



Lycée Ermesinde
Lycée public autonome à plein temps

Un véhicule solaire comme moyen de transport individuel

Réalisation & Analyse

Travail Individuel



Auteur : Lambert Thomas

Classe 2^e CB

Directeur de Mémoire : M. Scholtes Pol

Année 2019-2020

Je déclare sur honneur avoir développé et rédigé ce mémoire sans aide abusive d'autrui.

Table des matières

1.	Introduction	4
1.1	Problématique	4
1.2	Les véhicules	4
1.3	Objectif de ce mémoire	4
2.	Réflexion de principe	6
2.1	Type d'énergie	6
2.2	Motorisation et auxiliaires.....	6
3.	Le choix des composantes du véhicule	7
3.1	La cellule photovoltaïque	7
3.2	Le moteur électrique	9
3.3	Accumulateur.....	11
4.	Dimensionnement	15
4.1	Le châssis	15
4.2	Les panneaux photovoltaïques	15
4.3	Le moteur électrique	17
4.4	Les batteries d'accumulateur	17
5.	Rapport de construction	18
5.1	Remise en état du kart	18
5.2	Montage du moteur	18
5.3	Montage des batteries d'accumulateur	18
5.4	Montage de l'installation photovoltaïque	19
5.5	Résultat final	19
6.	Manuel d'utilisation.....	21
6.1	Entreposage du véhicule	21
6.2	Prise en charge du véhicule	22

6.3	Conduite du véhicule.....	23
6.4	Mise hors service	25
6.5	Maintenance du véhicule	26
7.	Analyse des différents paramètres.....	27
7.1	Charge des batteries	27
7.2	Consommation du moteur	27
8.	Pistes d'amélioration des performances du véhicule.....	33
8.1	Autonomie.....	33
8.2	Puissance du véhicule	34
8.3	Conclusion	34
9.	Sécurité	35
10.	Réglementation	36
10.1	Législation.....	36
10.2	Application pratique.....	38
11.	Conclusion	38
12.	Annexe	40
12.1	Explication du fonctionnement d'une cellule photovoltaïque	40
12.2	Sécurité - Évaluation des Éléments potentiellement dangereux.....	43
13.	Sources.....	45

1. Introduction

1.1 Problématique

Selon le journal Le Monde: « Les transports sont responsables de 29% des émissions de gaz à effet de serre [dont fait partie le dioxyde de carbone] de la France. C'est, de loin, le secteur le plus polluant devant l'agriculture (17%) et l'industrie manufacturière (11%). Parmi les transports, la contribution des avions et des bateaux à la pollution reste très marginale. Les voitures des particuliers (54%) et les poids lourds (21%) émettent la grande majorité du CO₂. »(1).

1.2 Les véhicules

Si les véhicules des particuliers et les poids lourds n'émettaient plus de gaz à effet de serre, cela améliorerait nettement la situation actuelle, car ainsi jusqu'à 75% du dioxyde de carbone émis serait radié des statistiques. Ainsi on pourrait espérer que le taux de vapeur d'eau dans l'atmosphère ne monte plus autant. Pour cela il nous faudrait des véhicules qui ne brûlent plus de carburants fossiles. Voir même, des véhicules qui ne nécessitent plus de courant provenant du réseau électrique alimenté en grande partie par des centrales nucléaires ou thermiques. Ainsi un véhicule roulant à l'énergie verte, dite « renouvelable » n'émettrait plus de gaz à effet de serre et des particules fines lors de son utilisation. Un tel véhicule serait, à mon avis une alternative intéressante à ce qui est actuellement proposé sur le marché. Ce projet ne semble pas tellement utopique, car les premières universités se lancent déjà dans l'étude de la faisabilité de ce type d'engin.

1.3 Objectif de ce mémoire

Le but de ce mémoire est donc de faire une étude pratique de faisabilité d'un véhicule individuel fonctionnant produisant lui-même ses énergies renouvelables. Le véhicule en question doit donc pouvoir transporter un humain en n'utilisant uniquement l'énergie renouvelable. L'objectif de ce travail est de réfléchir au concept, de comprendre le principe de fonctionnement et de documenter la réalisation d'un véhicule que je vais tenter de construire. Ainsi je veux étudier la faisabilité d'un tel engin tout en gardant les coûts de réalisation dans une fourchette de prix raisonnable, d'une part pour ne pas trop investir dans cette expérience et d'autre part pour essayer de démontrer qu'il n'est pas nécessaire d'utiliser les meilleures technologies pour avoir un rendement énergétique total suffisant.

Au cours de cette année scolaire, j'ai donc, en parallèle de ce travail théorique, aussi construit un véhicule solaire à partir de composantes bon marché, présentes sur le marché, afin de pouvoir comparer les propriétés techniques calculées avec cet exemple pratique.

Ce mémoire reprend toutes les étapes qui ont été nécessaire pour aboutir à la création du véhicule. Les chapitres 2, 3 et 4 reprennent les réflexions de concept ainsi que de dimensionnement, qui ont eu lieu avant la construction du véhicule. Ensuite viennent la documentation de construction du véhicule, suivie du manuel d'utilisation dans le 5^e et le 6^e chapitre. Du 7^e au 8^e chapitre, j'ai analysé les performances du véhicule. Après, je me suis penché sur la sécurité et la législation concernant ce prototype. La conclusion de ce travail se fait au 11^e chapitre, suivie de l'annexe et des sources.

2. Réflexion de principe

Pour commencer ma réalisation d'un véhicule fonctionnant avec ses propres énergies renouvelables, il me faut un concept. À l'aide de cette réflexion de principe, je vais essayer de trouver un concept, qui me permettra d'accomplir l'objectif de ce mémoire.

2.1 Type d'énergie

Tout d'abord il nous faut réfléchir au type d'énergie renouvelable à utiliser. Certaines de ces énergies comme par exemple l'énergie hydraulique ou l'énergie géothermique, nécessitent un environnement particulier, ici un courant d'eau ou une source de chaleur. Par ce fait, ces deux énergies ne sont déjà pas intéressantes pour un véhicule terrestre. Le vent étant très aléatoire, l'énergie éolienne n'est pas non-plus une bonne solution.

Le fait que le but est de mouvoir un véhicule, l'énergie renouvelable en question doit être facile à déplacer, c'est pourquoi par rapport à l'énergie solaire, le biogaz ainsi que la biomasse ne semblent pas être très pratiques à cause de leur poids et de leur volume plus élevé. Le solaire quant-à-lui ne demande que de la lumière, c'est donc une source d'énergie gratuite et présente en grande quantité grâce au soleil. Il reste encore à décider quel type d'énergie solaire est à utiliser, les deux options sont : l'énergie de rayonnement (lumière) ou l'énergie calorifique (rayonnement thermique du soleil). L'énergie calorifique, étant par rapport à toutes les autres énergies une énergie « peu noble », me semble par ce fait peu appropriée pour cette tâche. L'énergie de rayonnement quant-à-elle me semble plus appropriée, en effet, il est assez aisé de la transformer en énergie électrique à l'aide de cellules photovoltaïques.

2.2 Motorisation et auxiliaires

L'électricité produite peut être transformée en énergie cinétique à l'aide d'un moteur électrique. Il me semble également judicieux d'installer des batteries d'accumulateurs en parallèle des panneaux photovoltaïques afin d'absorber des pics de consommation que le moteur électrique peut subir lors de conditions extrêmes (pentes, masse importante à déplacer...). Pour maîtriser l'énergie que le moteur devra fournir, je vais avoir recours à des potentiomètres ou à des onduleurs, dépendant du type de moteur auquel j'aurai recours. Il me semble également intéressant de munir le véhicule d'appareils de mesure permettant une étude plus facile des performances en situation réelle.

3. Le choix des composantes du véhicule

Pour pouvoir choisir le bon type d'appareillage électrique et comprendre le fonctionnement global de mon véhicule, il faut commencer par analyser et comparer les avantages et les inconvénients des différentes composantes utilisées pour créer la force motrice. Dans ce chapitre-ci il n'est donc pas question de rentrer dans le détail de fonctionnement de toutes les composantes. Pour se procurer une vue d'ensemble je vais me baser sur des arguments d'autres écrits et ainsi faire un résumé concis des différentes options. Pour comprendre le fonctionnement des différents appareils qui seront finalement utilisés, veuillez-vous rendre au chapitre « Le fonctionnement des différentes composantes du véhicule ».

3.1 La cellule photovoltaïque

Les panneaux photovoltaïques que nous voyons par exemple sur les toits de certaines maisons ou encore sur des installations diverses sont composés d'une certaine quantité de cellules photovoltaïques raccordées entre elles. Ces cellules photovoltaïques, se trouvent souvent seules

sur des plus petits appareils ne consommant que peu de courant, comme par exemple

des calculatrices ou des petites lampes. Dans toutes ces installations, les cellules photovoltaïques sont utilisées pour produire de l'électricité à partir de lumière. Ainsi, j'espère également pouvoir les utiliser sur mon véhicule afin de produire suffisamment d'énergie électrique pour le moteur.

Comparons les 3 principaux groupes de cellules que je vais prendre en considération : Les cellules monocristallines, polycristallines, et les cellules de haute performance. Les principales différences résident dans le rendement, le prix, pour l'utilisation que je leur ai réservée, il me semble toutefois judicieux de prendre en compte leur robustesse aux chocs et aux mouvements.

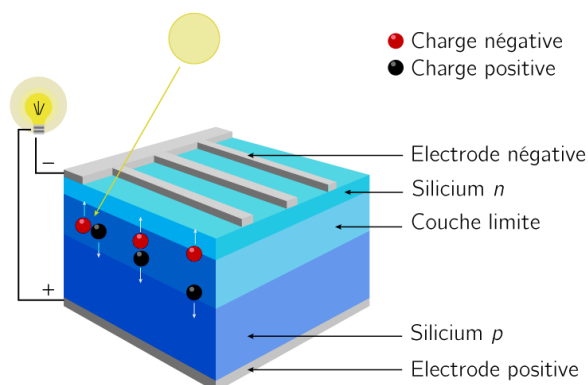


Schéma illustrant la composition d'une cellule photovoltaïque (a)

3.1.1 Rendement vs. Prix

Point de vue performance, les cellules haute-performance, comme le nom l'indique déjà, l'emportent sur les deux autres. Selon le groupe industriel français engie, ces cellules ont un rendement de 18% et plus (2). Le rendement moyen d'une cellule photovoltaïque n'est toutefois que de 15% (3). Vu que le prix dépend principalement du rendement les panneaux haute-performance sont les plus chers.

Dû à la structure du cristal des panneaux monocristallins et des panneaux haute-performance ceux-ci sont destinés à capter les rayons de lumière d'une direction particulière et ont donc un meilleur rendement sur des installations fixes. Les panneaux polycristallins qui, comme le nom l'indique, sont constitués de plusieurs cristaux dirigés dans différentes directions. « Ici, les cristaux sont comme des éventails orientés vers l'extérieur, ce qui leur permet de capter plus aisément la lumière ambiante. » (4). Même si leur rendement sur des installations fixes est moindre, j'y vois toutefois un avantage sur une installation mobile, c'est le fait qu'ils soient moins sensibles à l'orientation du véhicule par rapport au soleil. En plus : « Ils sont souvent un peu moins chers que les monocristallins » (5).

3.1.2 La solidité

Concernant la solidité d'un panneau photovoltaïque, il semblerait qu'ils supportent assez bien les chocs et vibrations, car on en trouve déjà sur des toits de caravanes et de leur voiture électrique de certains particuliers. Ainsi je suppose que la partie la plus fragile sur le panneau photovoltaïque est la vitre en verre. Le risque que les cellules photovoltaïques se brisent me semble faible, car elles sont souvent collées ou fondues entre deux plaques de verre ou de plastique transparent.

Des vidéos sur internet montrent également que même si le verre d'un panneau est fissuré et certaines cellules perforées, la production d'énergie électrique sera inférieure à la normale mais toujours présente. Par contre, si les connexions entre les cellules sont endommagées à un endroit du panneau, vu que celles-ci sont connectées en série, il y a donc une interruption du circuit électrique et la production de courant du panneau risque d'être nulle. (6)

3.2 Le moteur électrique

Pour transformer l'énergie électrique obtenue par nos cellules photovoltaïques en énergie cinétique, un moteur électrique me semble approprié, car ceux-ci peuvent avoir un rendement allant jusqu'à 95% (7).

Un moteur électrique utilise les propriétés électromagnétiques du courant qui le traverse pour mettre en mouvement, sa partie mobile qui est attaché à un axe et que l'on appelle un rotor. La partie fixe du moteur est appelée stator, et l'espace entre le rotor et le stator est appelé l'entrefer.

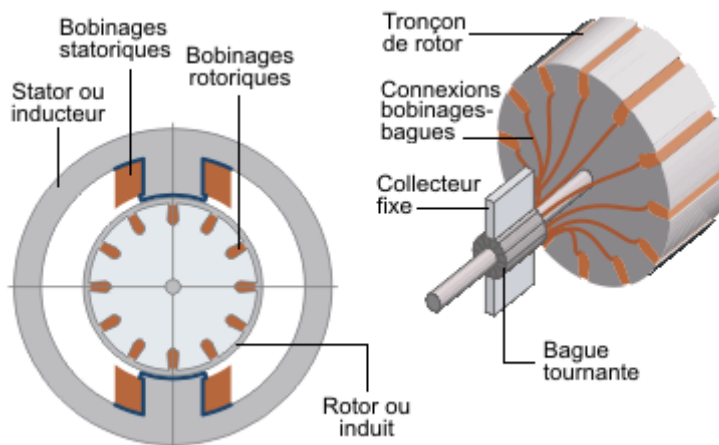


Schéma illustrant la composition d'un moteur électrique (ici courant continu) (b)

Toutefois il existe plusieurs types de moteurs qui ont différentes propriétés. Afin d'en trouver un type adéquat, je vais analyser les différentes options :

3.2.1 Le moteur à collecteur à courant continu

« Pendant longtemps, le moteur à courant continu a été la principale solution pour obtenir une vitesse variable du fait de la simplicité de sa commande » (8). Contrairement aux moteurs à courant alternatif qui nécessitent des onduleurs, la commande d'un moteur à courant continu ne nécessite qu'une résistance variable, qui influence la tension à ses bornes respectivement le courant qui le traverse. Dans notre cas, ce moteur semble être la solution parfaite dû à sa compatibilité avec les batteries d'accumulateur. En régime de freinage, il peut même fonctionner en générateur et alimenter les accumulateurs avec un courant continu. Notons quand-même que ces moteurs coûtent en moyenne un peu plus cher que les moteurs asynchrones et synchrones. De plus, les balais présent sur ce type de moteur frottent sur le collecteur et nécessitent d'être remplacés après un certain temps.

3.2.2 Le moteur asynchrone

Ce type de moteur pour courant alternatif est intéressant pour différents critères, « Son coût modéré et sa robustesse le rendent incontournable dans ce domaine. Les progrès récents dans les domaines de l'alimentation et de la commande en font maintenant une solution souvent retenue pour les machines à vitesse variable » (9).

Les moteurs asynchrones doivent leur nom à leur principale caractéristique : la vitesse de rotation du rotor est inférieure à celle du champ d'induction tournant dans le stator. Tout d'abord il faut différencier les deux types de moteur asynchrones à induction, ceux à rotor bobiné et ceux avec un rotor à cage. Il est important de faire la différence car, la citation dans le paragraphe ci-dessus prêtant à confusion, les rotors bobinés sont connectés à l'extérieur avec un système de balais qui demandent donc un entretien périodique. La citation s'applique principalement aux moteurs de ce type avec un rotor à cage (dite « d'écureuil »). Son rotor n'est pas relié à l'extérieur et n'a donc pas besoin de balais. La cage étant plus facile à construire qu'un enroulement, réduit également ses coûts de fabrication ce qui rend surtout les moteurs à cage économiquement intéressant dans l'industrie et aussi pour notre véhicule. En plus contrairement aux moteurs synchrones basiques, « la caractéristique mécanique d'un moteur asynchrone montre qu'il existe un couple à vitesse nulle » (10), c'est-à-dire qu'il est possible de faire démarrer un moteur asynchrone branché à un réseau (de courant alternatif), par contre pour l'utiliser sur notre véhicule (alimenté en courant continu), il nécessiterait de toute façon un onduleur de tension ou de courant, ce qui irait à l'encontre de l'argument du coût moins élevé.

3.2.3 Le moteur synchrone

Les moteurs synchrones sont tout aussi intéressants que les moteurs asynchrones. Il faut différencier entre deux types de moteurs, les moteurs synchrones à aimants permanents et les moteurs synchrones à rotor bobiné. Ces derniers présentent toutefois le même inconvénient que les moteurs à courant continu : les balais connectant le rotor à la source de tension requièrent une maintenance régulière. De plus, ils ont un moins bon rendement à cause des pertes par effet Joule, causées par les frottements des balais. Ainsi, pour notre application, ceux à aimants permanents ont un avantage, leur rendement. Il semblerait même que les industriels, comme la citation suivante l'indique, aient recours à ce type de moteurs pour leurs véhicules électriques : « Grâce à leur rendement élevé, les moteurs synchrones à aimants occupent également une place importante dans les prototypes de véhicules électriques » (11).

En plus, le moteur synchrone est assez connu pour sa capacité à fonctionner en générateur. Plus connu sous le nom d'alternateur, ce type de moteur semble être approprié à être utilisé dans mon véhicule, mais il présente aussi des inconvénients : tout comme les moteurs asynchrones, les moteurs synchrones nécessitent un onduleur pour fonctionner avec des batteries. Cet onduleur est également indispensable pour le démarrage du moteur synchrone. En fin de compte, la nécessité d'un onduleur rend le moteur synchrone également peu intéressant pour mon véhicule.

3.2.4 Conclusion

Pour la motorisation de mon véhicule solaire, je pense que les trois types de moteurs cités ci-dessus sont adaptés. Toutefois pour réduire les coûts et le poids du véhicule, je vais opter pour un moteur à collecteur à courant continu, car d'une part son prix plus élevé est largement compensé par le fait qu'il ne nécessite pas d'onduleur supplémentaire. D'autre part, il satisfait les critères d'utilisation, c'est-à-dire la possibilité de démarrer de manière autonome, de tourner à des vitesses variables et aussi d'effectuer un freinage régénératif afin de réutiliser un maximum d'énergie. Il me semble donc être un bon compromis entre prix et rendement pour une étude de faisabilité, car son but n'est pas de présenter des performances similaires aux véhicules actuellement proposés sur le marché.

3.3 Accumulateur

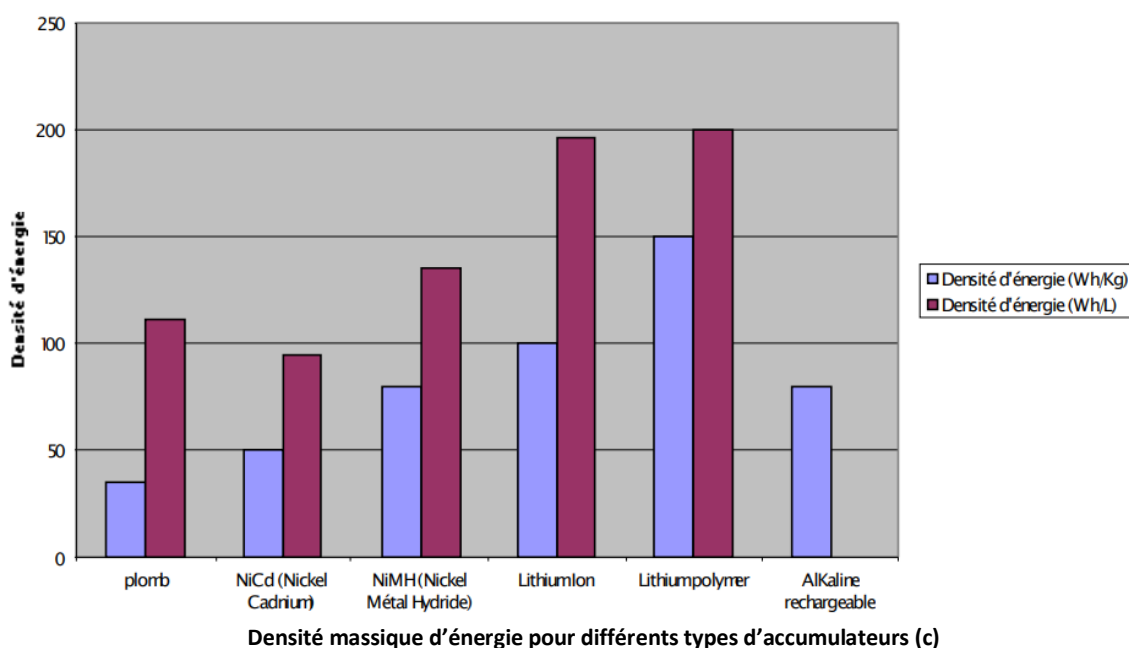
Afin d'emmagasiner les pics de consommation du moteur ainsi que les pics de production des cellules photovoltaïques, l'insertion de batteries d'accumulateurs dans le circuit électrique peut s'avérer utile. Ici aussi, il existe une multitude de types de tailles et de capacités différentes qu'il faudra comparer.

3.3.1 La densité massique

La quantité d'énergie que devront fournir les batteries d'accumulateurs ne dépend que de la puissance du moteur, du temps d'utilisation et bien sûr de l'ensoleillement qui influencera leur recharge. Pour optimiser le poids du véhicule, il serait éventuellement favorable d'utiliser des batteries avec un bon rapport d'énergie par poids. Voici un tableau comparatif de plusieurs batteries de composition différente.

Le rapport d'énergie par poids, aussi appelé densité massique d'énergie dépend principalement des matériaux utilisés pour la réaction d'oxydoréduction dans l'accumulateur. Le lithium ayant

un potentiel d'oxydation plus élevé que le nickel ou encore le plomb, pourrait ainsi fournir la même quantité d'énergie tout en allégeant le poids des batteries embarquées.



3.3.2 La durée de vie

Un autre critère, qui n'est pas systématiquement marqué sur les différents modèles est le nombre de cycles, c'est-à-dire le nombre de fois qu'un accumulateur peut être déchargé et rechargé. Le nombre de cycles est proportionnel à la longévité de l'accumulateur, une fois dépassé celui-ci est dit « mort » et doit être remplacé.

Type	Nombre de cycles avant que la capacité passe de 100% à 80%
Plomb	200 à 300 cycles
Nickel-Hydrure métallique	300 – 500 cycles
Lithium-Polymère	300 – 500 cycles
Lithium-Ion	500 – 1000 cycles
Nickel Cadmium	1500 cycles

Nombre de cycles pour différents types d'accumulateurs (c)

La différence aussi importante entre le nombre de cycles entre ces différents types d'accumulateurs s'explique par l'électrolyte utilisé. Celle-ci se fige à un rythme plus ou moins vite jusqu'à ne plus laisser passer les éléments chargés et bloquer l'électricité dans l'accumulateur. Notons que ce nombre de cycles n'est qu'à titre indicatif, car même si l'accumulateur n'est pas utilisé sur une longue période, l'électrolyte peut quand-même se figer.

3.3.3 L'effet mémoire

Un point incontournable de l'utilisation réservée aux accumulateurs dans ce travail, est l'effet mémoire. Pour des cycles de recharges et de décharges partielles et répétés, des accumulateurs avec un effet mémoire de moyen à bas sont requis. Si cet effet est élevé, la tension aux bornes de l'accumulateur tend à baisser et à en altérer la puissance. L'intensité de cet effet dépend exclusivement du type d'accumulateur utilisé. Vu que la tension aux bornes du moteur ne doit pas trop varier, cet effet doit rester le plus bas possible :

Type	Effet mémoire
Nickel Cadmium	Élevé
Plomb	Moyen
Lithium-Polymère	Bas
Nickel-Hydrure métallique	Bas
Lithium-Ion	Bas

Rapport entre le prix et l'énergie pour différents types d'accumulateurs (c)

Comme pour les moteurs et les cellules photovoltaïques, le critère principal reste néanmoins le prix, des batteries. Selon un rapport de l'université de Technologie de Compiègne, résumé dans le tableau suivant, on note que les accumulateurs qui ont de bons résultats dans les catégories précédentes, sont d'office plus cher :

Type	Estimation du Prix/Énergie
Lithium-Ion	8 €/kWh
Nickel Cadmium	4,16 €/kWh
Lithium-Polymère	3,2 €/kWh
Nickel-Hydrure métallique	2 €/kWh
Plomb	0,895 €/kWh

Rapport entre le prix et l'énergie pour différents types d'accumulateurs (c)

3.3.4 Conclusion

L'utilisation des accumulateurs sur le véhicule se résume par des charges et des décharges partielles. L'effet mémoire des différents types joue donc un rôle clé dans ce choix. Les accumulateurs de Nickel-Cadmium sont donc à écarter. Les meilleurs choix selon ce critère seraient donc le Nickel-Hydrure métallique, le Lithium-Ion ou le Lithium-Polymère. Dans la catégorie de la densité massique de l'énergie c'est le Lithium-Polymère qui l'emporte avec un léger avantage sur le Nickel-Hydrure métallique. Le prix élevé du Lithium-Ion le rend un peu moins intéressant que le Nickel-Hydrure métallique ou que le Lithium-Polymère, toutefois les batteries de plomb restent les moins chères.

Pour mon véhicule solaire, j'opterai donc pour des batteries de plomb, même si leur poids n'est pas optimal. De plus, ces batteries se trouvent dans de nombreux commerces spécialisés dans le secteur automobile.

4. Dimensionnement

Après avoir recherché sur les différentes composantes de mon véhicule, il est nécessaire de définir les caractéristiques requises des composantes qui seront montées sur ce prototype. Cette réflexion préliminaire permet également de réfléchir à certains détails auxquels il faudra veiller durant le montage du véhicule. Il est toutefois possible que certains problèmes n'apparaissent que durant la construction, ceux-ci seront alors abordés dans le rapport de construction.

4.1 Le châssis

Tout véhicule est composé d'une structure solide pour pouvoir y monter les composants nécessaires. Dans mon cas, différentes options se présentent : une possibilité serait de le réaliser sur mesure avec des profilés en métal et des planches en bois, l'alternative est de trouver une structure d'un véhicule d'un petit véhicule, tel un go kart ou un kart, et d'éliminer les accessoires qui ne m'intéressent pas. L'avantage de réaliser son châssis sur mesure est, que l'on peut ajuster les dimensions en fonction de l'appareillage électrique. L'inconvénient de cette solution et aussi l'avantage de la deuxième option est le facteur temps. En s'achetant un châssis d'un petit véhicule, on pourra s'épargner quelques soucis et également obtenir un système de suspension et de direction plus sophistiqué. Comme ça, on pourra concentrer le travail sur la partie électromécanique et commencer les premiers essais plus tôt.

Ayant acquis un châssis d'un vieux kart, c'est finalement sur cette base, que le véhicule solaire sera construit. Le véhicule mesure 183 centimètres de long et 123 centimètres de large. Il est muni de quatre roues, deux à rotation indépendantes et reliées entre-elles par le volant, à l'avant du véhicule et deux roues, à l'arrière du véhicule, reliées à un axe commun sur lequel se trouve également une installation de frein à disque et une roue dentée. Le véhicule comporte également un siège en polymère, un volant et une pédale de frein.

4.2 Les panneaux photovoltaïques

La puissance fournie par une installation photovoltaïque, est déterminée par sa taille, ainsi la taille de mon installation définit la quantité d'énergie que mon véhicule recevra. Celle-ci ne peut en effet que fournir une certaine quantité d'énergie par jour, variable en fonction des conditions météorologiques. Vu que les cellules photovoltaïques seront installées sur le toit du véhicule, celles-ci pourront donc au maximum en remplir sa surface au sol.

La taille du toit est de 106 centimètres de large par 120 centimètres de long, ainsi sa surface (1,272 m²) est légèrement inférieure à celle du châssis. Une fois centré sur le véhicule, le toit sera protégé d'éventuels accrochages que peut subir le véhicule, par exemple avec des murs.

Il a donc fallu chercher une installation photovoltaïque de cette taille et en fin de compte, j'ai opté pour deux panneaux d'une superficie de 108 centimètres de long et 105 centimètres de large, composés chacun de 32 cellules qui fournissent une puissance maximale de 200 Wc (puissance maximale exprimée en Watt crête) avec une tension de 12V chacun. Les panneaux peuvent ainsi soit être connectés en parallèle avec une tension de 12V ou en série avec une tension de 24V

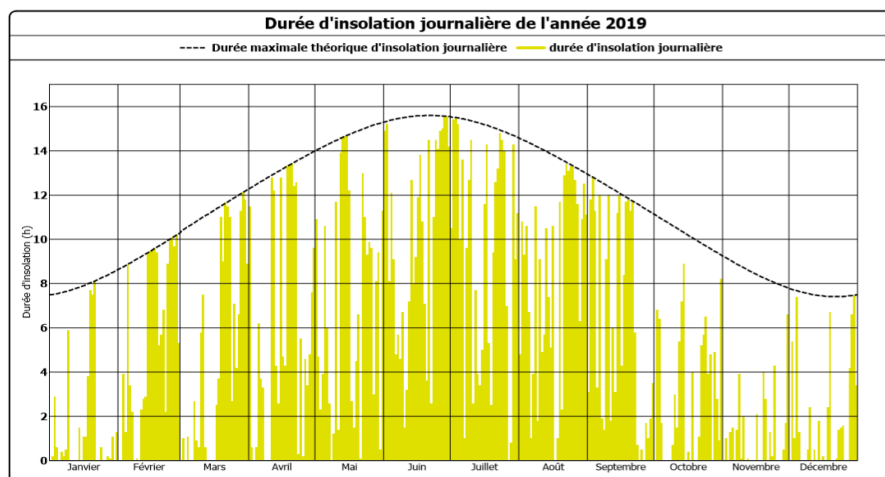
Calculons l'intensité de courant maximale avec la formule : $I = \frac{P}{U}$

Pour une tension de 12 Volt : $\frac{200 \text{ W}}{12 \text{ V}} = 16.7 \text{ A}$

Pour une tension de 24 Volt : $\frac{200 \text{ W}}{24 \text{ V}} = 8.3 \text{ A}$

On remarque que l'Ampérage à 24V est moins élevé. Afin d'éviter des échauffements de câble à cause d'un courant trop élevé (à 12V), le circuit électrique devrait être muni de câbles de plus grosse section. Tandis qu'en branchant les panneaux photovoltaïques en série les câbles peuvent être de section plus fine et seront donc plus facile à installer. J'ai donc une préférence pour une tension de 24 V, dans la mesure où un moteur de 24 V est sélectionné.

Les panneaux fournissant au maximum 200 Wc, fourniront probablement une puissance électrique aux alentours de 100 W (compte-tenu des conditions météorologiques luxembourgeoises). Avec une moyenne de 11 à 12 heures de Soleil par jour, on obtient donc une énergie électrique théoriquement disponible de : $100\text{W} * 11\text{h} = 1100 \text{ Wh}$



Durée d'insolation journalière en 2019 au Luxembourg (selon le site gouvernemental Meteolux)

4.3 Le moteur électrique

Connaissant la tension du circuit électrique ainsi que l'énergie moyenne disponible par jour, il est désormais possible de déterminer la puissance électrique fourni au moteur.

Compte-tenu des moyens financiers mis à disposition de ce prototype, son utilisation se limitera à quelques déplacements sur une journée (disons 2h réparties sur la journée).

$$\begin{aligned} Puissance &= \frac{Energie}{Temps d'utilisation} \\ &= \frac{1100 Wh}{2h} \\ &= 550 W \end{aligned}$$

Le choix du moteur se portera donc sur un moteur à courant continu d'une puissance d'environ 500 à 550 Watt fonctionnant à une tension de 24 Volt. Un moteur de capacité supérieure ne consommerait, à priori, pas plus mais il serait plus lourd et plus cher.

J'ai finalement trouvé un moteur de 500 W, répondant aux critères techniques. Celui-ci est vendu avec un module de commande qui comporte notamment une pédale d'accélérateur et une clé de contact.

4.4 Les batteries d'accumulateur

Concernant les batteries d'accumulateur qui stockeront la production journalière d'énergie, il reste à définir la charge électrique Q (en Ampère-heure), qui est la quantité maximale d'électricité à fournir sur le temps d'utilisation :

$$\begin{aligned} Q &= \frac{Energie}{Tension} \\ &= \frac{1100 Wh}{24 V} \\ &\cong 46 Ah \end{aligned}$$

Il faut donc trouver un ensemble de batteries d'accumulateurs d'environ 46 Ampère-heure avec une tension totale de 24 Volt pour alimenter mon véhicule solaire. Suite à cela, j'ai acheté deux batteries pour camions de 12 Volt et 47 Ampère-heure chacune qui seront reliées en série afin d'obtenir au total, une tension de 24 Volt.

5. Rapport de construction

5.1 Remise en état du kart

À l'achat, la carcasse du kart était déjà dépourvue de son moteur à combustion, qui est de toute manière, inutile pour mon projet. Ayant auparavant appartenu à un enfant, il a fallu échanger le siège d'enfant contre un siège d'adulte, reculer les pédales de l'accélérateur et de frein et tirer de nouveaux câbles de frein plus longs, entre la pédale et les plaquettes de frein. Certains éléments ont dû être retirés, comme par exemple le réservoir de carburant et les poids pour enfants.

5.2 Montage du moteur

Le moteur a été monté sur un support solide en bois qui peut coulisser sur le châssis. Ce système d'attache permet de reprendre toute force latérale, verticale et de torsion que le moteur peut subir, sur le châssis. Pour permettre une maintenance à la chaîne reliant le moteur à l'axe arrière, un boulon réglable sert d'appui au support du moteur.

Pour commander le moteur, le véhicule a été muni d'une pédale d'accélération et de clés de contact.

5.3 Montage des batteries d'accumulateur

Les deux batteries d'accumulateur ont été vissées sur un support similaire à celui sur lequel repose le moteur. Les batteries se sont situées devant le moteur, mais les deux supports ne se touchent pas afin de pouvoir régler la tension de la chaîne du moteur.

Pour garantir la sécurité du conducteur, les batteries sont recouvertes d'un capot en bois qui peut être enlevé à la main, p.ex. pour brancher les batteries. Lorsqu'il est monté, il empêche le conducteur d'entrer en contact avec les bornes des batteries ou encore avec l'ensemble moteur-chaîne. Ce capot sert également de support pour les instruments de mesure, ceux-ci peuvent alors être consultés à tout instant.



- les batteries (bleu)
- le moteur (rouge)
- le capot amovible
- l'instrument de mesure du moteur (jaune)
- le régulateur de charge des cellules photovoltaïques (vert)

5.4 Montage de l'installation photovoltaïque

Les 64 cellules photovoltaïques sont réparties sur deux plaques flexibles en polymère et recouvertes de deux vitres également en polymère. Les panneaux présentent ainsi une grande flexibilité. Les deux panneaux ont été vissés sur une plaque en mousse de PVC d'une épaisseur de 10mm. Sous cette plaque ont été installés deux profilés carrés en aluminium pour rigidifier le tout.

Quatre profilés en aluminium sont fixés verticalement au châssis. Le dessous du toit est également muni de quatre profilés en aluminium d'une taille légèrement inférieure à ceux montés sur le véhicule, qui s'emboîtent ainsi dans ceux du véhicule. Ainsi le toit repose sur le véhicule et reste amovible. Les câbles reliant l'installation photovoltaïque au régulateur de charge, situé sur le véhicule, sont munis de prises qui peuvent être enlevées lors de travaux de maintenance.

Afin de pallier aux forces latérales, frontales ou de torsion que peut subir le toit, les profilés attachés au véhicule sont solidifiés par des tirants.



Vue aérienne sur l'installation photovoltaïque

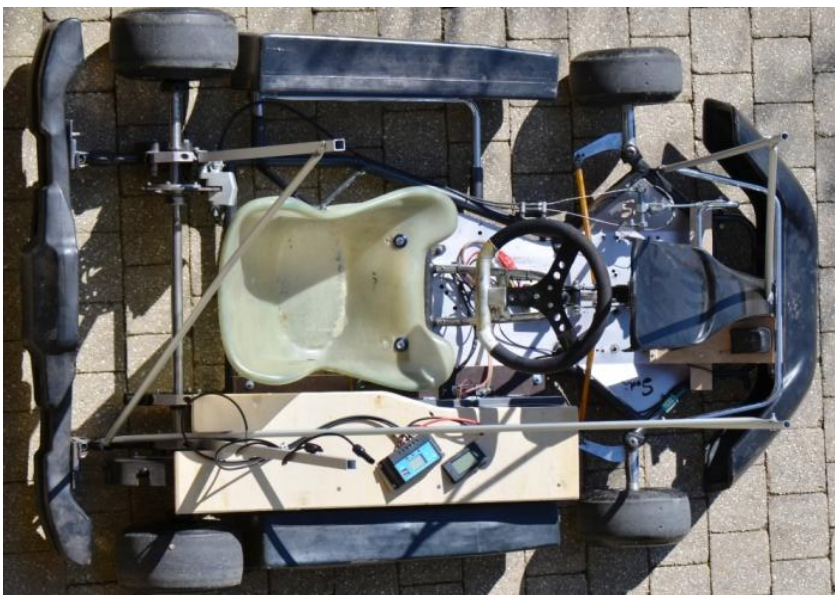
5.5 Images du véhicule durant les travaux

Voici des images témoignant des travaux effectués sur le véhicule solaire:

Cette photo montre le châssis du kart acheté. L'intérieur a été nettoyé ainsi que le siège déjà remplacé.



Sur cette image, les composants électriques ont déjà été montés à l'exception du toit avec les panneaux solaire, qui est amovible.



Ici, on voit le véhicule solaire achevé, pendant un des premiers essais. La structure légère du toit permet une grande visibilité dans toutes les directions.



6. Manuel d'utilisation

Ce manuel résulte d'une analyse de risque spécifique et ne s'applique qu'au véhicule construit pour ce mémoire, il permet à un utilisateur d'apprendre à conduire et à entretenir correctement le véhicule.

La maintenance est réservée aux personnes responsables qui connaissent les dangers électriques ainsi que le fonctionnement et le câblage véhicule. Tout individu non-compétent, ne doit sous aucun prétexte toucher au circuit électrique.

6.1 Entreposage du véhicule

Par une personne compétente :

Afin d'éviter des dommages au circuit électrique, le véhicule doit être entreposé dans un endroit protégé du gel, de l'humidité et de l'eau.

Lors de l'entreposage du véhicule, les connexions entre le circuit électrique et les batteries doivent être défaites. Pour ce faire, une personne compétente doit dévisser (avec une clé plate de 10mm ou un tournevis plat) les vis se trouvant sur les cosses aux extrémités des batteries (bleu). Ensuite, il doit retirer les câbles du circuit moteur (rouge), du circuit photovoltaïque (vert) et circuit de l'appareil de mesure (jaune) ainsi que les câbles circuit moteur (rouge) et du circuit photovoltaïque (vert) du côté positif.

Pour enlever la tension restante des condensateurs du circuit moteur, il faut allumer le véhicule en tournant les clés de contact dans la serrure jusqu'à ce que l'affichage de la tension au dessus de celle-ci s'éteigne. On peut alors retirer les clés.



Détail sur les bornes des batteries : cosses des bornes des accumulateurs (bleu)
câbles du circuit moteur (rouge)
câbles du circuit photovoltaïque (vert)
câble de l'appareil de mesure (jaune)

6.2 Prise en charge du véhicule

6.2.1 Vérifications préalables

Par l'utilisateur et en présence d'une personne compétente :

Avant de mettre sous tension, les circuits électriques du véhicule, il faut vérifier :

- L'état des câbles
- l'état de la batterie (fuites éventuelles)
- l'état de cellules photovoltaïques (cellules brisées)
- l'état de la chaîne (tension/lubrification)
- l'état des pneus (pression)
- l'état de l'installation du frein (câbles sectionnés, plaquettes de frein, disque)

Si l'utilisateur remarque un quelconque problème, il ne peut pas mettre le véhicule en service et doit en aviser la personne qui s'occupe de la maintenance du véhicule. Le véhicule peut être remis en service, une fois le problème résolu.

6.2.2 Mise en service

Par une personne compétente :

Lors de la mise en service, celle-ci doit connecter le circuit électrique aux batteries. Pour ce faire, il faut insérer les deux câbles du circuit moteur et du circuit photovoltaïque, dans la cosse du pôle négatif (signe -) de la batterie et serrer les deux vis se trouvant sur la cosse (avec une clé plate de 10mm ou un tournevis plat). Ensuite, elle doit insérer les câbles du circuit photovoltaïque, du circuit de l'appareil de mesure et du circuit moteur dans la cosse du pôle positif des batteries et serrer les deux vis se trouvant sur la cosse.

(À noter : les capacités présentes dans le circuit du moteur peuvent provoquer un petit arc électrique entre la pointe du câble et la cosse, lors du premier contact entre le fil et la borne)

Une fois que les batteries sont raccordées, les clés peuvent être remises à l'utilisateur.

6.3 Conduite du véhicule

La conduite du véhicule est interdite aux individus trop grands ou trop larges pour entrer dans le siège ou trop petits pour pouvoir enfoncer la pédale de frein à fond. Avant chaque mise en mouvement, le conducteur vérifie qu'aucun de ses vêtements, pouvant se prendre dans les parties rotatives du véhicule, ne dépasse de son siège.

6.3.1 Règles de conduite

La conduite de ce véhicule solaire doit être faite avec prudence. À tout moment le conducteur doit être en mesure de freiner afin d'éviter des collisions avec un obstacle. Il doit également veiller à la trajectoire de ses roues pour éviter de rouler sur un obstacle fragile (p.ex. pied). Il est impératif de garder au moins une main sur le volant, garder ses deux mains dessus est recommandé. Durant tout le déplacement, il est interdit de toucher la chaussée, ce qui se trouve en dessous du capot de protection ainsi que les pièces en mouvement du véhicule (moteur, roues, axe arrière, disque de frein etc.).

Tout passage sur une surface mouillée doit être évité, car il peut créer des dommages graves au circuit électrique du véhicule.

6.3.2 Démarrage

Pour démarrer, le conducteur insère horizontalement la clé de contact dans la serrure et la tourne d'une huitième de tour (dans le sens horloger). L'écran au-dessus des clés s'allume et affiche la tension des batteries.

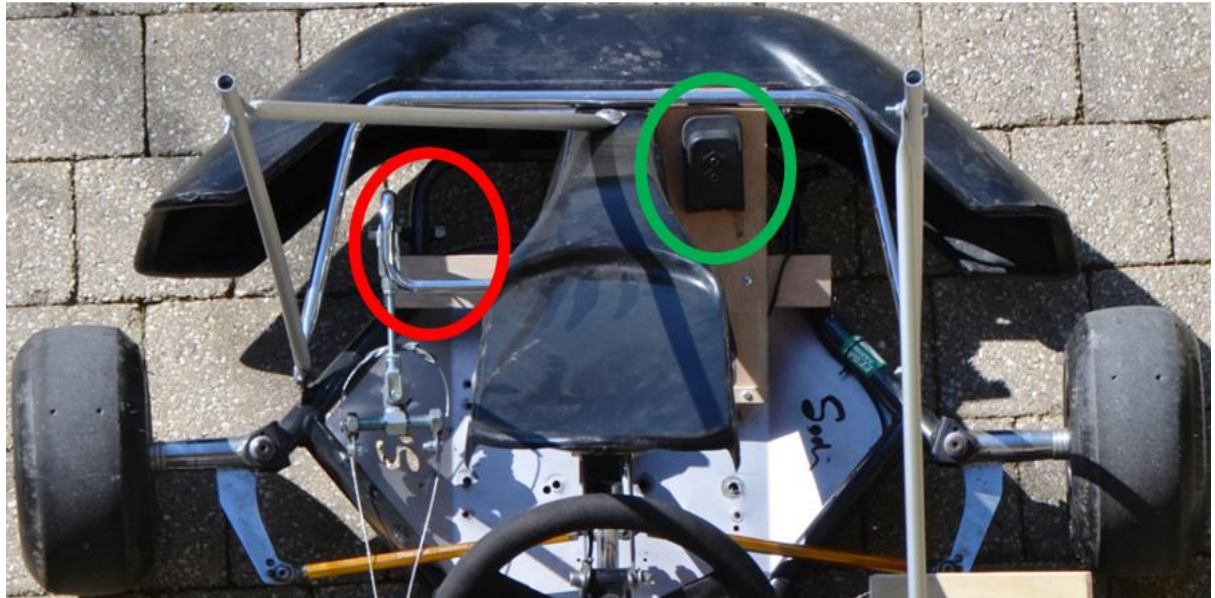
Pour éteindre le véhicule, il doit d'abord ramener les clés en position horizontale et peut ensuite les retirer.



Position de la clé: éteint (gauche) et allumé (droite)

6.3.3 Mise en mouvement

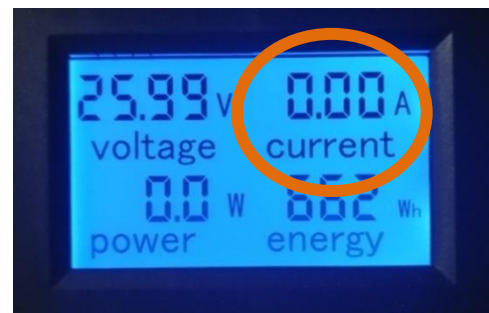
Pour accélérer le véhicule, le conducteur enfonce de son pied droit, l'accélérateur (vert) et relâche de son pied gauche, la pédale de frein (rouge). Il vérifie que le moteur consomme du courant (orange) sur l'appareil de mesure.



Détail sur les pédales de frein (rouge) et d'accélérateur (vert)

Si la consommation est non-nulle et que le véhicule se déplace, la mise en mouvement a réussie.

Si le véhicule ne se déplace pas, il se peut que la pente soit trop forte pour le moteur et que celui-ci n'arrive pas à déplacer le véhicule, alors le conducteur doit retirer son pied de l'accélérateur, immobiliser son véhicule avec la pédale de frein, sortir et déplacer le véhicule à un endroit de pente moins raide.



Données affichées par l'instrument de mesure
(cercle orange : courant consommé)

Si la consommation du véhicule est restée nul, l'utilisateur doit immédiatement retirer son pied de l'accélérateur, immobiliser son véhicule et le ramener à une personne compétente qui vérifie le bon état du circuit électrique.

6.3.4 Conduite

La vitesse du véhicule peut être modulée en utilisant CONSÉCUTIVEMENT la pédale de frein et l'accélérateur. La direction du véhicule peut être changée en tournant le volant dans le sens voulu.

Pour freiner, il suffit d'enfoncer la pédale de frein de manière plus ou moins forte. Lorsqu'elle est enfoncée à fond, il se peut que les roues arrières du véhicule, perdent l'adhérence à la route et glissent sur la chaussée (dérapage), alors il faut appuyer légèrement moins fort sur la pédale de frein. Ce freinage rapide, ne doit être qu'utilisé pour éviter un danger, car il endommage la surface des roues.

Durant la conduite, le conducteur doit veiller à :

- sa consommation
- garder une vitesse appropriée
- sa trajectoire

Durant la conduite, le conducteur remarquera une baisse progressive de la tension ainsi que de la force motrice. Ceci est dû à la baisse de tension des batteries. Une pause s'impose lorsqu'il juge la force motrice insuffisante. Pour ce faire, il procède à l'immobilisation du véhicule. Les batteries se rechargent avec l'installation photovoltaïque. Il peut repartir, lorsqu'il juge suffisante, la tension des batteries.

6.3.5 Immobilisation

Si le véhicule doit être quitté, il faut procéder à l'immobilisation. Pour cela, il faut trouver un endroit où il est possible de garer le véhicule sans que celui-ci risque de se mettre en mouvement à cause de la déclivité du terrain ou à cause des conditions météorologiques. Si le véhicule est immobilisé dans un lieu public, il est possible de passer un cadenas dans le disque de freinage.

Avant de quitter le véhicule, il faut retirer les clés de contact et les emporter avec soi.

6.4 Mise hors service

Par l'utilisateur et en présence d'une personne compétente :

Avant de mettre hors tension, les circuits électriques du véhicule, il faut vérifier :

- L'état des câbles
- l'état de la batterie (fuites éventuelles)
- l'état de cellules (cellules brisées)
- l'état de la chaîne (tension/lubrification)
- l'état des pneus (pneus plat)
- l'état de l'installation du frein (câbles sectionnés, plaquettes de frein, disque)

Par une personne compétente :

Si le véhicule doit être entreposé pour une longue période, il faut procéder à la déconnexion des batteries comme expliqué dans la partie « Entreposage du véhicule » du manuel.

6.5 Maintenance du véhicule

La maintenance du véhicule doit être faite par une personne compétente, c'est-à-dire une personne qui connaît le fonctionnement du véhicule ainsi que les dangers que peut représenter l'électricité (le schéma de raccordement électrique est joint en annexe du mémoire)

Lors de la maintenance, il faut vérifier :

- tous les raccords de câbles
- l'état de la chaîne
- l'état de l'installation de frein
- le bon état des batteries
- le fonctionnement des instruments de mesure
- le fonctionnement de l'installation de frein
- le fonctionnement de l'accélérateur

Graisser :

- la chaîne

Régler :

- la tension de la chaîne
- la tension des câbles de frein
- la position symétrique des mâchoires de freinage par rapport au disque de frein

7. Analyse des différents paramètres

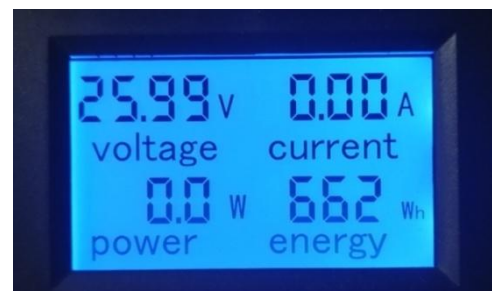
7.1 Charge des batteries

La charge des batteries par les cellules solaires est dépendante de l'intensité du rayonnement solaire. En fonction de la température extérieure, de la date, de l'humidité de l'air et des nuages, les cellules photovoltaïques convertissent différentes quantités d'énergie de rayonnement en énergie électrique. De ce fait, il est impossible d'établir un graphique prédisant la charge des batteries.

Dans ce but, j'ai voulu mesurer l'intensité du courant induit par l'installation photovoltaïque. Les appareils de mesure, n'ont toutefois pas pu être livrés à temps, c'est pourquoi je n'ai pas pu analyser en détail la charge des batteries.

7.2 Consommation du moteur

Ayant installé un instrument de mesure affichant la Tension entre les batteries ainsi que la puissance et l'intensité de courant consommée par le moteur, il est possible d'observer la consommation de courant du moteur. Cet instrument, permet d'analyser la consommation de courant du moteur électrique en fonction de la pente, de la vitesse et de la tension aux bornes de la batterie.



Données affichées par l'instrument de mesure

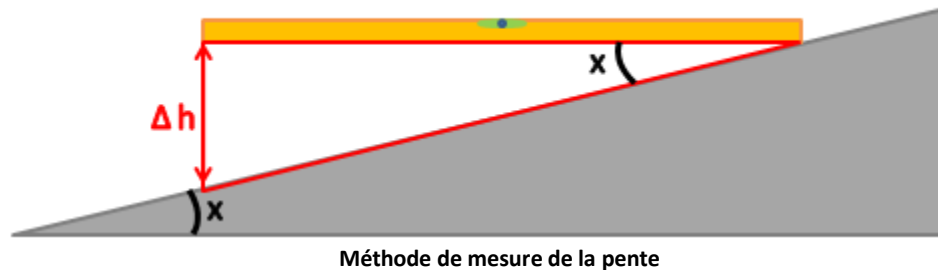
Les essais ont été menés en trois séries, avec à chaque fois, une tension différente aux bornes des batteries.

- Série 1 : 23,8 V
- Série 2 : 24,3 V
- Série 3 : 25,0 V

Les essais consistaient à faire passer le véhicule à une vitesse constante de 5km/h, 10km/h et 15km/h, par dix points de repère sur une piste. À chaque point de repère, de pente connue, la puissance du moteur a été notée.

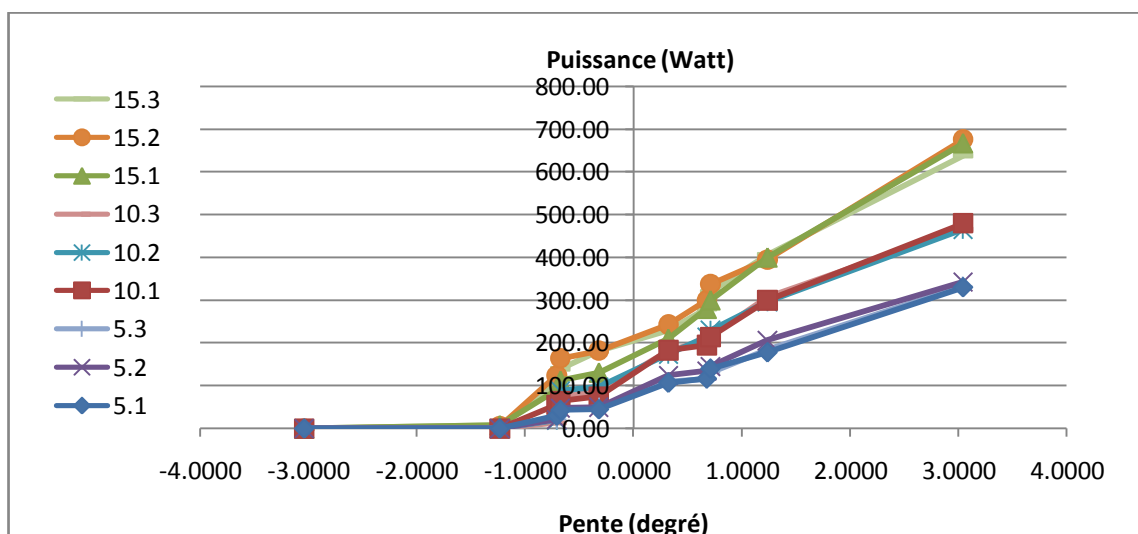
La piste de test utilisée était revêtue d'un tarmac de bonne qualité, donc assez lisse.

Pour mesurer la pente exacte, j'ai eu recours à un niveau de 250 centimètres. Appuyé d'un côté sur la piste, j'ai pu mesurer à l'autre bout, par rapport à l'horizontale, la différence qu'il y avait.



Le graphique ci-après retranscrit les puissances mesurées en fonction de la déclivité de la piste. Les différentes courbes correspondent aux différentes vitesses et aux différentes séries de mesure :

- 5.1 : vitesse de 5km/h série 1 (23,8V)
- 5.2 : vitesse de 5km/h série 2 (24,3V)
- 5.3 : vitesse de 5km/h série 3 (25,0V)
- 10.1 : vitesse de 10km/h série 1 (23,8V)
- 10.2 : vitesse de 10km/h série 2 (24,3V)
- 10.3 : vitesse de 10km/h série 3 (25,0V)
- 15.1 : vitesse de 15km/h série 1 (23,8V)
- 15.2 : vitesse de 15km/h série 2 (24,3V)
- 15.3 : vitesse de 15km/h série 3 (25,0V)



On remarque que les puissances mesurées dans les différentes séries, pour un point précis et une vitesse donnée, sont approximativement égales, donc indépendantes de la tension aux bornes de la batterie. Ceci est logique, car la Puissance P , nécessaire pour fournir un même travail en un temps égal (vitesse égale), dépend de deux variables, la tension U et l'intensité du courant I . Selon :

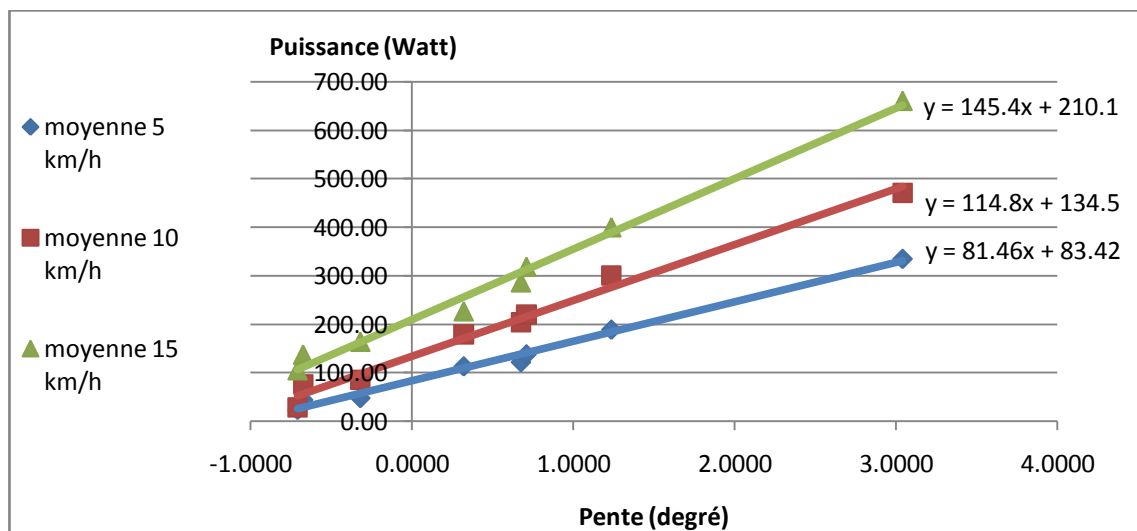
$$P = U \times I$$

Si la tension disponible est moins élevée, et que la puissance reste constante, le courant débité augmente.

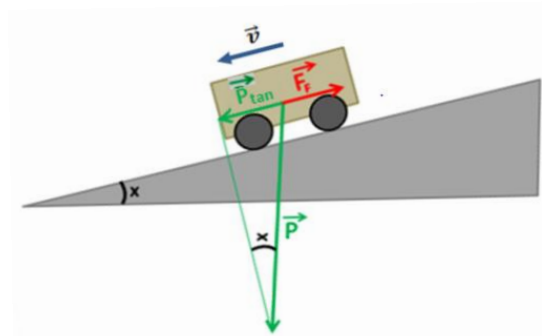
Les courbes obtenues semblent être des droites, sauf pour les pentes quasi-nulles. Cependant, il faut prendre en compte l'imprécision de mesure, plus élevée aux pentes faibles. Cette imprécision est due à l'inertie du véhicule qui demande plus de sensibilité lors de la manipulation de l'accélérateur.

Les puissances mesurées pour une pente inférieure à $-1,2^\circ$ (descendante) sont nulles, car le véhicule était capable de maintenir les vitesses constantes sans force motrice. Le travail (négatif) créé par la force de freinage à ces points n'a pas été comptabilisé. Le travail exercé par le véhicule était donc négatif par rapport au mouvement.

Les puissances non-nulles des trois séries ont toutefois permis de trouver une puissance moyenne pour chaque vitesse, à chaque point de repère de la pente. Le graphique suivant, illustre les courbes de tendance linéaires des différentes vitesses.



Les différents points représentant les puissances moyennes à différentes vitesses, se situent environ sur la trajectoire de la droite. Ainsi, on peut donc affirmer que la puissance du moteur augmente linéairement avec la pente de la route.



Calcul des forces de frottement

Il serait également intéressant d'analyser l'intersection des différentes droites avec l'axe des abscisses, c'est-à-dire lorsque la puissance totale du véhicule est nulle (puissance moteur nulle et puissance de freinage nulle). En ces points, la norme de la force motrice exercée est égale à celle des forces de frottement et ainsi, la force résultante est nulle. Ainsi, toutes les forces qui s'exercent sur le véhicule se compensent mutuellement

Pour les valeurs de x (pente) des droites, pour lesquelles l'ordonnée est nulle (puissance), la force de frottement est égale à l'opposé de la composante tangentielle du poids à la route:

$$\vec{F}_{Frot} = -\vec{P}_{tan}$$

Pour les normes de ces forces, on obtient la relation suivante :

$$F_{Frot} = P_{tan} = P * \sin(x)$$

On connaît la masse du véhicule, qui est de 92,32kg :

$$\begin{aligned} P &= m \times g \\ &= 92,32 \text{ kg} * 9,81 \text{ N/kg} \\ &= 905,66 \text{ N} \end{aligned}$$

Pour trouver les points où on a un équilibre des forces, il a fallu trouver x , c'est-à-dire la valeur de la pente:

- Moyenne 5 km/h :

$$\begin{aligned} f(x) &= 0 \\ \Leftrightarrow 81,46 * x + 83,42 &= 0 \\ \Leftrightarrow x &\cong -1,024^\circ \end{aligned}$$

- Moyenne 10 km/h :

$$f(x) = 0$$

$$\Leftrightarrow 114,8 * x + 134,5 = 0$$

$$\Leftrightarrow x \cong -1,172^\circ$$

- Moyenne 15 km/h :

$$f(x) = 0$$

$$\Leftrightarrow 145,4 * x + 210,1 = 0$$

$$\Leftrightarrow x \cong -1,444^\circ$$

En comparant graphiquement les résultats obtenus, En utilisant les valeurs absolues des résultats précédents, on peut déterminer les intensités des forces de frottement qui s'exercent sur le véhicule au moment où les forces se compensent lorsque le véhicule se déplace à différentes vitesses.

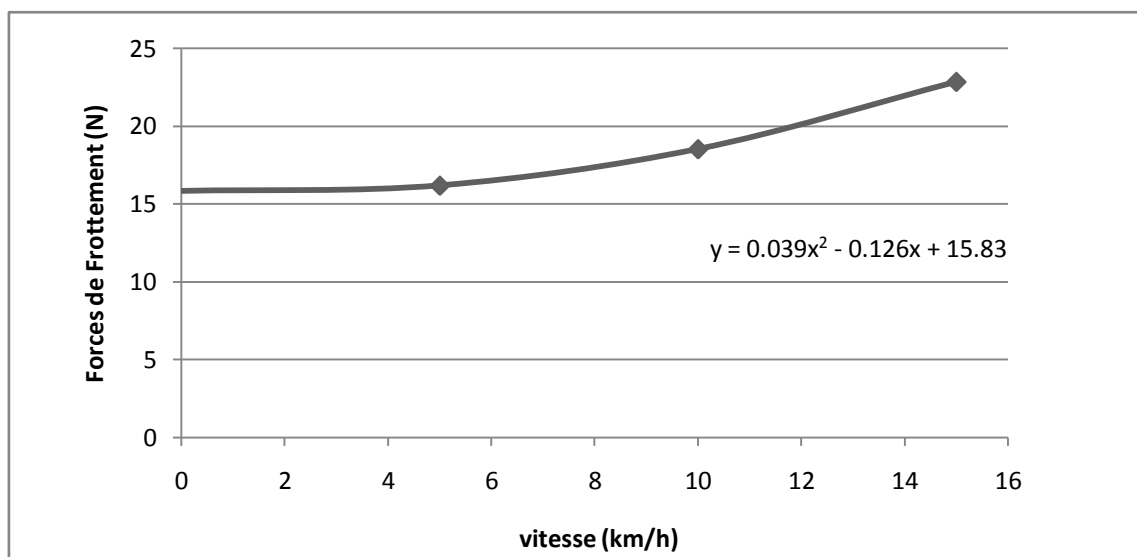
$$F_{Frot} = P_{tan} = P * \sin(x)$$

Donc on obtient :

$$\text{A } 5 \text{ km/h : } F_{Frot} = 905,66 \text{ N} \cdot \sin(1,024^\circ) = 16,18 \text{ N}$$

$$\text{A } 10 \text{ km/h : } F_{Frot} = 905,66 \text{ N} \cdot \sin(1,172^\circ) = 18,52 \text{ N}$$

$$\text{A } 15 \text{ km/h : } F_{Frot} = 905,66 \text{ N} \cdot \sin(1,444^\circ) = 22,82 \text{ N}$$



Les forces de frottement représentées sur le graphique, sont composées des frottements internes, des frottements entre la roue et la route ainsi que des frottements avec l'air. Néanmoins, ce graphique ne permet pas de quantifier la contribution de chacune de ces forces.

On sait que les forces de frottements augmentent avec le carré de la vitesse. Il est donc logique que la courbe du graphique soit modélisée par une fonction du second degré.

Il est surprenant de constater que cette courbe coupe l'axe des ordonnées à une valeur relativement élevée, ce qui serait dû à des forces de frottements élevées à vitesse quasi nulle. Ces forces de frottement pourraient correspondre au frottement statique. Pour vérifier cette hypothèse avec la réalité, j'ai mesuré avec un Newton-mètre, la force nécessaire à mettre en mouvement le véhicule solaire. Celui-ci indiquait une force d'environ 15 Newton, ce qui correspond à peu près à la valeur calculée de 15,83 Newton.

8. Pistes d'amélioration des performances du véhicule

Ce chapitre rapportera exclusivement des réflexions théoriques et pratiques qui permettraient d'optimiser les performances du véhicule.

Le véhicule solaire, créé pour ce travail, répond largement aux objectifs posés au début de la rédaction. Toutefois, ses performances, notamment concernant l'accélération, pourraient encore être améliorées. Ces améliorations, coûteuses en argent et en temps, ne seront pas réalisées dans le cadre de ce travail. Néanmoins, je tiens à en parler dans ce chapitre, car les points faibles d'une machine font également partie d'une analyse objective.

Mise à part le confort, c'est surtout l'autonomie du véhicule ainsi que sa puissance lors d'une accélération ou en pente élevée qui pourraient faire l'objet d'améliorations.

8.1 Autonomie

Si on veut améliorer l'autonomie, il faudrait d'une part, augmenter la quantité d'énergie disponible. Ceci peut être réalisé en remplaçant les batteries de plomb par des batteries de type lithium-polymère et en échangeant les cellules photovoltaïques monocristallines, par des cellules haute-performance qui ont un meilleur rendement énergétique.

D'autre part, il faut réduire la consommation énergétique du véhicule. Ceci est réalisable en réduisant l'intensité des forces résistantes au déplacement, par exemple celle du poids, des frottements entre les pneus et la route et l'intensité de la force de frottement avec l'air. Pour ce faire, on peut par exemple opter pour un conducteur, des batteries, un moteur ou un châssis moins lourd. Les frottements entre pneus et route restent négligeables si les pneus ont une pression suffisante. Pour améliorer l'aérodynamisme du véhicule, une étude serait requise afin de déterminer les points faibles de la construction.

8.2 Puissance du véhicule

Afin de déterminer les points qui déterminent l'accélération du véhicule, penchons-nous sur le principe fondamental de la dynamique : $\sum \overrightarrow{F_{ext}} = m \times \vec{a}$

On peut en déduire que : $\vec{a} = \frac{\sum \overrightarrow{F_{ext}}}{m}$

Pour augmenter la norme du vecteur accélération \vec{a} , donc avoir une accélération plus élevée, il faudrait soit augmenter la norme de la somme des forces extérieures $\sum \overrightarrow{F_{ext}}$ ou diminuer la masse du corps m .

La masse totale est probablement un des principaux inconvénients de mon prototype. Avec une masse plus faible et une force motrice égale, l'accélération du véhicule serait plus élevée.

Il faut savoir, qu'on obtient une augmentation de la somme des forces extérieures $\sum \overrightarrow{F_{ext}}$ de deux manières, soit en augmentant l'intensité des forces favorables à l'accélération, dites motrices \vec{F}_{mot} soit en diminuant l'intensité des forces défavorables à l'accélération, dites résistantes $\vec{F}_{rés}$.

Un moyen d'obtenir une meilleure force motrice, est d'équiper le véhicule d'un moteur plus puissant.

Améliorer la qualité des panneaux solaires permettrait au véhicule d'avoir plus d'énergie à disposition. Ainsi le temps de recharge serait diminué et le temps d'utilisation augmenté. Si l'installation photovoltaïque fournissait plus d'énergie et que le prototype était muni d'un moteur plus puissant, celui-ci présenterait alors une force motrice plus élevée. Ainsi la vitesse augmenterait plus vite, donc l'accélération serait plus élevée. Avec une force motrice plus élevée, le véhicule serait capable de monter des pentes plus raides.

8.3 Conclusion

En résumé, les composantes à améliorer sont: le moteur, les batteries, les cellules photovoltaïques ou encore le châssis. Le but étant à chaque fois d'en augmenter la puissance, d'en diminuer le poids ou d'en optimiser l'aérodynamisme. Il ne faut toutefois pas oublier que le but est de garder en équilibre, la balance entre la performance et le prix. C'est pourquoi mon prototype, bien qu'imparfait, satisfait largement l'objectif de ce travail : mouvoir une personne en ne se servant exclusivement de l'énergie solaire.

9. Sécurité

Pour éviter des accidents ou des situations dangereuses, on a d'abord dû identifier les dangers que peuvent présenter certaines parties de la machine. Une fois que tous les risques ont été trouvés, il a fallu réfléchir à d'éventuelles précautions afin d'éliminer constructivement les sources de dangers. Dans certains cas, le danger n'a pas pu être éliminé, alors l'utilisateur du véhicule sera averti du danger ainsi que des précautions à prendre lors de l'utilisation du véhicule, dans le manuel d'utilisation.

À l'aide de la norme européenne « DIN EN ISO 12100 : 2011-03 », une liste reprenant tous les risques et dangers potentiels a été établie pour cette machine.

La majorité des dangers est de nature électrique, par exemple les bornes des batteries, ou les raccords entre câbles du circuit de puissance. D'autre part, il y a aussi certains dangers mécaniques, dû au fait que le véhicule soit un corps en mouvement. La liste complète des dangers présents sur le véhicule, est jointe dans l'annexe de ce mémoire, sous le titre « Évaluation des éléments potentiellement dangereux ».

10. Réglementation

La construction étant achevée, il reste quand même encore un point à clarifier : La réglementation. En effet il ne suffit pas d'avoir un véhicule pour rouler sur la voie publique, il faut aussi être autorisé à y rouler, c'est-à-dire en avoir le droit. Pour savoir cela, il est nécessaire de consulter le chapitre concernant l'homologation de nouveaux véhicules dans le code de la route du pays respectif. Pour vérifier cela, j'ai également contacté la « Société Nationale de Circulation Automobile » (SNCA) ainsi que d'autres sociétés spécialisées dans l'homologation de véhicules.

10.1 Législation

Les lois traitées ci-après sont issues du « RECUEIL DE LÉGISLATION ROUTIÈRE » luxembourgeois, (LÉGISLATION : Mémorial A - 112 du 9 mars 2020, PRISE D'EFFET : 13 mars 2020). Les textes de la version actuelle du code de la route, sont susceptibles de changer. C'est pourquoi, l'analyse des textes de loi effectuée en ce jour peut diverger des textes d'une version plus récente.

10.1.1 Catégorie de véhicule

Commençons par déterminer la catégorie de véhicule, à laquelle appartient notre véhicule solaire.

Le véhicule étant muni de quatre roues, un siège ainsi que d'un moteur de 0,5kW peut, selon le Recueil de législation routière (page 64), être considéré comme un cycle électrique :

<p>Cycle électrique: véhicule routier à deux roues au moins, avec ou sans siège:</p> <ul style="list-style-type: none">– qui est propulsé exclusivement par l'énergie fournie par un moteur électrique dont la puissance nominale continue maximale ne dépasse pas 0,5 kW;– dont la vitesse maximale par construction ne dépasse pas 25 km/h. <p>A défaut pour le présent arrêté de disposer autrement de façon explicite, le cycle électrique est assimilé au cycle.</p> <p>Page 64</p>

10.1.2 Règles à appliquer

Vu que le « RECUEIL DE LÉGISLATION ROUTIÈRE », considère mon véhicule comme un cycle, il nécessite les mêmes équipements qu'un vélo normal, c'est-à-dire catadioptrés, feux de position avant et arrière, installation de frein etc.

On ne nécessite pas non-plus de permis de conduire pour pouvoir le conduire.

«1.Tout conducteur d'un véhicule routier ou d'un ensemble de véhicules routiers couplés doit être titulaire d'un permis de conduire ou détenir un certificat d'apprentissage établi à son nom, valable pour la conduite du véhicule ou de l'ensemble de véhicules couplés qu'il conduit.»

(Règl.g.-d.du 26 mai 2009)

«La disposition de l'alinéa précédent ne s'applique toutefois pas aux conducteurs

- d'un attelage de bêtes de trait;
- d'un véhicule équipé d'un moteur ou d'un ensemble de véhicules équipé d'un moteur destiné à être conduit par un ou plusieurs piétons;
- d'un cycle, d'un cycle à pédalage assisté ou d'un cycle électrique;

p.140

La conduite de mon véhicule sur la voie publique, est autorisée aux individus âgés d'au moins 10 ans.

Art.73.

(Règl.g.-d.du 13 janvier 2005)

«Il est interdit aux enfants âgés de moins de 10 ans de conduire sur la voie publique un cycle, un cycle à pédalage assisté, un cycle électrique, un véhicule équipé d'un moteur destiné à être conduit par un ou plusieurs piétons, un animal de trait, de charge ou de selle, un attelage ou un troupeau. Peuvent cependant conduire un cycle, à l'exception d'un cycle électrique, les enfants âgés de plus de 6 ans, s'ils sont accompagnés d'une personne âgée de 15 ans au moins ou s'ils se rendent à l'école.

« Peuvent également conduire un cycle les enfants de moins de 13 ans qui se trouvent dans une des situations énumérées à l'article 162bis.»₁

Il est de même interdit aux propriétaires de cycles, de cycles à pédalage assisté, de cycles électriques, de véhicules équipés d'un moteur destinés à être conduits par un ou plusieurs piétons, d'animaux de trait, de charge ou de selle, d'attelages ou de troupeaux de faire ou de laisser conduire ceux-ci par des enfants.»

(...) (Abrogé par le règl.g.-d.du 6 juillet 2004)

(Règl.g.-d.du 8 décembre 2011)

p.139 à 140

Selon la loi, mon véhicule, ne dépassant pas la vitesse de 25km/h, est dispensé du contrôle technique.

Par dérogation aux dispositions de l'alinéa 4, les véhicules routiers suivants ne sont pas soumis au contrôle technique périodique:

- les véhicules à moteur dont la vitesse maximale par construction ne dépasse pas 25 km/h;

[...]

Page 21

10.2 Application pratique

Après avoir examiné le règlement grand-ducal s'appliquant à mon véhicule, j'ai contacté le service responsable de l'homologation de nouveaux véhicules de la Société Nationale du Contrôle Automobile.

Ceux-ci m'ont répondu que « tout nouveau véhicule a besoin d'un certificat de conformité européen pour pouvoir être immatriculé ». Avant de pouvoir être homologué à échelle nationale, mon véhicule doit d'abord être accepté à échelle européenne.

Suite à cela, j'ai contacté trois organismes pouvant délivrer les certificats de conformité européens, l'« ATEEL » à Wecker (L), « Luxcontrol » à Esch-sur-Alzette (L) et « TÜV Rheinland Luxembourg » à Luxembourg (L). De ces trois entreprises, je n'ai qu'obtenu une réponse de la société « Luxcontrol ». Ceux-ci m'ont communiqué que l'homologation de mon véhicule allait être problématique pour plusieurs raisons :

À échelle européenne, un cycle électrique ne nécessite pas d'homologation, il ne peut toutefois qu'avoir une puissance maximale continue de 250W et doit être équipé de pédales aidant à la propulsion. Cela n'étant pas mon cas, mon véhicule sera considéré comme quadricycle léger (vitesse maximale de 45km/h) et nécessite une homologation. Soumis à d'autres critères, l'homologation de mon véhicule s'annonce critique. L'assise du siège du véhicule, doit par exemple se trouver à une hauteur d'au moins 400 mm par rapport au sol.

Selon eux, le seul moyen pour que mon véhicule soit autorisé à emprunter la voie publique, serait de demander une dérogation nationale, qui le dispenserait alors de certains critères.

10.3 Conclusion

Le véhicule que j'ai réalisé ne possède pas de « pédales aidant à la propulsion » et est équipé d'un moteur supérieur à 250 W. De ce fait, il nécessiterait une homologation pour être autorisé à rouler sur la voie publique.

11. Conclusion

Ce mémoire fut initialement un pari que je m'étais lancé : construire un véhicule capable de mouvoir un humain en n'utilisant que l'énergie émise par le Soleil.

Durant ce mémoire, je me suis intéressé à la réalisation d'un véhicule fonctionnant exclusivement avec des énergies renouvelables. J'ai suivi toutes les étapes entre la conception et l'analyse d'une nouvelle machine. Ayant commencé par choisir parmi les composantes électriques et mécaniques constituant la motorisation, j'ai ensuite dû calculer et dimensionner les composantes que j'allais utiliser pour mon prototype. Une fois la construction finie, il a fallu faire les premiers essais de conduite ainsi que de mesurer les performances du véhicule pour pouvoir les analyser. Après, il a encore fallu vérifier s'il m'était autorisé d'utiliser mon véhicule sur la voie publique. Pour cela, j'ai dû rechercher les textes de loi de la législation routière, concernant mon cas en particulier.

Je dois admettre qu'au début du projet, il m'était arrivé de ne pas être sûr que ce projet puisse être une réussite. Ayant été confronté à un bon nombre de personnes, qui malgré leur intérêt, semblaient douter de la faisabilité de la construction, j'ai persisté à y croire. Lorsque j'entrepris les premiers essais, je fus agréablement surpris des performances de mon véhicule qui n'eut aucune peine à mouvoir un humain. De ce fait, je pense avoir le droit d'être fier du résultat de ce projet.

Ainsi j'ai pu démontrer qu'il est possible de réaliser son propre véhicule utilisant des énergies renouvelables, à des coûts raisonnables. Cependant, si on veut l'utiliser comme moyen de transport sur la voie publique, il faut savoir que les démarches sont longues. Pour ne pas devoir répéter les démarches pour chaque véhicule, je pense que ces petits véhicules solaires sont plus favorables à la production en série (commerciale) qu'à la réalisation individuelle.

12. Annexe

12.1 Explication du fonctionnement d'une cellule photovoltaïque

12.1.1 Matériaux

Une cellule photovoltaïque est composée de deux couches de semi-conducteurs superposées, ces semi-conducteurs sont souvent du silicium, car on peut le gagner à partir de la silice présent dans le sable. Une fois extraites, les deux couches du matériau semi-conducteur sont chacune dopées. Le dopage consiste à introduire des impuretés dans la structure cristalline du silicium.

Prenons par exemple des semi-conducteurs à base de silicium (de valence IV) :

Dans un des semi-conducteurs il y a lieu de le doper avec des atomes d'une valence légèrement supérieure, par exemple de phosphore (valence V). Ainsi quatre des cinq électrons sur la couche de valence de chaque atome de phosphore se lieront aux électrons des atomes de silicium avoisinants afin de créer des liaisons covalentes. Notons que la force d'attraction entre le noyau et cet électron existe mais est assez faible. Ces cinquièmes électrons resteront donc près de leurs atomes de phosphore sous condition qu'ils ne soient pas attirés par une autre force. Ainsi, cette couche de semi-conducteur est dite « dopée N » dû au surplus d'électrons par rapport à un cristal de silicium pure.

Afin d'obtenir les propriétés voulues, l'autre couche du semi-conducteur sera pourvue d'atomes de valence légèrement inférieure à celle du silicium, le Bohr, est celui que l'on utilise dans la plupart des cas pour le dopage P. Inséré dans le cristal de silicium celui-ci va laisser un « trou » autour de soi vu qu'il ne présente que trois électrons pour les quatre atomes avoisinants. Ces trous vont donc, avoir tendance à attirer des électrons libres dans un rayon proche. Ce semi-conducteur est donc « dopé P ».

12.1.2 Jonction P-N

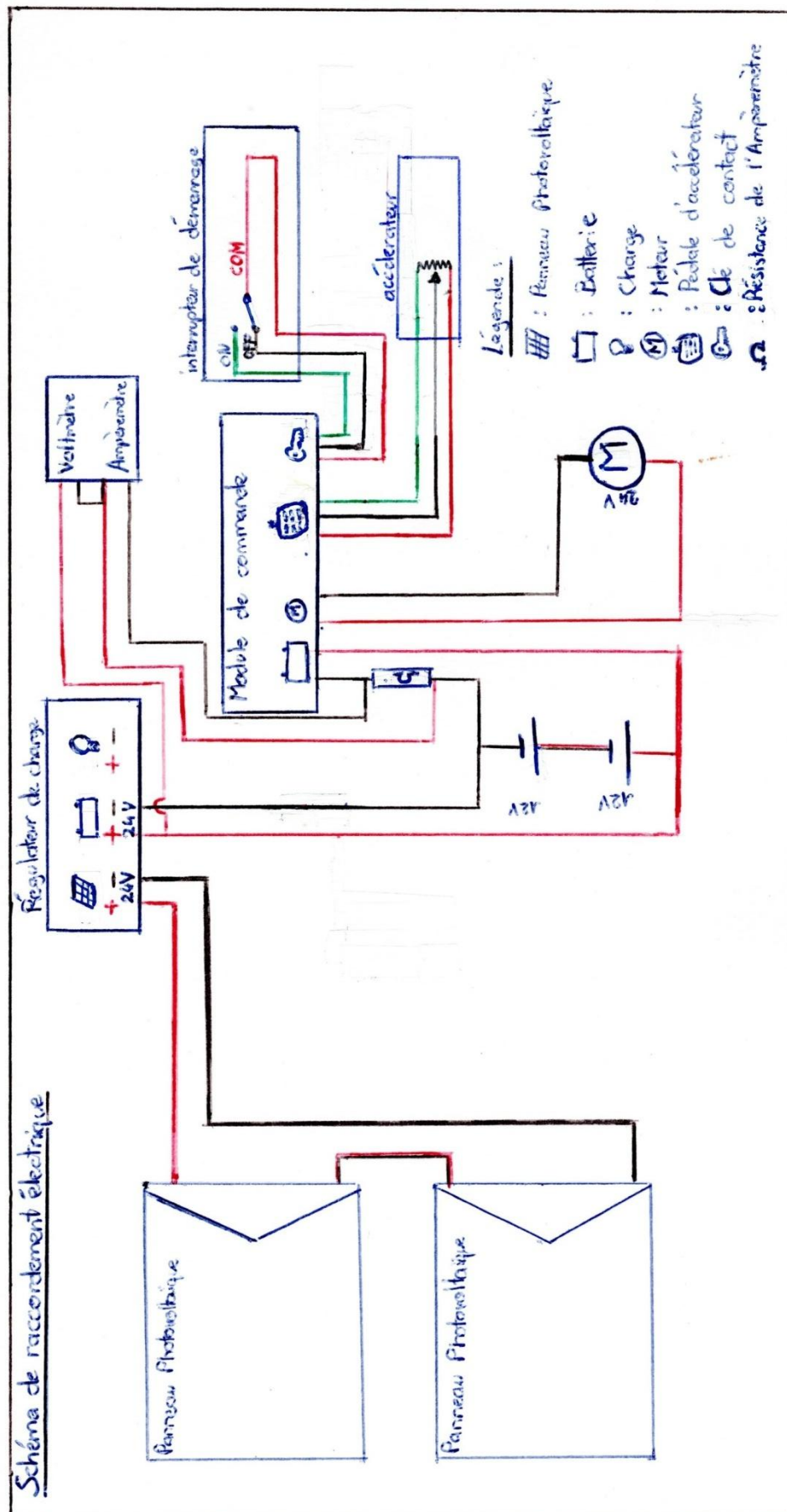
Lorsque les deux couches entrent en contact, il y a un transfert d'électrons entre les deux semi-conducteurs. Des électrons de la couche N étant assez proches de la couche P sont attirés par les trous et vont s'y déplacer. Ainsi se crée une jonction P-N entre les deux couches. Entre les couches de la jonction P-N, il y a une « zone de déplétion » qui se crée, celle-ci génère un champ électromagnétique allant de la zone N vers la zone P. Celui-ci va pallier au transfert d'électrons

entre les deux couches. La cellule est donc de nouveau dans un état stable. Pour finir l'assemblage de la cellule photovoltaïque, il faut toutefois encore raccorder chacune des couches du côté opposé à la jonction P-N, à un câble électrique afin de faire passer le courant ultérieurement.

Lorsque les cellules photovoltaïques sont raccordés à un circuit électrique et que celles-ci sont soumises à la lumière, les photons de la lumière touchant un des atomes de la cellule vont transmettre leur énergie à un des électrons qui, en quittant sa place, va y laisser un trou. Ceux-ci vont alors diffuser à travers la cellule, s'ils se trouvent au milieu d'une des couches, les chances sont grandes qu'ils s'approchent de nouveau et finissent par se recombiner. Si toutefois l'électron est libéré près de la couche PN, le champ électrique émis par la Zone de Déplétion va influencer le déplacement de l'électron libre à cause de sa charge négative, vers la zone N (et le trou vers la zone P). Ainsi on obtient une augmentation d'électrons à la borne N du circuit ce qui a pour effet de créer une tension entre les deux bornes de la cellule.

Si une cellule photovoltaïque n'est pas assez puissante, il est possible d'en superposer plusieurs afin d'augmenter le nombre de jonctions P-N et d'ainsi créer une cellule multi-jonction. Pour un véhicule par exemple, cela peut être intéressant en vue d'en augmenter la puissance tout en gardant la même surface d'exposition au soleil. D'autres matériaux, plus rares, peuvent aussi en améliorer les performances, mais le prix de telles cellules monte de manière conséquente.

12.2 Schéma de raccordement électrique



12.3 Sécurité - Évaluation des Éléments potentiellement

Sécurité - Véhicule solaire		Évaluation des Éléments potentiellement dangereux		
Type	Risque	Origine	Conséquences possibles	
Mécanique	renversement/être projeté	véhicule en mouvement	collision avec un individu	
	être projeté	énergie cinétique lors d'une collision	projection du conducteur hors du véhicule	
	écrasement	pneus roulant sur un individu	blessures	
	enchevêtrement	entroulement de vêtements sur l'axe arrière	arrachement du vêtement/étranglement du conducteur	
	enchevêtrement	entroulement de vêtements dans le bloc de traction	arrachement du vêtement/étranglement du conducteur	
	abrasion	main du conducteur en contact sur la route à gauche du siège		
Électrique	électrocution	maintenance du circuit électrique	électrocution	
Thermique	brûlures	surface chaude du moteur après utilisation prolongée	brûlure de la peau	
Acoustique	néant			
Vibrations	néant			
Radiations	néant			
Matériaux dangereux	corrosion (peau/équipement)	acide des batteries au plomb	peau: brûlure chimique / équipement: corrosion	
Ergonomie	compression	siège et volant non réglable	coincement dans le siège	
Machine-Environnement	pollution	fuite d'acide de la batterie	pollution de l'environnement	
combinaison de risques	néant			

Mesures de protection constructives		risque résiduel	instruction
réduction de	protection		
conséquence	pare-choc, bords arrondis	contusion possible	le conducteur doit faire attention aux obstacles
probabilité	ceinture de sécurité et siège baquet	néant	rouler prudemment
probabilité	pare-choc latéraux pour roues arrières	roues avant	veiller au positionnement des roues
	néant (capot de protection difficilement montable)	oui	vêtements serrés, rien ne doit dépasser derrière le dossier du siège
probabilité	capot sur le bloc de traction	faibles	vêtements serrés, rien ne doit dépasser derrière le dossier du siège
	néant	oui	garder ses deux mains sur le volant / ne pas laisser trainer ses mains sur la route
probabilité	isolation des cables/capot de protection batteries	pluie	ne pas toucher au circuit électrique, protéger le véhicule de l'humidité, réserver la maintenance à une personne compétente
probabilité	capot sur le moteur	faible	ne pas glisser la main sous le capot
	néant	oui	veiller au bon état de la batterie / remplacer en cas de dommage
	néant	oui	interdiction de l'utilisation à des individus trop grands, trop petits, trop larges
	néant	oui	veiller au bon état de la batterie / remplacer en cas de dommage

13. Sources

Matériel utilisé

Châssis

Kart Sodikart Model MC5

Batteries d'accumulateur

EXIDE PREMIUM EA472 12V 47AH 450A

Instrument de Mesure

PEACEFAIR DC Digital Power Meter 6.5-100V 50A PZEM-051

Moteur électrique

Unite Motor MY1020 - 24 V 500 W :

https://www.amazon.de/L-faster-24V36V48V-Electric-Brushed-Replacement/dp/B07DC2BXVL/ref=sr_1_5?_mk_de_DE=%C3%85M%C3%85%C5%BD%C3%95%C3%91&keywords=motor+24v+500w&qid=1566719957&s=gateway&sr=8-5

Cellules photovoltaïques

https://www.ebay.fr/sch/i.html?_from=R40&_trksid=p2047675.m570.l1313.TR12.TRC2.A0.H0.Xpanneau+solaire+100w.TRS0&_nkw=panneau+solaire+100w&_sacat=0

Citations et Références

(1) Le Monde

https://www.lemonde.fr/les-decodeurs/article/2018/12/10/six-chiffres-pour-comprendre-l-ampleur-de-la-pollution-automobile_5395374_4355770.html (2019/09/08 à 10h)

(2) Rendement Cellule Photovoltaïque

<https://www.engie.be/fr/blog/solutions-pour-la-maison/les-differents-types-de-panneaux-solaires/> (20190913 à 10h)

(3) Rendement Cellule Photovoltaïque

Physique 3, Énergie-Électricité de P. Avanzi, A. Kespy, J. Perret/Gentil, D. Pfistner et C. Moray éditions loisirs et pédagogie- apprendre ; page E/20)

(4) Rendement Cellule Photovoltaïque

<https://www.engie.be/fr/blog/solutions-pour-la-maison/les-differents-types-de-panneaux-solaires/> (20190913 à 11h)

(5) Prix Cellule Photovoltaïque

<https://www.engie.be/fr/blog/solutions-pour-la-maison/les-differents-types-de-panneaux-solaires/> (20190913 à 11h)

(6) Solidité Cellule Photovoltaïque

https://www.youtube.com/watch?v=QMR_GpsrlzM (20190913 à 15h)

<https://www.youtube.com/watch?v=UE61l1PdUyE> (20190913 à 15h)

(7) Rendement Moteur

Physique 3, Énergie-Électricité de P. Avanzi, A. Kespy, J. Perret/Gentil, D. Pfister et C. Moray éditions loisirs et pédagogie- apprendre ; page E/20)

(8) Moteurs à courant continu

Moteurs électriques industriels 2e édition ; par Pierre Mayé, éditions DUNOD, page 353)

(9) Moteurs asynchrones

Moteurs électriques industriels 2^e édition ; par Pierre Mayé, éditions DUNOD, page 165)

(10) Moteurs asynchrones

Moteurs électriques industriels 2e édition ; par Pierre Mayé, éditions DUNOD, page 231)

(11) Moteurs synchrones

Moteurs électriques industriels 2^e édition ; par Pierre Mayé, éditions DUNOD, (page 275)

Images

a) Cellule Photovoltaïque

https://media.kartable.fr/uploads/finalImages/final_5679712b4fb7e4.30262622.png

b) Moteur électrique

<https://energieplus-lesite.be/wp-content/uploads/2019/03/moteurprincipe1.GIF>

c) Batteries

http://assos.utc.fr/utcoupe/old/2005/fichiers/rapport_batterie.pdf (20190912 à 18h)

Sources humaines

LIPPERT Guy – Technical Director Homologation (Luxcontrol S.A.)

RODRIGUES David – Technique Service Immatriculation SNCA Sandweiler

WEIS Mike – Club de Karting Mondercange

Sources Bibliographiques

Physique 3, Énergie-Électricité de P. Avanzi, A. Kespy, J. Perret/Gentil, D. Pfister et C. Moray éditions loisirs et pédagogie- apprendre ; page E/20)

Moteurs électriques industriels 2^e édition ; par Pierre Mayé, éditions DUNOD

Electricité Appliquée – première partie de W. Legros, Université de Liège

Sources Internet

Meteolux - Graphique d'insolation de 2019

https://www.meteolux.lu/IMG/png/graph_sd_2019.png (2020/01/04)

Wikipedia – Effet de serre

https://fr.wikipedia.org/wiki/Gaz_%C3%A0_effet_de_serre (20190908 à 14h)

Le Monde - Six chiffres pour comprendre l'ampleur de la pollution automobile

https://www.lemonde.fr/les-decodeurs/article/2018/12/10/six-chiffres-pour-comprendre-l-ampleur-de-la-pollution-automobile_5395374_4355770.html (20190910 à 9h)

Le Monde - Tout comprendre à la pollution de l'air aux particules fines

https://www.lemonde.fr/planete/article/2013/12/12/tout-comprendre-a-la-pollution-de-l-air-aux-particules-fines_3529330_3244.html (20190910 à 9h)

EPA – Greenhouse Gas Emissions

<https://www.epa.gov/ghgemissions/overview-greenhouse-gases> (20190910 à 10h)

IPCC – Bilan 2001 des changements climatiques

https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/08/TAR_syfull_fr.pdf (20190910 à 10h)

Wikipedia – Énergie renouvelable

https://fr.wikipedia.org/wiki/%C3%89nergie_renouvelable (20190910 à 11h)

Youtube - Why Lithium-ion batteries are the future?

<https://www.youtube.com/watch?v=OvGB4ZyMvBU> (20190912 à 8h)

Youtube - Lithium-ion battery, How does it work?

<https://www.youtube.com/watch?v=VxMM4g2Sk8U> (20190912 à 10h30)

Wikipedia – Accumulateur électrique

https://fr.wikipedia.org/wiki/Accumulateur_%C3%A9lectrique (20190912 à 15h)

Wikipedia – Cellule photovoltaïque

https://fr.wikipedia.org/wiki/Cellule_photovolt%C3%A4ique (20190828 à 10h)

Wikipedia – Zone de déplétion

https://fr.wikipedia.org/wiki/Zone_de_d%C3%A9pl%C3%A9tion (20190828 à 11h)