,88	4791,98
Arduino Due		1	PCB	Matière et fab	/kg	0,036	22360	804,96	19647,135
DC-DC CONVERTER		1	PCB	Matière et fab	/kg	0,04	22360	894,4	
DC-DC CONVERTER-12V		1	PCB	Matière et fab	/kg	0,26	22360	5813,6	
BLDC Controller		4	PCB	Matière et fab	/kg	0,432	5200	8985,6	
Stepper Controller		2	PCB	Matière et fab	/kg	0,3	5200	3120	
Lampe 12 V		4	LED	LED	/kg	1	7	28	
Fusibles		1	Acier allié	Matière	/kg	0,0023	250	0,575	
MOTOR ALL AXLE HUI	Ebikes	4	Cuivre (30%)	Matière	/kg	0,78	774	2414,88	
MOTOR ALL AXLE HUI	Ebikes	4	Cuivre (30%)	Tréfilage	/kg	0,78	209	652,08	
MOTOR ALL AXLE HUI	Ebikes	4	Néodyme(3%)	Matière	/kg	0,078	2600	811,2	
MOTOR ALL AXLE HUI	Ebikes	4	Fer (47%)	Matière	/kg	1,222	173	845,624	
MOTOR ALL AXLE HUI	Ebikes	4	Fer (47%)	Moulage	/kg	1,222	11	53,768	
MOTOR ALL AXLE HUI	Ebikes	4	Alu (20%)	Matière	/kg	0,52	1045	2173,6	
MOTOR ALL AXLE HUI	Ebikes	4	Alu (20%)	Moulage	/kg	0,52	11	22,88	6974,032
MOTOR-STEPPER	Ebikes	2	Cuivre (30%)	Matière	/kg	1,2	774	1857,6	5364,64
MOTOR-STEPPER	Ebikes	2	Cuivre (30%)	Tréfilage	/kg	1,2	209	501,6	
MOTOR-STEPPER	Ebikes	2	Néodyme(3%)	Matière	/kg	0,12	2600	624	
MOTOR-STEPPER	Ebikes	2	Fer (47%)	Matière	/kg	1,88	173	650,48	
MOTOR-STEPPER	Ebikes	2	Fer (47%)	Moulage	/kg	1,88	11	41,36	
MOTOR-STEPPER	Ebikes	2	Alu (20%)	Matière	/kg	0,8	1045	1672	
MOTOR-STEPPER	Ebikes	2	Alu (20%)	Moulage	/kg	0,8	11	17,6	
Batterie 36V	OZO	3	LiMNCO2	Matière	/kg	4,2	6119	77099,4	

5.2 Calcul des énergies d'utilisations

5.2.1 Motorisation

Le prototype utilise 4 moteurs roue électriques BLDC. Les hypothèses d'un cycle type sont :

- Distance à parcourir maximale : $D_{MAX} = 50 \text{ km}$
- La pente maximale à gravir est celle d'un parking qui est optimale à 11% et maximale à 18% soit une pente maximale en degrés : $\alpha_{MAX} = 10.2^\circ$ ou en radians : $\alpha_{MAX} = 0.18 \text{ rad}$
- La vitesse maximale visée est de $v_{MAX} = 25 \text{ km/h} = 7 \text{ m/s}$
- PTAC visée : $m_{MAX} = 500 \text{ kg}$
- L'accélération visée permet un passage de l'arrêt à v_{max} en 5s sur du plat soit une accélération de $a_{max} = \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{25 \times 1000}{3600 \times 5} = 1.4 \text{ m/s}^2$
- Le diamètre des roues envisagées est de 20 pouces soit $D_{roue} = 0.5 \text{ m}$
- La puissance totale des moteurs doit être $P_{total} \leq 2000 \text{ W}$

Ce qui en découle de ce cahier des charges est qu'avec 4 moteurs et une puissance totale de 2000W les moteurs doivent avoir une puissance nominale de $P_{nom} = 500 \text{ W}$.

Concernant les paramètres aérodynamiques on fixe arbitrairement les paramètres suivants :

- Coefficient de traînée $C_x = 1.0$
- Surface frontale $S_f = 1.5 \times 1.2 = 1.8 \text{ m}^2$

L'effort total de résistance à l'avancement peut s'écrire :

$$F_r = F_{roul} + m \cdot g \cdot \sin(\alpha) + m \cdot a + \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot C_x \cdot S_f \cdot v^2$$

La force F_{roul} correspond aux frottements de roulement et s'exprime :

$$F_{roul} = CRR \cdot m \cdot g$$

Avec CRR étant le coefficient de résistance au roulement, nous prendrons ici une valeur moyenne¹ de :

$$CRR = 0.01$$

On a également la force de traînée avec $\rho = \frac{1.28 \text{ kg}}{\text{m}^3}$ et v la vitesse du véhicule.

On peut donc en déduire le couple C_r nécessaire :

$$C_r = F_r \cdot R_{roue} \quad C_r = R_{roue} \cdot \left(\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot C_x \cdot S_f \cdot v^2 + m \cdot (CRR \cdot g + g \cdot \sin(\alpha) + a) \right)$$

La puissance mécanique nécessaire pour un moteur s'exprime :

¹ https://fr.wikipedia.org/wiki/R%C3%A9sistance_au_roulement#Coefficient_de_r%C3%A9sistance_au_roulement

$$P_{moteur} = \frac{C_r \cdot \Omega}{N} = \frac{C_r}{N} \cdot \frac{v}{R_{roue}}$$

Où Ω est la vitesse de rotation en rad/s, v est la vitesse. Donc :

$$P_{moteur} = \frac{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot C_x \cdot S_f \cdot v^3 + m \cdot v \cdot (CRR \cdot g + g \cdot \sin(\alpha) + a)}{N}$$

Avec :

m : PTAC (kg) / v : Vitesse ($\frac{m}{s}$) / a : Accélération ($\frac{m}{s^2}$) / g : Force de gravité ($\frac{m}{s^2}$)

α : Pente à gravir (rad) / CRR : Coefficient de roulement / N : Nombre de moteur

Certains de ces paramètres sont des constantes naturelles ou imposées dans notre cahier des charges tel que :

$$g = 9.81 \text{ m/s}^2 / N = 4 / CRR = 0.01 / S_f = 1.8 \text{ m}^2 / C_x = 1.0$$

Il est nécessaire de différencier plusieurs cas afin d'avoir un dimensionnement de la puissance moteur nécessaire au plus juste.

1 – Cas d'un déplacement sur du plat en régime établi :

Nous nous intéressons donc au déplacement du véhicule sur une pente nulle. Tout d'abord étudions ce cas lorsque le véhicule n'est pas chargé mais comprend seulement son propre poids et le poids du conducteur.

Lorsqu'il est lancé le véhicule doit seulement vaincre les frottements de roulement et sa traînée aérodynamique. Cela correspond donc à une accélération nulle.

Dans ce cas les paramètres prennent les valeurs suivantes :

$$\{m = 200 \text{ kg} \quad v = 7 \text{ m.s} \quad a = 0 \quad \alpha = 0 \text{ rad}$$

Nous obtenons donc une puissance pour un moteur de $P_{moteur} = 133 \text{ W}$ pour maintenir le véhicule à une vitesse de 25km/h.

Prenons maintenant le cas d'un véhicule transportant toute sa charge utile soit un poids total de 500 kg.

$$\{m = 500 \text{ kg} \quad v = 7 \text{ m.s} \quad a = 0 \quad \alpha = 0 \text{ rad}$$

Nous obtenons donc une puissance pour un moteur de $P_{moteur} = 185 \text{ W}$ pour maintenir le véhicule à une vitesse de 25km/h avec une charge utile de 300kg.

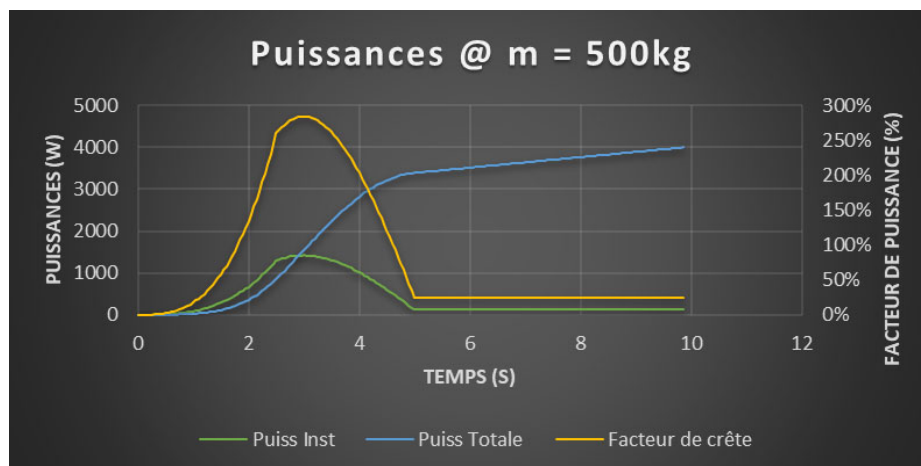
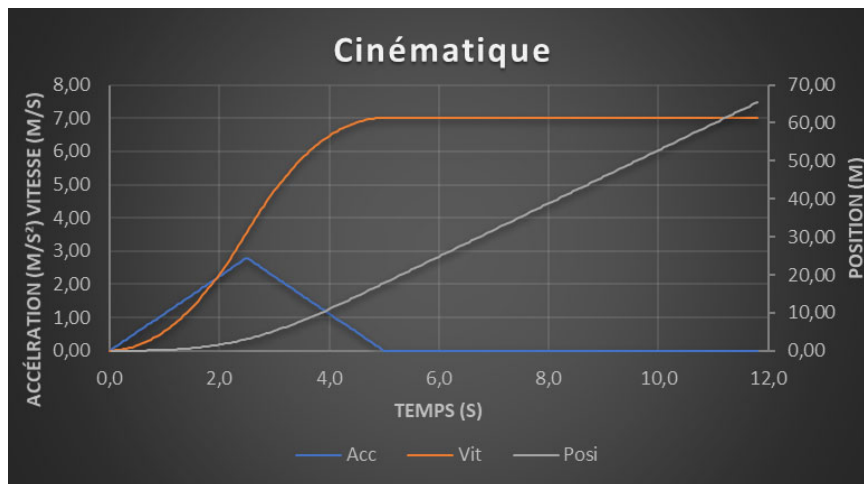
Dans ces deux cas la puissance nécessaire pour un moteur est largement inférieure à la puissance nominale des moteurs et ces deux cas sont donc validés.

2 – Cas d'un déplacement sur du plat en régime transitoire

Considérons maintenant les régimes transitoires, notamment les accélérations.

Dans ces phases l'accélération n'est pas nulle et viens donc nécessiter une puissance transitoire supplémentaire sur les moteurs.

Il est plus agréable d'avoir une accélération progressive au début et à la fin de la courbe d'accélération, dans ce cas-là, la puissance transitoire nécessaire évolue pour passer par un maximum :



On constate donc une puissance maximale en accélération de 1440 W en charge et de 597 W à vide.

Cette puissance correspond à la puissance mécanique nécessaire en accélération. C'est donc une puissance crête sur une durée de 5s ce qui nous donne un facteur crête de

$$\hat{\eta} = \frac{P_{moteur_{500kg}}}{P_{nom}} = 288\%$$

Sur de courtes périodes non répétées il est tout à fait envisageable de dépasser la puissance nominale du moteur et d'atteindre sa puissance crête. L'ordre de grandeur entre la puissance nominale et la puissance crête est d'environ 350%.

3 – Cas d'un déplacement en pente en régime établi :
En pente à 18%:

$$P_{mot_{200kg}} = 741W \quad P_{mot_{500kg}} = 1705W$$

4 – Cas d'un déplacement en pente en régime transitoire :

En pente à 18%:

$$P_{mot_{200kg}}^{\wedge} = 1072 W \quad P_{mot_{500kg}}^{\wedge} = 2597 W$$

5 – Récapitulatif et dimensionnement du moteur

Voici un tableau récapitulatif des différents cas de figure :

	Masse 200 kg		Masse 500 kg	
	Pente 0%	Pente 18%	Pente 0%	Pente 18%
Puissance établie (W)	133	741	185	1705
Puissance maximale (W)	597	1071	1440	2597
Facteur de crête établi (%)	27%	148%	37%	341%
Facteur de crête Max (%)	119%	214%	288%	519%

Tableau 1 - Récapitulatif des puissances sous différentes conditions

On remarque que le franchissement d'une pente à 18% pose un problème pour un dimensionnement de moteurs de 500W chacun. En effet et notamment en charge maximale les valeurs de facteurs de crête ne sont pas admissibles pour la survie du système. On peut envisager ce type de franchissement mais sur de courtes durées.

Dans le cadre d'un premier prototype il est tout à fait envisageable de diminuer la charge maximale afin de pouvoir valider le fonctionnement global et pour permettre également de valider ces résultats théoriques par une campagne de mesure.

5.2.2 Contrôleur

Caractéristiques

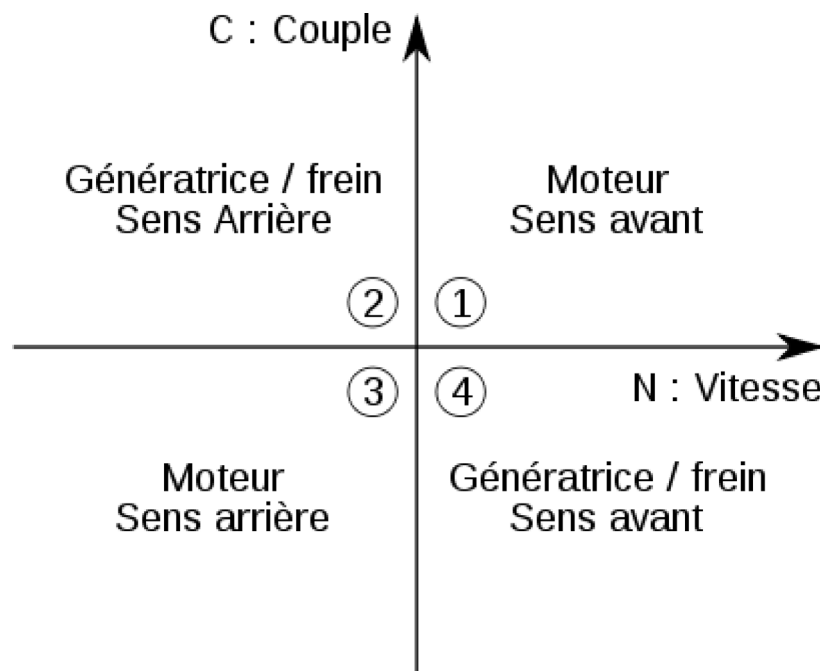
Le contrôleur à pour rôle de piloter le moteur. Il transforme la tension continue de la batterie en champ tournant pour moteur sans balais (BLDC) avec la possibilité de réguler sa vitesse.

Les principales caractéristiques des contrôleurs sont les suivantes :

- Puissances maximales
- Gestion des différents quadrants
- Boucle ouverte ou boucle fermée

En effet les puissances maximales varient très largement et impacte principalement la taille du contrôleur. L'autre facteur est la possibilité pour le contrôleur de travailler sur les 4

quadrants du moteur. Les quadrants correspondent aux différents modes de fonctionnement du moteur² :



Dans le cas où le contrôleur sait travailler dans les quatre quadrants cela signifie qu'il saura faire tourner le moteur dans les deux sens et également le freiner dans les deux sens de rotation.

Concernant le mode de boucle, les contrôleurs peuvent utiliser des capteurs dans le moteur (capteur magnétique Hall) afin de connaître l'état du moteur et ainsi adapter le pilotage au moteur, dans ce cas là on parle de boucle fermée. Dans le cas où le contrôleur n'a pas ces informations, on parle de boucle ouverte.

Dans notre cas avec des moteurs de 500W et la contrainte de pouvoir faire une marche arrière il est donc nécessaire de choisir des contrôleurs 4 quadrants avec une puissance minimale de 500W. De plus, nous travaillerons en boucle fermée pour éviter des risques de décrochage ou de glissement trop important.

Concernant le sourcing, le choix semble s'orienter vers un moteur type GRIN de chez ebikes.ca qui propose plusieurs versions et différentes options.

Dans le cas d'une pente de 10° avec une charge de 125 kg pour 1 moteur, le moteur va surchauffer en 11 minute pour sa version non refroidie par statorade ne surchauffera pas avec la version statorade. **L'intérêt du Statorade est donc non négligeable.**

Concernant le type du moteur (SLW, STD, FST) la meilleure vitesse en pente est réalisée avec la version standard. De plus, en version Standard, la puissance à appliquer avec une charge de 125 kg sur du plat pour un moteur est de 79% de la commande (les gaz à 79%) pour arriver à 25 km/h. Ce qui laisse une marge intéressante pour franchir des obstacles tels que les pentes.

² https://fr.wikipedia.org/wiki/Variateur_%C3%A9lectronique_de_vitesse#Quadrants_de_fonctionnement_d'un_moteur_asynchrone

Concernant la version 3 du GRIN, les différences majeures avec la V2 sont surtout mécaniques. Il conviendra donc de définir les aspects mécaniques pour partir sur la V2 où la V3.

Préco choix moteur : Grin V2 - Standard + Statorade

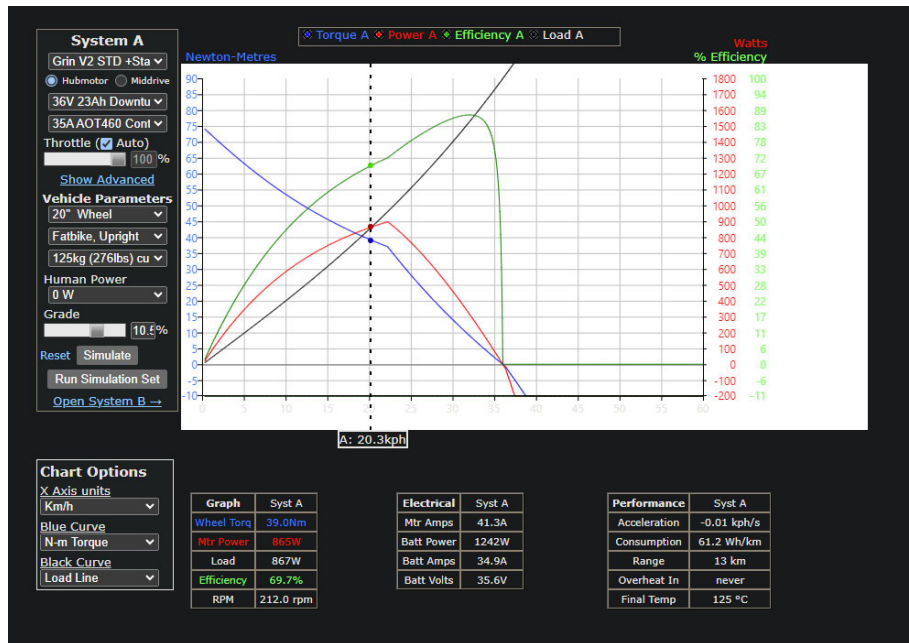


Figure 1 - Grin V2 - Standard + Statorade

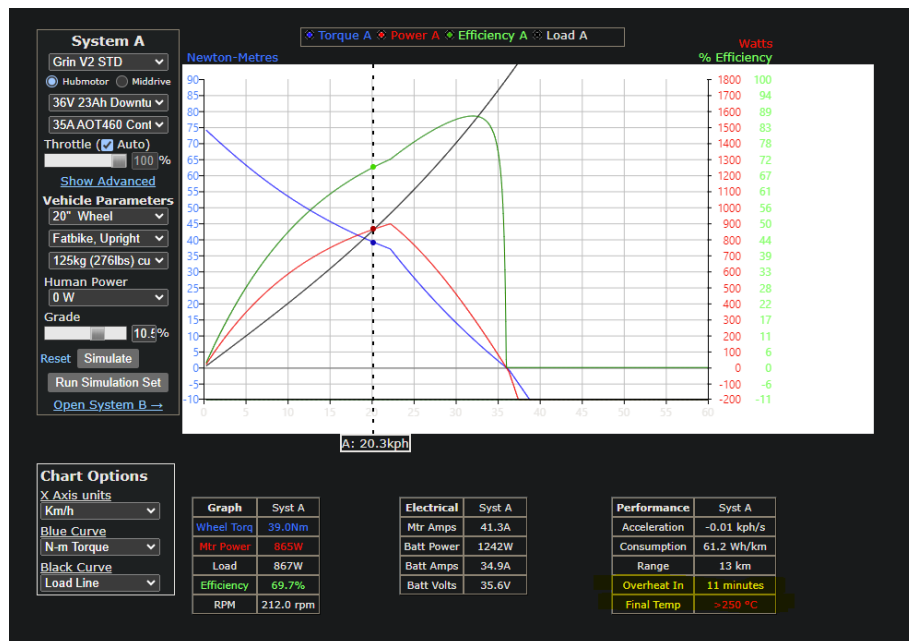


Figure 2 - GRIN V2 -Standard - sans statorade

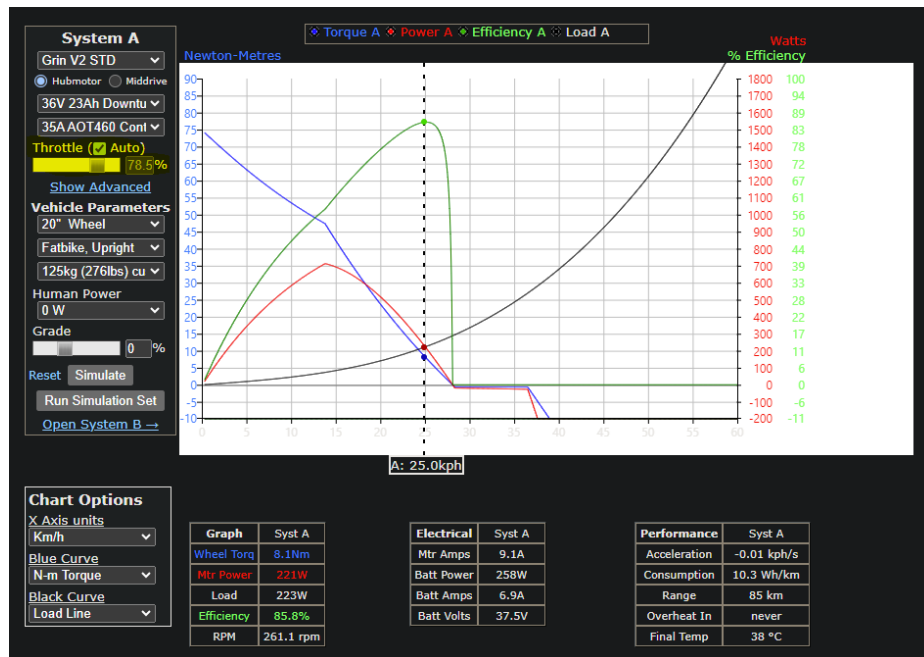


Figure 3 - Sur du plat avec un GRIN V2 STD @ 25 km/h

5.2.3 Batterie

La batterie du système doit permettre au véhicule de parcourir 50km avec une vitesse maxi de 25 km/h et une pente maxi de 10°. De plus, la destination d'usage de ce véhicule se trouve en milieu mixte urbain et rural ce qui implique une circulation dense et donc de nombreuses phases de freinage et d'accélération dans un cas et des phases à vitesse maximale plus longue dans un autre.

Afin de dimensionner la batterie il est nécessaire de définir un parcours type et ce pour estimer une consommation moyenne des différentes phases de ce parcours.

Hypothèses sur le parcours en milieu urbain ³

Accélération : En milieu urbain, les accélérations sont généralement fréquentes en raison des feux de signalisation, des intersections et des arrêts fréquents. On peut estimer que le véhicule passe environ 20-30% du temps à accélérer.

Vitesse moyenne : La vitesse moyenne en milieu urbain dépend fortement de la circulation, mais on peut estimer qu'elle se situe généralement entre 10 et 25 km/h. Le véhicule pourrait passer environ 40-60% du temps à rouler à cette vitesse moyenne.

Freinage : Le freinage est souvent nécessaire lorsqu'on approche des intersections, des feux rouges, des passages pour piétons, etc. Environ 10-20% du temps peut être consacré au freinage.

De ces hypothèses on définit un profil :

³ <https://chat.openai.com/share/7026525e-8957-4c13-b8f9-9b0b6de3661f>

τ_a : Rapport de temps d'accélération = 30%

τ_{vm} : Rapport de temps à vitesse moyenne = 50%

τ_f : Rapport de temps de freinage = 20%

V_{moy} : Vitesse moyenne = 15 km/h

On peut donc exprimer la consommation moyenne du véhicule en se basant sur les calculs de puissance réalisés précédemment et un facteur de rendement de l'ensemble contrôleur / moteur qui sera estimé ici à une valeur de $\eta = 70\%$.

$$C_{bat} = \frac{50}{V_{moy}} \times \frac{4}{\eta} \times \left(\frac{\tau_a \cdot P_{acc}}{t_{acc}} + \tau_{vm} \cdot P_0 \right)$$

Où P_{acc} est la puissance totale consommée pour une accélération jusqu'à la vitesse max (V_{Max}) en un temps t_{acc} et où P_0 est la puissance consommée en régime établi à la vitesse max.

On obtient donc une capacité nécessaire de batterie de $C_{bat} = 5700Wh$ pour une charge totale de 500 kg.

En fonction de la tension nominale du moteur choisi il faudra donc choisir la batterie correspondante :

Tension (V)	36	48	52
Capacité (Ah)	158	119	110

Enfin dans le choix de la batterie intervient la puissance maximale instantanée qu'elle est capable de délivrer. Il faudra donc prendre en compte ce paramètre pour le choix de la batterie. Notre système étant de 4 moteurs de 500W il serait nécessaire qu'en fonctionnement nominal la batterie puisse délivrer 2000 W instantané.

On se rend compte que la capacité nécessaire, notamment pour une batterie de 36V sort des standards de production du milieu des VAE. Il sera donc peut être nécessaire d'envisager une fabrication sur mesure ou plus simplement de mettre en parallèle des batteries de capacités inférieure (ex : 4 batteries 36V 35Ah) ce qui d'un autre côté nécessitera un soin particulier pour la réalisation de la charge et de la protection des batteries.