

Conception d'un système mécanique permettant la récupération de l'énergie cinétique d'un vélo lors du freinage et sa restitution pour assister le cycliste lors du redémarrage

Auteur : Malvaux, Simon

Promoteur(s) : 10929

Faculté : Gembloux Agro-Bio Tech (GxABT)

Diplôme : Master en bioingénieur : sciences et technologies de l'environnement, à finalité spécialisée

Année académique : 2019-2020

URI/URL : <http://hdl.handle.net/2268.2/9634>

Avertissement à l'attention des usagers :

Tous les documents placés en accès ouvert sur le site le site MatheO sont protégés par le droit d'auteur. Conformément aux principes énoncés par la "Budapest Open Access Initiative"(BOAI, 2002), l'utilisateur du site peut lire, télécharger, copier, transmettre, imprimer, chercher ou faire un lien vers le texte intégral de ces documents, les disséquer pour les indexer, s'en servir de données pour un logiciel, ou s'en servir à toute autre fin légale (ou prévue par la réglementation relative au droit d'auteur). Toute utilisation du document à des fins commerciales est strictement interdite.

Par ailleurs, l'utilisateur s'engage à respecter les droits moraux de l'auteur, principalement le droit à l'intégrité de l'oeuvre et le droit de paternité et ce dans toute utilisation que l'utilisateur entreprend. Ainsi, à titre d'exemple, lorsqu'il reproduira un document par extrait ou dans son intégralité, l'utilisateur citera de manière complète les sources telles que mentionnées ci-dessus. Toute utilisation non explicitement autorisée ci-avant (telle que par exemple, la modification du document ou son résumé) nécessite l'autorisation préalable et expresse des auteurs ou de leurs ayants droit.



LIÈGE université
Gembloux
Agro-Bio Tech

CONCEPTION D'UN SYSTÈME MÉCANIQUE PERMETTANT LA
RÉCUPÉRATION DE L'ÉNERGIE CINÉTIQUE D'UN VÉLO LORS DU
FREINAGE ET SA RESTITUTION POUR ASSISTER LE CYCLISTE
LORS DU REDÉMARRAGE.

Simon-Pierre Malvaux

TRAVAIL DE FIN D'ÉTUDES PRÉSENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLÔME DE MASTER
BIOINGÉNIEUR EN SCIENCES ET TECHNOLOGIES DE L'ENVIRONNEMENT

ANNÉE ACADÉMIQUE 2019-2020

Promoteur : Prof. B. Raucant
Co-Promoteur : B. Mercatoris

"Toute reproduction du présent document, par quelque procédé que ce soit, ne peut être réalisée qu'avec l'autorisation de l'auteur et de l'autorité académique de Gembloux Agro-Bio Tech."

"Le présent document n'engage que son auteur."



LIÈGE université
Gembloux
Agro-Bio Tech

CONCEPTION D'UN SYSTÈME MÉCANIQUE PERMETTANT LA
RÉCUPÉRATION DE L'ÉNERGIE CINÉTIQUE D'UN VÉLO LORS DU
FREINAGE ET SA RESTITUTION POUR ASSISTER LE CYCLISTE
LORS DU REDÉMARRAGE.

Simon-Pierre Malvaux

TRAVAIL DE FIN D'ÉTUDES PRÉSENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLÔME DE MASTER
BIOINGÉNIEUR EN SCIENCES ET TECHNOLOGIES DE L'ENVIRONNEMENT

ANNÉE ACADÉMIQUE 2019-2020

Promoteur : Prof. B. Raucent
Co-Promoteur : B. Mercatoris

Remerciements

Avant tout je souhaite remercier la faculté de Gembloux Agro-Bio Tech qui m'a donné pendant ces cinq années un cadre idéal pour mes études universitaires. L'excellence de son enseignement m'a permis d'acquérir les connaissances nécessaires pour exercer mon futur métier. La faculté m'a non seulement fourni un environnement optimal pour mon épanouissement intellectuel, mais également pour mon développement personnel et humain. Les belles rencontres que j'y ai faites avec les enseignants, le personnel facultaire, les étudiants et les professionnels ont renforcé ma vocation à oeuvrer en faveur du développement durable et d'un monde plus juste.

Ensuite, je souhaite remercier mon promoteur, le Prof. B. Raucent, pour le partage de ses connaissances professionnelles, l'encadrement de qualité et les précieux conseils qu'il m'a fournis pendant toute la durée du TFE. J'aimerais également remercier mon co-promoteur, monsieur B. Mercatoris, pour sa vision extérieure sur le travail, ses encouragements et ses nombreux conseils pour l'écriture du présent travail.

Je remercie du fond du coeur ma famille qui m'a soutenu tout au long de mes études et qui a toujours le mot pour rire.

Finalement, je souhaite remercier tous mes amis gembloutois sans qui ma vie universitaire n'aurait pas été aussi folklorique.

Résumé

La récente conscientisation collective des impacts négatifs des gaz à effets de serre sur la santé humaine et l'environnement a sensibilisé les gouvernements et les citoyens à la mobilité douce. La forte augmentation des ventes de vélo à assistance électrique (VAE), des vélos en libre service en ville et des trottinettes électriques en est le reflet. Le but du présent travail est de favoriser l'utilisation du vélo en créant un système d'assistance de courte durée pendant les phases les plus énergivores du pédalage. Le système est purement mécanique et se base sur le principe de récupération d'énergie cinétique lors du freinage. En d'autres termes, il récupère l'énergie cinétique qui, sur un vélo conventionnel, est perdue sous forme de chaleur dans les freins.

Le travail se base sur une approche prescriptive qui consiste à subdiviser le design conceptuel en différentes étapes pour structurer le processus de création. En comparant les méthodes de stockage d'énergie sous forme cinétique, élastique, pneumatique et potentielle en fonction de la capacité de stockage d'énergie, du rendement total, du poids, de la sécurité, de la facilité de mise en place et d'utilisation, un système de récupération d'énergie cinétique (SREC) à base d'un ressort en spirale est retenu. Un prédimensionnement du ressort est effectué et un dessin schématique illustre le système imaginé.

La création d'une maquette permet de valider le fonctionnement d'un SREC basé sur un moyen de stockage par ressort linéaire. Les observations lors des étapes d'enclenchement, de stockage et de restitution mettent en lumière certains points faibles à prendre en compte lors d'un éventuel prototypage.

Les mesures sur la maquette déterminent des courbes de puissances et un rendement approximatif du système de 51%. Celui-ci est nettement inférieur au rendement théorique calculé de 68%.

Finalement, des solutions sont proposées pour rendre le SREC à base du ressort en spirale le plus performant possible, notamment en réduisant le poids et en augmentant l'énergie stockée grâce à l'utilisation de matériaux composites.

Mots-Clés : SREC, vélo, ressort en spirale, énergie élastique, ressort de traction, stockage d'énergie

Abstract

As a result of the increasing awareness in recent decades of the negative impacts of greenhouse gases on the human health and the environment, governments and citizens are becoming more and more sensitive to soft mobility. The significant increase in sales of electrically assisted bikes (EAB) and the important amount of bike- and scooter-sharing systems in the cities are just a few examples. This study aims to promote the use of bicycles by designing a short-term assistance system that would help the cyclist during the most energy consuming phases of the ride. The system is purely mechanical and is based on the principle of kinetic energy recovery during braking. In other words, it recovers the kinetic energy which, on conventional bicycles, is dissipated as heat in the brakes.

The present work adopts a prescriptive approach which consists of dividing the conceptual design into different phases in order to structure the creative process. By comparing storage systems based on kinetic, elastic, pneumatic, and potential energy according to their energy storage capacity, total efficiency, weight, safety, ease of installation and use, a kinetic energy recovering system (KERS) based on a spiral spring is selected. A pre-dimensioning of the spring is carried out and a schematic drawing illustrates the imagined system.

A mockup based on a traction spring storage medium validates the working of the KERS. Observations during the engagement, storing and restitution stages highlight some improvements that should be taken into account in future prototyping.

Measurements on the mockup determine power curves and an approximate total efficiency of 51%. This is far below the theoretical calculated efficiency of 68%.

Finally, solutions are proposed to make the spiral spring-based KERS as efficient as possible, in particular by using composite materials to reduce the weight and to increase the stored energy.

Key words : KERS, bicycle, spiral spring, elastic energy, traction spring, energy storage

Table des matières

1	Introduction	1
2	Methode de conception d'une machine	3
2.1	Clarification des objectifs	4
2.2	Cahier des charges	4
2.3	Recherche de solutions	6
2.4	Evaluation des solutions globales	7
3	Cahier des charges du système à concevoir	9
4	Design conceptuel	10
4.1	Analyse fonctionnelle	10
4.2	Recherche de solutions	11
4.2.1	Brainstorming	11
4.2.2	Graphique morphologique	11
4.2.3	Combinaison de solutions	12
4.2.3.1	Volant d'inertie	13
4.2.3.2	Ressort en spirale	15
4.2.3.3	Ressort linéaire	17
4.2.3.4	Système pneumatique	18
4.2.3.5	Système à énergie potentielle	19
4.3	Évaluation des solutions de stockage	20
4.3.1	Détermination des critères de performance	20
4.3.1.1	Volant d'inertie	22
4.3.1.2	Ressort en spirale	24
4.3.1.3	Ressort linéaire	25
4.3.1.4	Système pneumatique	26
4.3.1.5	Système d'énergie potentielle	28
4.3.2	Evaluation absolue simple	28
4.4	Système retenu	29
4.4.1	Prédimensionnement	29
4.4.2	Dessin du projet	30
4.4.3	Analyse de risques	31
5	Preuve de concept au moyen d'une maquette	33
5.1	Simplification du système retenu	33
5.2	Réalisation d'une maquette	34
5.2.1	Enclenchement	35
5.2.2	Stockage	37
5.2.3	Restitution	38
5.3	Observations et pistes d'améliorations de la maquette	38
6	Essais et mesures	40
6.1	Mesures réalisées	40
6.2	Extrapolation des mesures	42

7 Pistes d'améliorations du SREC contenant un ressort en spirale et perspectives	43
7.1 Choix du matériau	43
7.2 Perspectives	45
8 Conclusion	47
9 Bibliographie	48
10 Annexes	
A Cahiers des charges	
B Graphe morphologique du SREC	
C Caractéristiques du matériau constitutif du ressort en spirale	
D Caractéristiques du ressort de traction du prototype	

Liste des figures

1	Approche générale du design conceptuel	3
2	Graphique des objectifs d'une trieuse de carottes	4
3	Graphique des fonctions d'une trieuse de carottes	5
4	Séance de brainstorming à la faculté de Gembloux Agro-Bio Tech (Université de Liège)	6
5	Graphique morphologique d'une trieuse de carottes	7
6	Graphique des fonctions du SREC appliqué au vélo	10
7	Esquisses réalisées par les participants lors des séances de brainstorming	11
8	Graphique morphologique du SREC appliqué au vélo (1/2)	12
9	Train épicycloïdal	13
10	Esquisses du système de stockage à base d'un volant d'inertie	14
11	Esquisses du système 1 de stockage à base d'un ressort en spirale avec train d'engrenages classique	15
12	Esquisse du système de stockage à base d'un ressort en spirale et d'un train épicycloïdal	16
13	Phases de fonctionnement d'une solution globale à base d'un ressort de traction et d'une crémaillère	17
14	Esquisse d'un SREC à base d'un ressort de traction et d'une bobine	18
15	Esquisse d'un SREC à stockage pneumatique	18
16	Coupe d'un moteur à palettes	19
17	SREC exploitant l'énergie potentielle	20
18	Comparaison des systèmes électriques de stockage d'énergie en fonction du temps de décharge et de la puissance nominale	21
19	Diagramme de Ragone pour les systèmes de stockage les plus communs	22
20	Rendement d'un moteur pneumatique à palettes	27
21	Graphiques de performance du ressort : (a) Débattement en fonction du couple (b) Capacité énergétique en fonction du couple	30
22	Schéma cinématique du SREC retenu	30
23	Analyse du mode de défaillance pour le SREC	32
24	Schéma cinématique du prototype	34
25	GRAFCET du prototype	35
26	Engrenage en MDF sur roulement à billes	35
27	Système d'enclenchement hydraulique	36
28	Glissière servant de support à l'embrayage et mécanisme de transmission par engrenage entre l'axe 1 et 2	36
29	Vue du dessus du système "d'enclenchement" et "restitution"	36
30	Roue à rochet et cliquet	37
31	Embrayage limiteur de charge permettant le couplage (a) ou découplage (b) de la bobine avec l'axe 2	37
32	Système de stockage	38
33	Courroie de restitution entre l'axe 2 et l'axe 1	38
34	Signes d'usure sur l'engrenage 2	39
35	Dispositif "masse-poulie" de prise de mesures	40
36	Courbe de puissance et de couple en fonction de la vitesse de rotation	41
37	Courbe de l'énergie stockée en fonction de la puissance et du couple	41
38	Diagramme de Ashby : module spécifique - résistance spécifique	43
39	Densités énergétiques de différents matériaux composites et d'un ressort en acier	44

40	Diagramme de Ragone comparant les PRF à d'autres moyens de stockage d'énergie	45
41	Exemple d'un cycle de conduite automobile	46
42	Grphe morphologique du SREC appliqué au vélo (2/2)	

Liste des tableaux

1	CDC partiel d'une trieuse de carottes	5
2	Classement relatif simple	8
3	CDC partiel du SREC	9
4	Caractéristiques du volant d'inertie	22
5	Evaluation absolue simple du SREC	29
6	Caractéristiques du ressort en spirale	29
7	Rendements théoriques des composants du prototype	42
8	CDC de la trieuse de carottes	
9	CDC du SREC appliqué au vélo	

Liste des abréviations

<i>CDC</i>	Cahier Des Charges
<i>FC</i>	Fonction de Contrainte
<i>FP</i>	Fonction Principale
<i>FT</i>	Fonction Technique
<i>GRAFCET</i>	Graphe Fonctionnel de Commande des Étapes et Transitions
<i>PRF</i>	Polymères Renforcés de Fibres
<i>SREC</i>	Système de Récupération d'Énergie Cinétique
<i>VAE</i>	Vélo à Assistance Électrique

1 Introduction

Dans un contexte de conscientisation des impacts du changement climatique sur terre et d'une augmentation des prix des carburants, le secteur du transport tente de concevoir des machines moins polluantes et plus efficaces énergétiquement. Les facteurs influençant la consommation énergétique des véhicules sont nombreux : vitesse, l'aérodynamisme, la charge, . . . Il s'avère que l'un d'eux, le freinage régénératif, est un moyen efficace et fort étudié pour accroître l'efficacité énergétique des véhicules [Ehsani et al., 2005, Odhams et al., 2010]. Ce type de freinage permet de récupérer, de stocker et de restituer une partie de l'énergie cinétique de la machine qui est dissipée sous forme de chaleur dans les freins.

Différents systèmes de récupération d'énergie cinétique (SREC) existent ; ils se distinguent par leur manière de stocker l'énergie. Trois grandes formes de stockage sont communément utilisés dans des SREC appliqués aux véhicules ; le stockage sous forme d'énergie électrique, pneumatique ou mécanique.

Lors du freinage de véhicules électriques, l'énergie cinétique peut être transformée en énergie électrique grâce au moteur qui fonctionne alors comme générateur. L'électricité générée est ensuite stockée dans des batteries ou des supercondensateurs [Cao and Emadi, 2012]. Suite à l'essor du secteur des voitures électriques, ce type de récupération d'énergie a été largement implémenté dans les véhicules au cours des dernières années pour augmenter l'autonomie des batteries [Maia et al., 2015].

La récupération de l'énergie cinétique et le stockage sous forme d'air comprimé dans un réservoir est une alternative au stockage électrique. Lors du freinage, le moteur fonctionne comme un compresseur. Il absorbe une grande partie de la puissance de freinage et la stocke sous forme d'air comprimé [Johansson et al., 2010].

Finalement, les SREC mécaniques permettent un stockage de l'énergie sous forme d'énergie cinétique, élastique ou potentielle. A titre d'exemple, le volant d'inertie est un système permettant le stockage sous forme d'énergie cinétique dans une masse tournante. Depuis des années, ils sont utilisés comme système de récupération dans de nombreux moyens de transport : dans des bus, des métros ou encore des voitures [Amiryar and Pullen, 2017]. Des recherches récentes [Arai et al., 2019] ont aussi démontré la capacité de systèmes mécaniques à ressorts de restituer, avec un rendement élevé, l'énergie perdue sur des machines moins complexes et de masse moins importante que celles citées précédemment.

En prenant connaissance de l'existence des SREC dans le milieu automobile et en voyant l'essor que prend la mobilité douce en Europe l'auteur présente dans ce document une application d'un SREC appliqué au vélo conventionnel.

Les nombreux avantages que présente le VAE, tels que son faible coût énergétique, son effet bénéfique sur la santé et sa durabilité environnementale ont fortement contribué à l'augmentation des ventes de la filière au cours des dernières années [Muetze and Tan, 2007]. Cependant, les constructeurs peinent à résoudre les problèmes liés à l'autonomie et à la durabilité des batteries. Pour répondre au problème d'autonomie, une des solutions envisagées est l'installation d'un SREC électrique chargeant la batterie lors du freinage. Cependant, l'augmentation du coût, du poids et de la complexité du système limitent fortement son implémentation généralisée sur les VAE, sans compter le rendement inférieur à 10% [Lipowsky et al., 2017].

C'est dans cette optique que s'inscrit le présent travail qui étudie un système alternatif d'assistance au cycliste lors d'une phase énergivore, à savoir la phase de redémarrage après freinage.

L'idée est de développer un SREC capable de récupérer un maximum d'énergie du vélo qui freine en descente ou décélère sur une route plane, de la stocker durant une courte période et de la restituer rapidement lorsque le cycliste en a besoin. Afin de rendre l'innovation la plus adaptée possible au vélo conventionnel, la recherche vise à développer un système purement mécanique qui a un bon rendement énergétique, un faible poids, un coût limité et dont l'installation est facile et l'utilisation simple.

La **méthode de conception** retenue pour ce travail est d'abord longuement explicitée. Le **cahier des charges** est ensuite détaillé in extenso, puis tout le **design conceptuel** est passé en revue, depuis l'analyse fonctionnelle jusqu'au prédimensionnement et au dessin du SREC retenu. L'arrivée de la pandémie du Covid 19 et le confinement qui a suivi n'ont malheureusement pas permis d'avoir accès au matériel de prototypage dont dispose l'université. Une **maquette** a donc été créée, visant à démontrer la fonctionnalité d'un SREC simplifié. Les **essais et les mesures** effectuées sur la maquette font aussi l'objet d'une présentation et d'une discussion. Enfin, des **pistes d'améliorations** sont envisagées et une série de **recommandations** est effectuée avant de conclure.

2 Méthode de conception d'une machine

La conception d'une machine consiste à clarifier et à donner une description précise d'une idée ou d'une demande d'un client afin de permettre la fabrication de l'objet. Contrairement à beaucoup de domaines de sciences appliquées où la recherche tente de trouver la seule et unique solution, le domaine de la conception ne présente pas toujours de solution directe au problème initial posé. Le concepteur doit en effet accepter de travailler avec beaucoup d'incertitudes et doit pouvoir remettre ses choix en question à tout moment. Il doit faire preuve de créativité, d'imagination et savoir penser hors des sentiers battus. Néanmoins il est primordial que le concepteur travaille avec méthodologie et rigueur [Raucent, 2013].

Un grand nombre de modèles structurant le processus de conception ont été proposés dans les années 1960-1970. Ceux-ci sont largement utilisés comme canevas en conception mécanique pour convertir un set d'objectifs de conception en solutions concrètes [Kannengiesser et al., 2017]. Pour ce travail, l'approche basée sur les travaux des Professeurs Pahl et Beitz est adoptée. Il s'agit d'une approche prescriptive qui consiste à subdiviser le design conceptuel en différentes étapes afin de systématiser la conception tout en laissant libre champ à la créativité du concepteur. La Figure 1 reprend l'approche générale de la conception d'une machine recommandée par le VDI (Verein Deutscher Ingenieure). Celle-ci comprend les différentes étapes ainsi que les résultats attendus pour

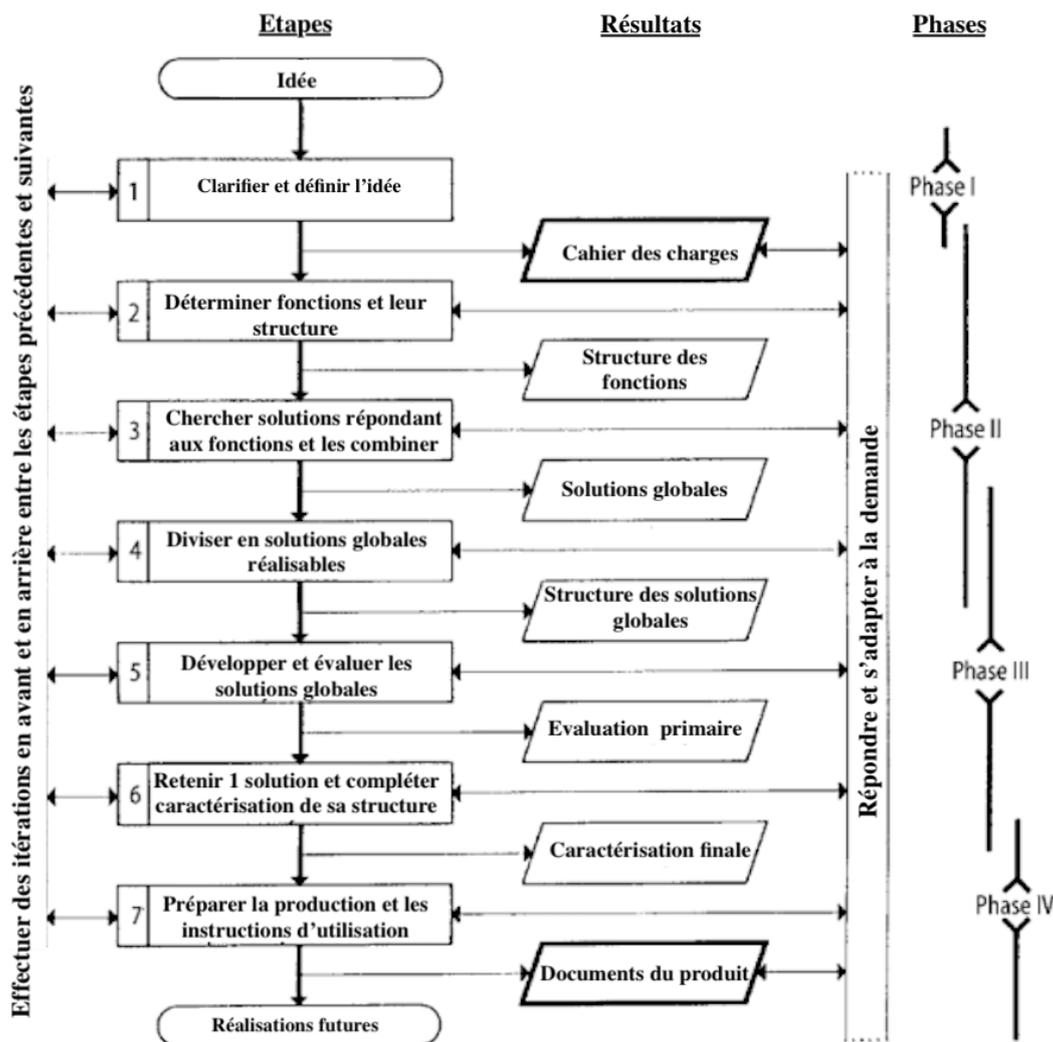


FIGURE 1 – Approche générale du design conceptuel - adapté de [Pahl et al., 2007]

chacune d'elles. Il est important d'insister sur le fait qu'il s'agit d'une méthode itérative. En effet, la séquence des étapes n'est pas rigide ; certaines peuvent être omises alors que d'autres peuvent être répétées plusieurs fois [Pahl et al., 2007].

Afin de clarifier les phases de conception d'une machine et de s'y familiariser, il est décidé d'appliquer les quatre premières étapes de l'approche systématique proposée ci-dessus à une machine simple d'utilisation : une trieuse de carottes.

2.1 Clarification des objectifs

La première étape consiste à clarifier les objectifs pour créer un cahier des charges (CDC) reprenant au mieux les fonctions que la machine à concevoir doit remplir. Une trieuse de carottes doit permettre aux agriculteurs ou distributeurs de trier les carottes afin d'éliminer les carottes malformées et de proposer différentes tailles sur le marché. Afin de définir les fonctions spécifiques de la machine, il est utile de se poser un maximum de questions quant à l'objet final. De quoi s'agit-il ? Qui utilisera la machine ? Comment fonctionnera-t-elle ? Toutes ces questions permettent de mettre des liens entre les fonctions et donc de se poser davantage de questions, détaillant de la sorte les spécificités de l'objet final. Pour une trieuse de carottes, le graphique des objectifs est repris à la Figure 2.

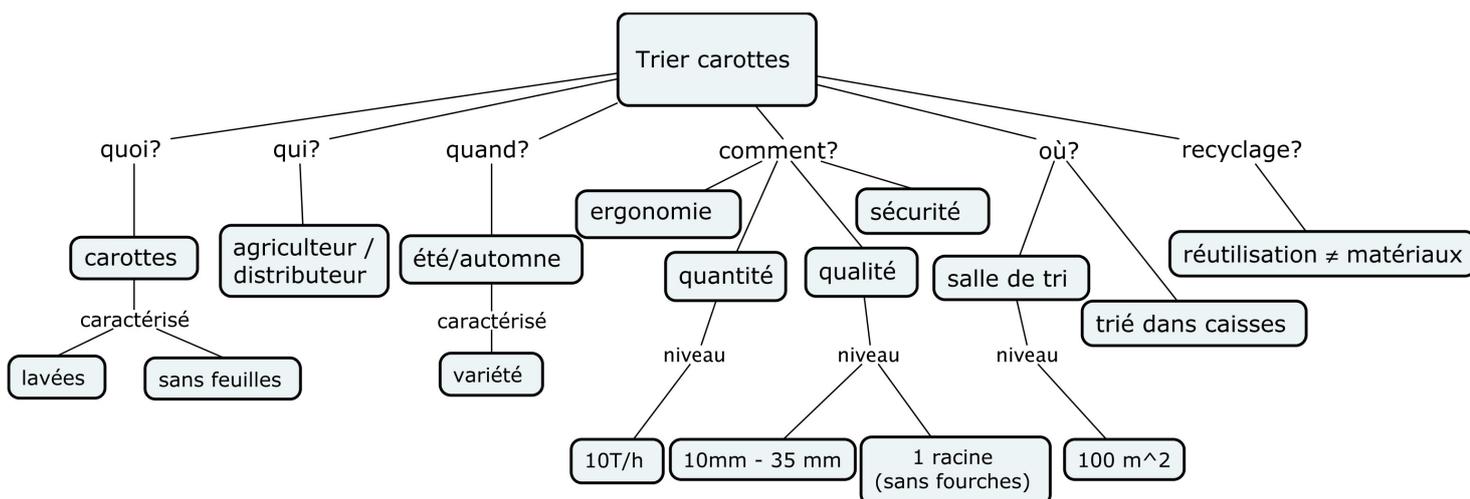


FIGURE 2 – Graphique des objectifs d'une trieuse de carottes

2.2 Cahier des charges

En ajoutant des données quantitatives à ce graphique, le concepteur peut écrire le CDC. Dans ce document il faut distinguer les fonctions principales (FP) qui permettent de répondre à la demande et les fonctions de contraintes (FC) qui limitent la liberté technique du concepteur puisqu'elles consistent, la plupart du temps, à adapter la machine à l'endroit où elle se trouve et à la manière dont elle est utilisée. Pour chacune de ces fonctions, ce sont les critères qui imposent les éléments mesurables et observables de l'invention et les niveaux qui indiquent les valeurs à ne pas dépasser [MENJ, 2020]. Une partie du CDC est donnée en exemple dans le Tableau 1. Le CDC doit être le plus complet possible dès sa création, mais peut subir des modifications au cours du temps. Il est pour cela important de noter la date du changement apporté ainsi que la personne responsable de celui-ci. L'étape suivante consiste à déterminer les fonctions techniques (FT) que la machine doit assumer pour répondre aux critères du CDC. A ce stade l'attention est portée sur la suite

Tableau 1 – CDC partiel d'une trieuse de carottes

Cahier des charges d'une trieuse de carottes	
Contexte : Proposer une machine aux agriculteurs/ distributeurs permettant de trier les carottes récoltées en fonction de leur taille.	
Date	Origine
12/02	S. Malvaux
FONCTIONS PRINCIPALES FP 1 : Trier les carottes	
12/02	S. Malvaux
CRITERES ET NIVEAUX DES FONCTIONS PRINCIPALES CP 1.1 La machine doit avoir une capacité de tri de 10 T/h. CP 1.2 La machine doit être compatible pour toutes les variétés de carottes. CP 1.3 Le diamètre des carottes à trier se situe entre 10-35 mm. CP 1.4 La machine élimine les carottes qui ont une fourche.	
S. Malvaux	FONCTIONS DE CONTRAINTE
15/02	FC 1 : Conditions d'arrivée
12/02	FC 2 : Taille de salle de tri
12/02	FC 3 : Facilité d'installation et d'utilisation
15/02	FC 4 : Conditions de sortie
12/02	FC 5 : Nuisances
S. Malvaux	CRITERES ET NIVEAUX DES FONCTIONS DE CONTRAINTE
12/02	CC 1.1 Les carottes arrivent en caisses de 1 m ³ et sont déposées sur un tapis roulant.
15/02	CC 2.1 La taille du local de tri est de 100 m ²
12/02	CC 2.2 Le local de tri doit être équipé d'une alimentation en électricité de type 3-phase.

d'actions que la machine va entreprendre. La FP, ici le tri des carottes, peut être subdivisée en un certain nombre de sous-fonctions principales qui englobent à leur tour des FT. Parmi ces dernières une distinction doit être faite entre les fonctions de base qui sont obligatoires et les fonctions de transfert qui varient selon les solutions retenues par le concepteur. Toutes ces fonctions sont reprises dans le graphique des fonctions (Fig. 3). Il reprend les actions subies par la carotte ainsi que l'état dans lequel elle se trouve.

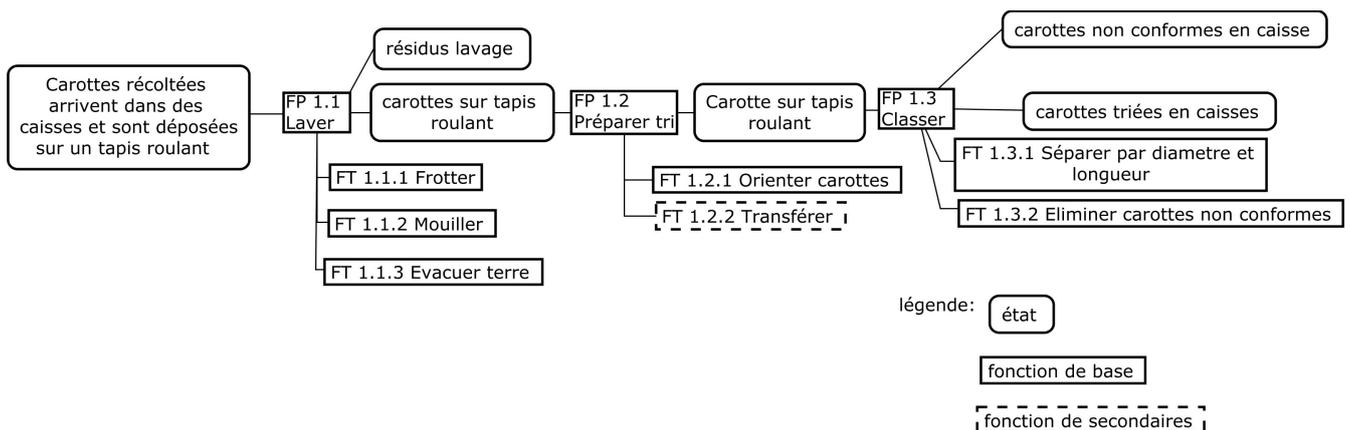


FIGURE 3 – Graphique des fonctions d'une trieuse de carottes

2.3 Recherche de solutions

La troisième étape consiste en la partie créative de la conception ; il s'agit de la recherche de solutions au problème évoqué. Pour ce faire, différentes approches existent, mais toutes encouragent le développement de la créativité et tentent de faire germer un maximum d'idées pour répondre aux objectifs de la machine à concevoir.

Dans le cadre de ce mémoire, la technique du brainstorming est appliquée. Comme son nom l'indique, il s'agit d'une méthode participative qui recherche la spontanéité des participants face à un problème donné. Chaque séance de brainstorming dure environ une heure et demie et rassemble quatre à six participants, idéalement de formations différentes. Dans un premier temps les participants sont priés de réfléchir individuellement à une solution répondant à l'objectif global. Pour la trieuse de carottes les participants sont invités à dessiner sur papier un système permettant de trier les carottes (Figure 4) . Après quinze minutes chaque participant présente rapidement ses idées devant le groupe. Ensuite une réflexion collective d'environ dix minutes est faite sur les idées proposées. Les participants peuvent reprendre les idées des autres et y apporter des modifications tout en veillant à rester courtois et positifs. La critique de propositions d'autrui est formellement interdite car elle présente un frein au processus de créativité. Suite à la réflexion de groupe, les idées sont liées, organisées et hiérarchisées. Dans un deuxième temps, les participants approfondissent les idées les plus pertinentes et tentent de répondre de manière plus détaillée aux FT de la machine à concevoir. Un deuxième tour de table permet ensuite de réunir les idées de tous les participants. La réunion se termine par une réflexion collective finale permettant de retravailler une dernière fois les solutions des autres.



FIGURE 4 – Séance de brainstorming à la faculté de Gembloux Agro-Bio Tech (Université de Liège)

A la suite d'une séance de brainstorming, le médiateur doit réaliser un tableau reprenant pour chacune des FT un dessin des solutions retenues. Il s'agit du graphe morphologique (Figure 5) . Pendant la séance, les participants ont par exemple proposés des systèmes de nettoyage par aspersion d'eau, par brossage ou à l'aide d'une table vibrante perforée. Pour préparer les carottes au tri, des systèmes d'alignements utilisant la gravité puis une butée, des tapis roulants à rigoles, des élévateurs à tasseaux, un cylindre incliné ou encore un tapis roulant surmonté de blocs fixes sont imaginés par les participants.

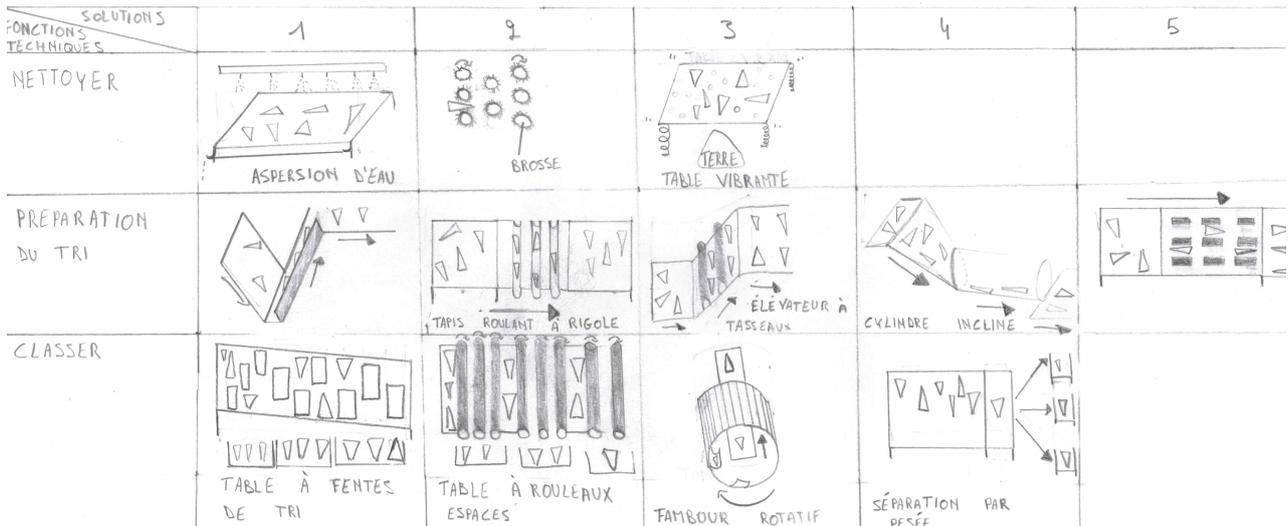


FIGURE 5 – Graphique morphologique d'une trieuse de carottes

Finalement, les techniques de classement retenues sont la table à trous inclinée, la table à rouleaux espacés, le tambour rotatif à pales de tailles variables et la séparation par pesée.

En combinant les solutions retenues, le concepteur s'approche de la solution finale. Dans le cas d'une trieuse de carottes un grand nombre de solutions s'offrent au concepteur :

- Les carottes sont brossées puis arrosées d'eau avant de continuer sur un élévateur à tasseaux pour être alignées et finalement passer dans le tambour rotatif pour être classifiées en fonction de leur taille.
- Les carottes sont déposées sur une table vibrante pour enlever la terre, puis lavées. Pour être orientées correctement, elles glissent contre une butée et sont ensuite déposées sur une table à rouleaux espacés pour la séparation par taille.
- Les trois méthodes de nettoyage sont combinées, les carottes glissent ensuite depuis la table vibrante par gravité dans le cylindre incliné pour être orientées puis passent sur la table à trous pour le tri.
- ...

2.4 Evaluation des solutions globales

Chacune des solutions évoquées ci-dessus peut être évaluée en fonction des critères de performance. C'est l'objet de la quatrième étape de la conception : l'évaluation des solutions globales. Pour ce faire, il incombe au concepteur de définir les critères de performance qu'il juge les plus appropriés en se basant sur le CDC. Dans le cas d'une trieuse, les critères suivants sont retenus :

- Capacité
- Qualité du tri
- Facilité d'utilisation
- Consommation énergétique
- Ergonomie

Il existe deux méthodes d'évaluation : la méthode relative ou absolue. La première vise à comparer la solution globale à une solution de référence, la seconde consiste à se baser sur les performances attendues et décrites dans le CDC. Il s'agit pour cette dernière de se baser sur une échelle indépendante des solutions retenues. Chacune de ses évaluations peut être réalisée de manière "simple" (un signe + ou -) ou par "intervalles" (un + correspond à une solution possédant, selon le critère, une valeur supérieure d'un intervalle). Le concepteur peut par exemple estimer qu'un système présentant une capacité de 1T/h en plus correspond à un intervalle d'une valeur supérieure. Dans l'évaluation relative "par intervalles" cette solution présentera un signe "+" par rapport à la solution de référence. Un exemple d'évaluation relative simple est donnée au Tableau 2 dans laquelle la méthode des tambours rotatifs et des fentes de tri est évaluée par rapport à la table à rouleaux rotatifs.

Tableau 2 – Classement relatif simple

Critère de performance / Moyen de classement	Tambour rotatif	Table à rouleaux rotatifs	Tables à fentes de tri
Capacité	+	0	-
Qualité du tri	+	0	-
Facilité d'utilisation	-	0	+
Consommation électrique	-	0	+
Ergonomie	+	0	-
Total	3+ et 2 -		2+ et 3-

Les quatre étapes parcourues ci-dessus sont d'une importance capitale pour la réussite de la fabrication. En effet, une idée mal définie résulte dans la plupart des cas dans la création d'un objet ne répondant pas aux objectifs initiaux. Les prochaines étapes consistent à détailler la solution retenue lors de l'évaluation relative simple (pré-dimensionnement et dessin d'ensemble du système), à réaliser des analyses complémentaires la concernant (ex. analyse de risque, analyse de cycle de vie,...) et finalement à créer un prototype du système. Puisque l'exemple de la trieuse de carottes sert d'introduction à la conception de machine, ces étapes de la conception, qui nécessitent des valeurs chiffrées, ne sont pas abordées dans cette section. Elles seront détaillées dans les paragraphes liés à la conception du SREC appliqué au vélo.

3 Cahier des charges du système à concevoir

Comme décrit dans la Section 2, le CDC permet de clarifier les principales fonctions auxquelles la machine doit répondre et détaille les exigences et contraintes de l'environnement dans lequel la machine se trouve. Il permet de poser le problème et de mettre tous les intervenants d'accord quant aux spécifications de la machine à concevoir. En écrivant le CDC, il est important de décrire les fonctions de manière assez abstraite afin de ne pas influencer et de ne pas guider le concepteur vers une solution prédéfinie. [Raucent, 2013]

L'objectif principal de ce document est de proposer un système purement mécanique qui, dans un premier temps, permet de récupérer et de stocker l'énergie cinétique qui est dissipée sous forme de chaleur lors du freinage sur un vélo, et qui, dans un second temps, la restitue pour assister le cycliste, ralenti ou à l'arrêt, lors du redémarrage. Les FP et les FC de même que leurs critères et niveaux sont repris dans le CDC se trouvant en Annexe A. Une partie de celui-ci est présentée dans le Tableau 3.

Tableau 3 – CDC partiel du SREC

Cahier des charges du Système de Récupération d'Énergie Cinétique (SREC) appliqué au vélo		
Contexte : Proposer un système/kit permettant de récupérer l'énergie dissipée pendant le freinage d'un vélo et de la restituer pour assister le cycliste lors du (re)démarrage.		
Date	Origine	
27/02	S. Malvaux	FONCTIONS PRINCIPALES FP 1 : Récupération de l'énergie cinétique. FP 2 : Stockage de l'énergie. FP 3 : Restitution de l'énergie stockée. FP 4 : Décharge/ dissipation lors du dernier parking.
27/02	S. Malvaux	CRITERES ET NIVEAUX DES FONCTIONS PRINCIPALES CP 1.1 Le cycliste est initialement en mouvement et freine. CP 1.2 L'enclenchement de la récupération de l'énergie se fait automatiquement dès que le cycliste freine. CP 1.3 La récupération se fait de manière instantanée. CP 1.4 La récupération a lieu au niveau moyeu/ roue/ système freinage. CP 1.5 La récupération est testée sur un circuit de référence. CP 1.6 Le système de récupération freine le vélo.
08/04		
23/03		CP 2.1 Le stockage se fait à l'aide d'un système mécanique CP 2.2 L'énergie est stockée en modifiant des pièces existantes ou en ajoutant des pièces nouvelles au vélo à un endroit qui doit être défini CP 2.3 Le temps de stockage est court (quelques secondes) lorsque le cycliste est en activité
		CP 3.1 La restitution se fait au moyen d'une traction ou propulsion (roue arrière ou avant) CP 3.2 La restitution est progressive. CP 3.3 La vitesse maximale de restitution est de 20 km/h.
		CP 4.1 Quand le cycliste arrête son activité, il doit y avoir dissipation (sous forme de chaleur) de l'énergie emmagasinée.

4 Design conceptuel

Dans cette section, les grandes étapes du design conceptuel sont appliquées au SREC. Elles sont détaillées une à une et permettent à l'aide de toute une série de documents et d'analyses de choisir judicieusement la solution globale qui sera développée. L'introduction aux quatre premières étapes du design conceptuel faisant l'objet de la Section 2 du présent travail, seul l'application de celles-ci au SREC est abordé dans cette section.

4.1 Analyse fonctionnelle

Comme évoqué précédemment, le système étudié dans le présent travail est purement mécanique. La machine présente de nombreuses fonctions techniques permettant de répondre aux multiples exigences du CDC ; cela en fait un système complexe composé de beaucoup de pièces. En effet, le système comprend quatre FP, chacune caractérisée par une série de FT. Ces dernières sont reprises dans le graphique des fonctions (Figure 6).

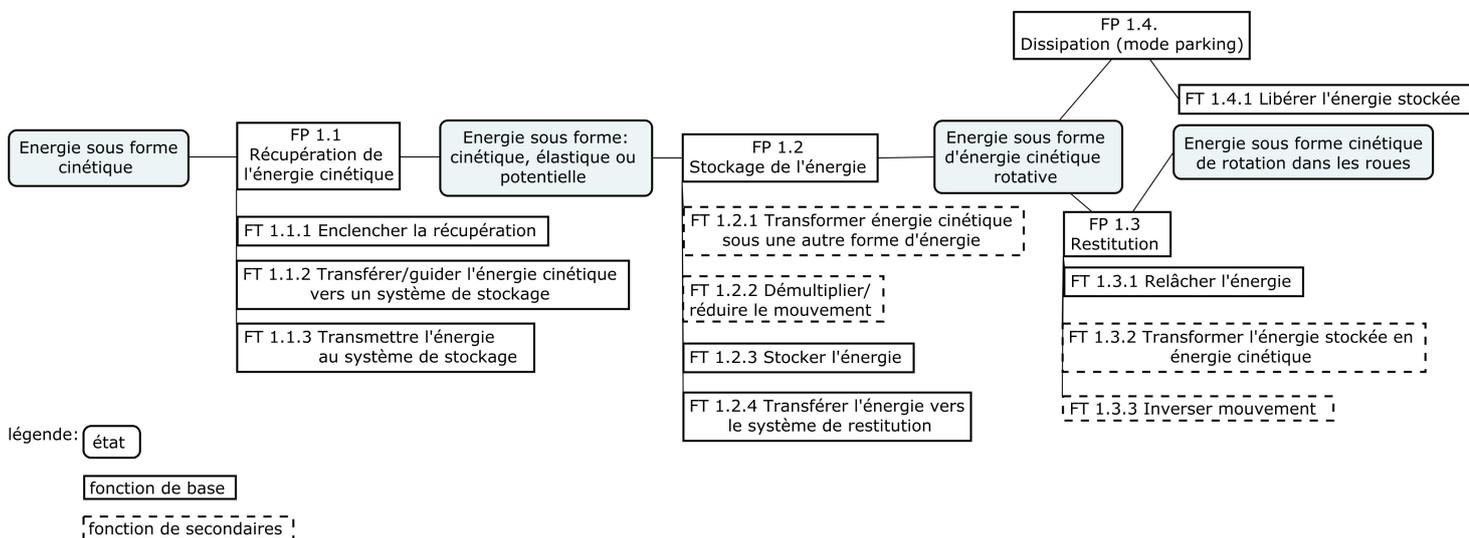


FIGURE 6 – Graphique des fonctions du SREC appliqué au vélo

Dans ce graphique les états sont reliés par des actions ou FP. Les fonctions secondaires sont des fonctions qui ne doivent pas forcément être réalisées pour le bon fonctionnement de la machine. Dans le cas de “l'inversion du mouvement” lors de la restitution, la technique de stockage déterminera si cette action est nécessaire pour assister le cycliste dans le sens de son avancement. En effet, dans certains cas, le mouvement devra être inversé lors de la restitution, sinon le cycliste sera assisté en marche arrière. La “démultiplication ou réduction du mouvement” est également une fonction liée au flux d'énergie qui est uniquement utilisée pour certains moyens de stockage et de restitution. Cette fonction secondaire permet entre autres de stocker de plus grandes quantités d'énergie et de restituer celles-ci progressivement.

4.2 Recherche de solutions

4.2.1 Brainstorming

Pour la partie créative du travail, deux séances de brainstorming sont organisées afin d'obtenir un maximum d'idées. Les groupes sont constitués de telle sorte qu'ils comprennent des femmes et des hommes ayant des professions différentes (kiné, ingénieur civil, médecin, bioingénieur, secrétaire, ...).

Les membres de l'équipe sont invités à réfléchir à la question suivante : "pourriez-vous imaginer un système mécanique permettant la récupération de l'énergie cinétique lors du freinage sur un vélo et penser à une manière de restituer cette énergie au cycliste?". Le premier tour de table permet à chaque membre d'exposer ses idées globales au groupe. L'animateur propose ensuite à ceux qui le souhaitent de reprendre les idées qui leur semblent les plus pertinentes et de suggérer des améliorations. De ce deuxième tour de table, il s'avère que la plupart des participants ont naturellement identifiés les FP et FT auxquelles le système doit répondre. Il incombe alors au médiateur de résumer les idées retenues, de hiérarchiser les fonctions techniques et de demander aux participants de réfléchir individuellement à chacune de celles-ci. Lors de cette deuxième réflexion individuelle, les idées les plus farfelues et difficilement réalisables (Figure 7(b)) sont écartées. Dans le cas présent, les participants détaillent leurs solutions pour les fonctions de stockage, d'enclenchement du système, de déclenchement et de dissipation lors de la phase de parking. Des exemples de propositions faites sont données à la Figure 7. Finalement, un dernier tour de table permet à chaque membre de présenter ses idées retravaillées et de suggérer des améliorations aux idées proposées par autrui.

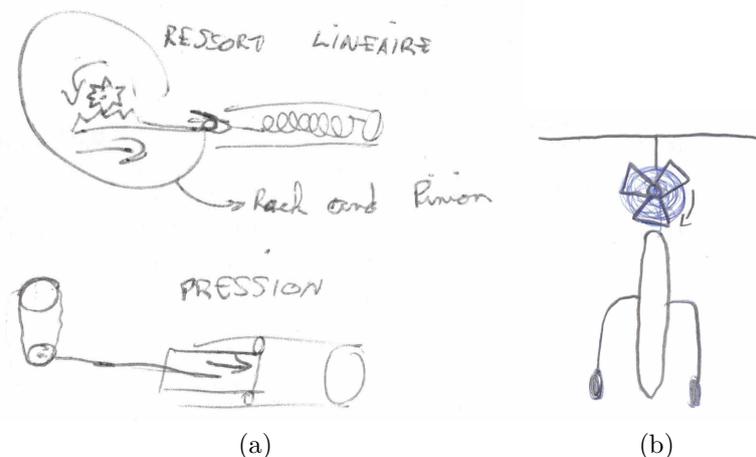


FIGURE 7 – Esquisses réalisées par les participants lors des séances de brainstorming : trois moyens de stockage (a), un vélo propulsé par une turbine (b)

4.2.2 Graphique morphologique

Sur base des idées évoquées lors du brainstorming, le concepteur associe à chaque FT, préalablement hiérarchisée, les solutions qui s'y rapportent. Pour chacune d'elles, jusqu'à six solutions sont imaginées. Elles sont reprises dans le graphique morphologique à la Figure 8.

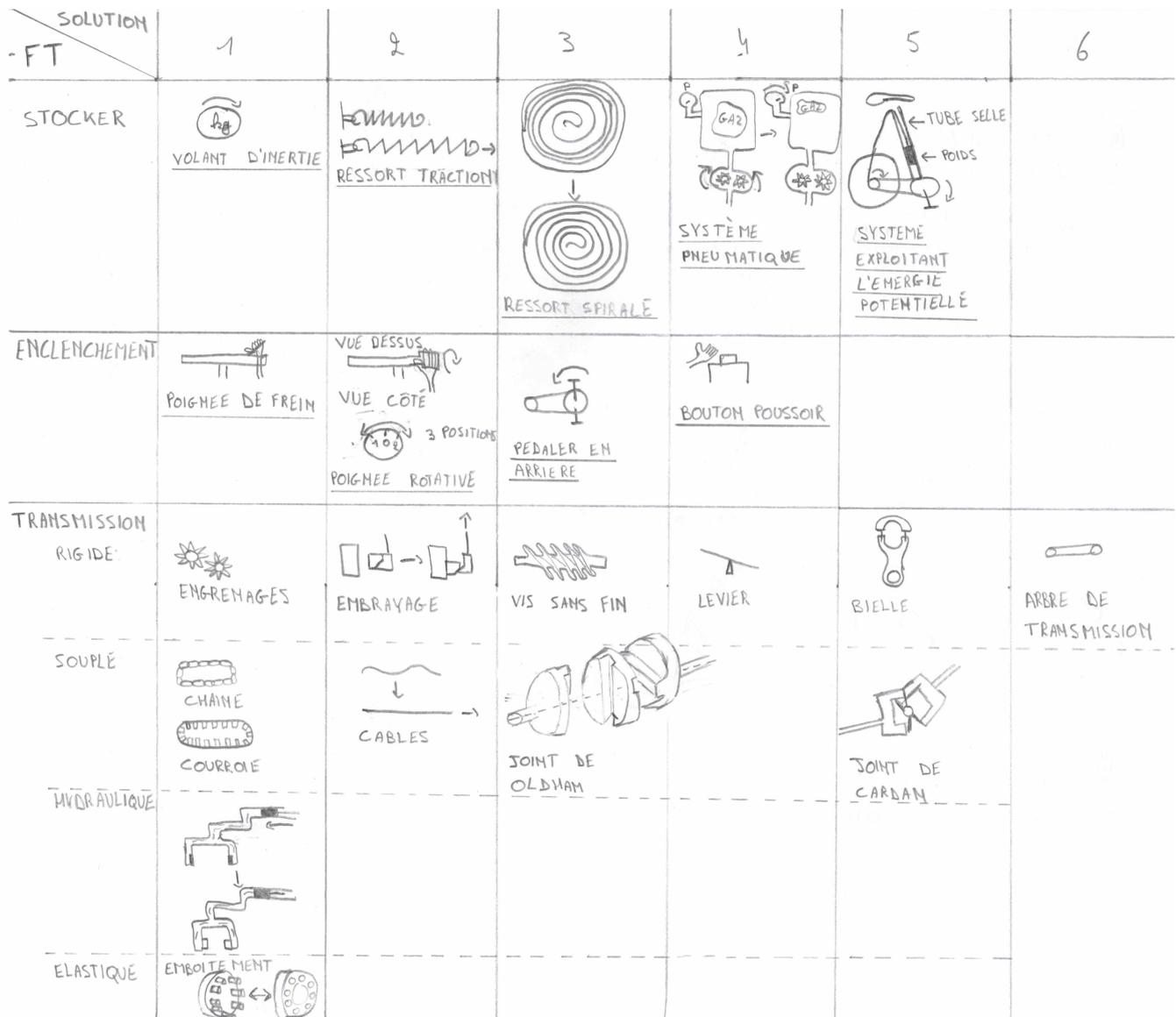


FIGURE 8 – Partie du graphique morphologique du SREC appliqué au vélo [1/2](suite voir Annexe A)

Pour se rapprocher de la solution finale, le concepteur combine une ou plusieurs solutions des FT obligatoires à la réalisation du système final imaginé.

4.2.3 Combinaison de solutions

Dans cette section les fonctions techniques, qui ont été décomposées dans le graphe morphologique, sont recombinaison pour trouver une solution globale répondant à la problématique. Le but de cette section est de donner un aperçu du système imaginé en décrivant son fonctionnement, sans entrer dans trop de détails techniques.

Dans le cas du SREC, le problème principal s'avère être le choix de la méthode de stockage de l'énergie. Les performances de la méthode retenue seront discriminantes pour la sélection du système à implémenter sur le vélo.

La combinaison des fonctions techniques peut donc facilement être distinguée en fonction de la méthode de stockage d'énergie. Cinq solutions pertinentes semblent se dégager du graphique des

fonctions. En effet, des systèmes de stockage à base d'un volant d'inertie, d'un ressort en spirale, d'un ressort linéaire, d'un système pneumatique et d'un système à énergie potentielle sont décrits et illustrés ci-dessous.

4.2.3.1 Volant d'inertie

Les volants d'inertie sont des systèmes de stockage d'énergie cinétique en rotation qui sont implémentés dans des voitures de course, des métros, . . . Ils sont constitués d'une masse (généralement cylindrique) qui est mise en rotation autour de son axe. Trois phases principales sont à distinguer pour comprendre leur fonctionnement : la phase de stockage, la phase neutre et la phase de restitution.

Le fonctionnement peut facilement être illustré en utilisant l'exemple d'un volant d'inertie implémenté sur une Formule 1. Dans un premier temps, la masse est mise en mouvement grâce à la récupération de l'énergie cinétique du véhicule qui freine. Durant la phase de freinage, le volant emmagasine l'énergie sous forme d'énergie cinétique de rotation (phase de stockage). Si le véhicule s'arrête, l'énergie est temporairement stockée dans la masse tournante (phase neutre). Lorsque le pilote décide de redémarrer, ou que la phase de freinage est terminée (ex. à la sortie d'un tournant), l'énergie est restituée à un axe moteur (phase restitution) pour accélérer le véhicule.

Dans ce type de système on observe que, pour un volant de masse donnée, plus la vitesse de rotation est élevée, plus la quantité d'énergie qui peut être stockée et restituée est importante : l'énergie stockée est une fonction quadratique de la vitesse. Il est donc important d'utiliser un système de démultiplication du mouvement (ex. un train épicycloïdal) si le système est implémenté sur un vélo. Ce train d'engrenages est constitué d'un engrenage central à denture extérieure (le planétaire ou le soleil), d'un grand engrenage à denture intérieure (la couronne) et d'une série d'engrenages (les satellites) situés entre ceux-ci et tournant en trajectoire épicycloïdale autour du planétaire (Figure 9). Les grands avantages de l'utilisation d'une telle transmission mécanique sur un vélo sont sa compacité et son important rapport de démultiplication.

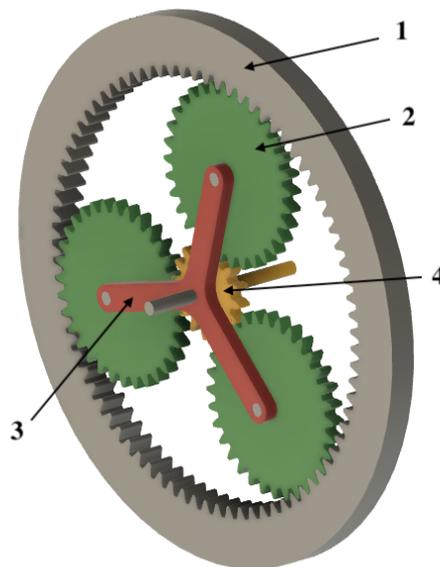


FIGURE 9 – Train épicycloïdal [1. Couronne ; 2. Satellite ; 3. Porte-satellites ; 4. Planétaire ou Soleil]

Le système de stockage imaginé (Figure 10) est entièrement situé dans la roue arrière. Le volant d'inertie est monté sur l'axe du planétaire et la couronne est fixée sur la partie interne de

la jante. Entre ces deux engrenages se situent les satellites, reliés entre eux par un porte-satellites. Le mouvement de celui-ci peut être synchronisé avec la roue libre sur laquelle se trouve la cassette du vélo au moyen d'un embrayage à crabots.

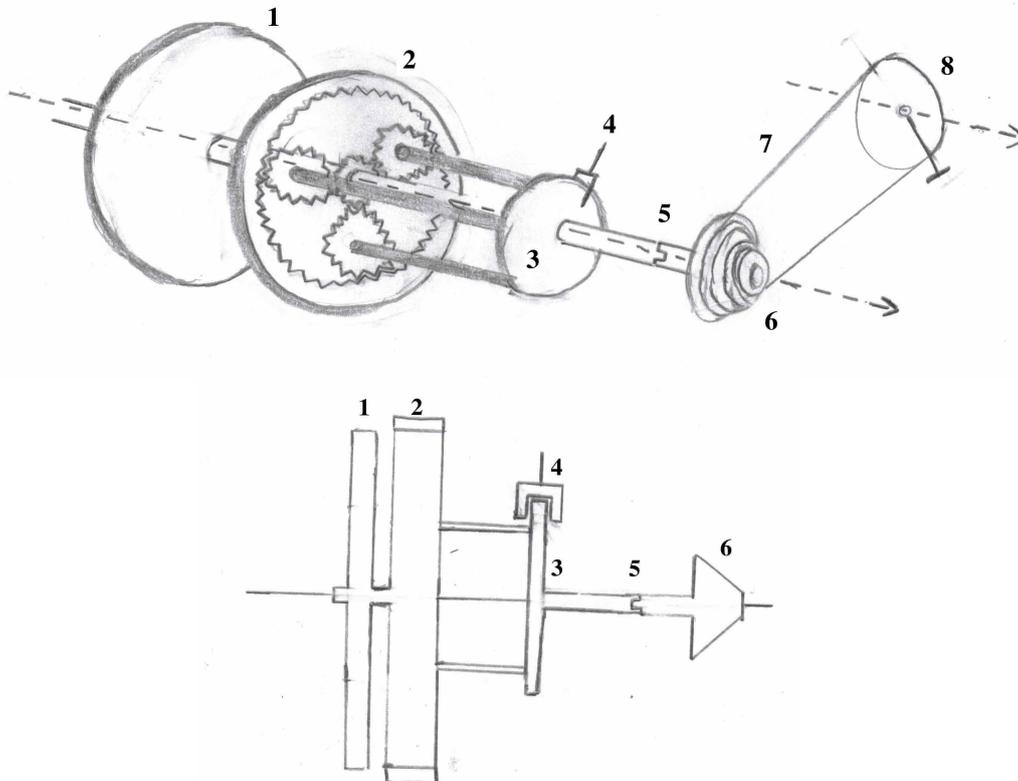


FIGURE 10 – Esquisses du système de stockage à base d'un **volant d'inertie** [1. Volant d'inertie; 2. Couronne; 3. Porte-satellites; 4. Frein; 5. Embrayage à crabots; 6. Cassette de vitesse de la roue motrice arrière; 7. Chaîne; 8. Plateau avec pédalier]

Le système comprend trois grandes phases : la phase de stockage, la phase neutre et la phase de restitution.

Lorsque le cycliste freine, le porte-satellites se bloque, ce qui force les satellites à tourner sur leur axe. Cette rotation entraîne le pignon planétaire sur lequel est monté le volant d'inertie dans le sens opposé à la rotation de la couronne.

En relâchant le levier de frein, le système se positionne en phase neutre. Dans cette position le mouvement du porte-satellites n'est plus bloqué; les satellites peuvent donc tourner autour de leur axe et autour du planétaire. Pendant cette phase temporaire, la masse en mouvement stocke l'énergie. En phase neutre une partie de l'énergie stockée est perdue à cause des forces de frottement. Ces pertes sont cependant minimales puisque le temps passé en phase neutre est limité.

Un système d'embrayage permet de mettre le porte-satellites en contact avec la cassette de vitesse du vélo. En redémarrant, le cycliste applique une force sur le pédalier entraînant la chaîne permettant la rotation des cassettes, et donc du porte-satellites. Cette rotation entraîne le mouvement de la jante puisqu'elle est fixée de manière unie à la couronne. L'accélération de la roue est assistée par un couple fourni par le volant d'inertie au moyen du pignon planétaire. De cette manière le système aide le cycliste lors de son redémarrage jusqu'à ce que le volant ait libéré toute l'énergie cinétique (arrêt complet). Afin d'éviter une rotation en sens inverse du volant après la phase de décélération, il est placé sur une roue libre.

4.2.3.2 Ressort en spirale

Les systèmes comprenant un ressort en spirale comme moyen de stockage, sont montés dans la roue avant du vélo. Pour ce genre de systèmes, la roue avant est retenue car elle possède moins d'éléments contraignants (cassettes de vitesses, dérailleur,...) que la roue arrière. De plus, ce choix évite la surcharge de la roue arrière et est moins coûteux pour un utilisateur désireux d'installer le SREC sur un vélo existant (seule la roue avant doit être changée).

Le ressort est placé dans un boîtier circulaire. Un train d'engrenages permet la transmission entre le moyeu de la roue et le ressort. En effet, une extension située sur l'extrémité centrale du ressort permet la transmission du mouvement des engrenages au ressort et donc l'enroulement du ressort. Les trains d'engrenages faisant la liaison sont imaginés sous deux formes. Le premier système fait appel à un train d'engrenages simple alors que le second est constitué d'un train épicycloïdal.

Fonctionnement système 1 :

Dans un premier système (Figure 11), deux engrenages sont utilisés : l'engrenage 1 est situé sur le moyeu de la roue et suit le mouvement de celle-ci, l'engrenage 2 permet la liaison entre l'engrenage 1 et le ressort.

Lors de la phase de stockage, l'engrenage 2 est mis en contact avec l'extension du ressort au moyen d'un système d'embrayage à crabots. Le contact permet de récupérer l'énergie cinétique de la roue du vélo en enroulant le ressort dans le boîtier (maintenu immobile). Un système de roue à rochet et cliquet installé sur l'extension du ressort évite la détente non souhaitée du ressort en sens inverse (qui aurait pour conséquence de faire reculer le cycliste).

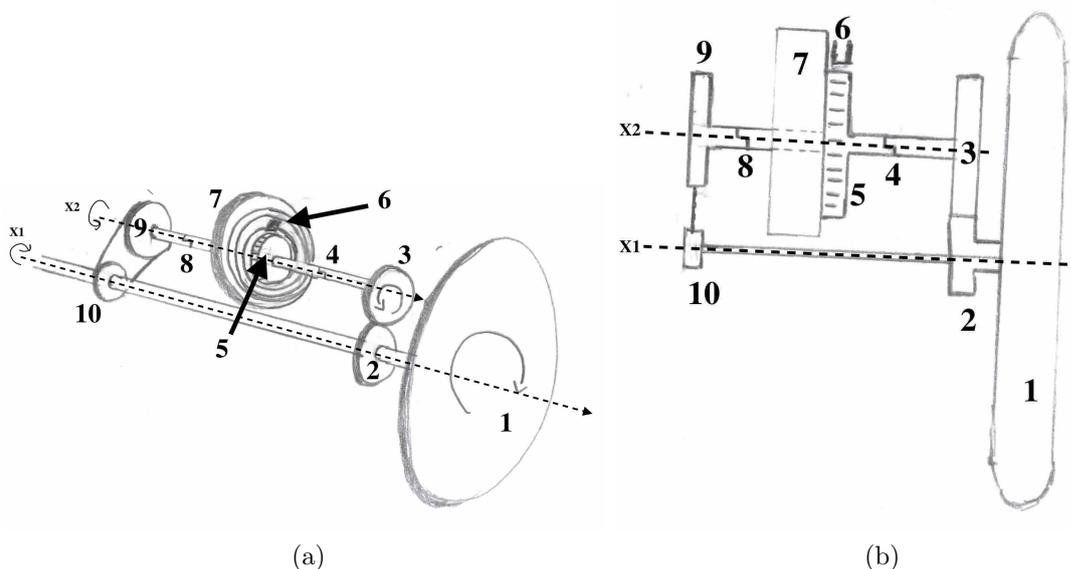


FIGURE 11 – Esquisses du système 1 de stockage à base d'un **ressort en spirale avec train d'engrenages classique** [1. Roue ; 2. Engrenage 1 ; 3. Engrenage 2 ; 4. Embrayage ; 5. Extension permettant la mise sous tension du ressort ; 6. Cliquet ; 7. Boîtier du ressort ; 8. Embrayage ; 9. Pignon 2 ; 10. Pignon 1]

En phase neutre, l'engrenage 2 est désengagé et le ressort reste enroulé.

Etant donné qu'en restituant l'énergie, le ressort va se détendre en sens inverse par rapport au sens de conservation de l'énergie, une restitution par courroie est envisagée. Lors de la phase de

restitution deux actions doivent être réalisées simultanément ; le rochet, qui retient le boîtier du ressort en phase de stockage, est relâché et l'axe, sur lequel se trouve le pignon 2, est couplé avec le moyeu de la roue au moyen d'un embrayage à crabots.

La courroie peut maintenant transmettre l'énergie, stockée sous forme d'énergie élastique dans le ressort en spirale, au moyeu de la roue. Lorsque toute l'énergie est restituée, le boîtier est à nouveau bloqué, le pignon 2 découplé et le système placé en position "neutre".

Fonctionnement système 2 :

Le second système (Figure 12) est différent du premier car il utilise un train épicycloïdal comme train d'engrenages. Le planétaire est solidaire au moyeu de la roue et le porte-satellites est constitué d'un embout particulier permettant l'enroulement du ressort dans son boîtier. La couronne est libre et peut être bloquée grâce au frein avant du vélo.

En freinant, le cycliste ralentit la couronne, enclenchant ainsi le stockage. En effet, lorsque la couronne est immobile et que le planétaire tourne, les satellites sont forcés de tourner sur eux-mêmes et autour du planétaire pour satisfaire aux conditions de vitesses entre les engrenages. Le porte-satellites par son mouvement de rotation permet le bandage du ressort. De même que pour le système 1, le ressort reste bandé grâce à une roue à rochet, cette fois installée sur l'axe du porte-satellites. Au point "neutre" le ressort est bandé et le boîtier reste bloqué. Lorsque le cycliste décide de redémarrer, le rochet retenant le boîtier est relâché et un système d'embrayage est activé permettant au boîtier de transmettre le mouvement dans le bon sens à la roue.

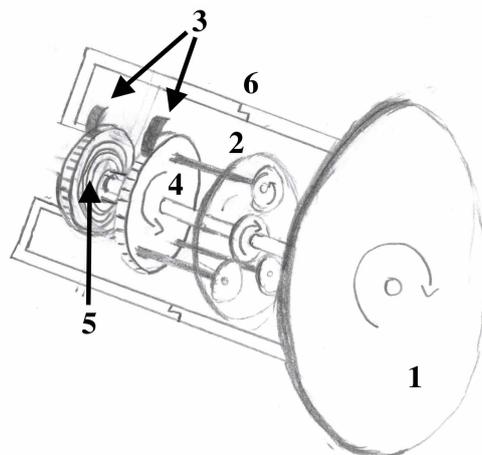


FIGURE 12 – Esquisse du système de stockage à base d'un **ressort en spirale et d'un train épicycloïdal** [1. Roue ; 2. Train épicycloïdal ; 3. Cliquet sur roue à rochet ; 4. Porte-satellites ; 5 Boîtier du ressort ; 6. Embrayage

Comparé au premier système, le second a l'avantage d'être moins encombrant. En effet, celui-ci est capable de stocker la même quantité d'énergie pour un poids inférieur. Il est important de noter que les systèmes mentionnés ci-dessus permettent de ralentir le cycliste lors du freinage, mais ne peuvent en aucun cas servir de substitut au système de freinage existant. Dans tous les cas décrits dans cette section, un système de freinage traditionnel sur jante doit être monté en parallèle du SREC.

4.2.3.3 Ressort linéaire

La solution globale imaginée avec un ressort linéaire comprend un ressort de traction. Différents emplacements sont envisageables pour celui-ci : un tube peut être utilisé pour guider le ressort soit le long la partie inférieure de la jante , soit à l’intérieur du tube oblique du cadre, soit dans le tube de selle, ... Pour la mise sous tension du ressort lors de la phase de stockage, deux systèmes sont envisagés. Le premier utilise une crémaillère pour bander le ressort et le second une bobine munie d’une roue à rochet.

Fonctionnement système 1 :

La crémaillère est reliée au moyen d’un câble au ressort qui coulisse dans un guide (ex. le tube de selle). Lors de la phase de stockage, un levier permet le redressement de la crémaillère pour assurer le contact avec un pignon présent sur le moyeu de la roue. Cette liaison permet de transformer le mouvement rotatif du pignon en mouvement linéaire de la crémaillère, assurant la mise sous tension du ressort. Le rail empêche le mouvement en sens inverse de la crémaillère. En phase “neutre” le levier descend la crémaillère, rompant ainsi le contact direct avec le pignon. La crémaillère maintient le ressort tendu (Figure 13).

Quand le cycliste souhaite restituer l’énergie au vélo, il déclenche l’assistance au moyen d’un système hydraulique sur le guidon. Dans un premier temps, un engrenage vient se glisser entre la crémaillère et le pignon de la roue pour inverser le mouvement. Pour faciliter l’insertion, l’engrenage glisse dans une rainure diagonale découpée dans les parties qui le supportent. En glissant, l’engrenage désactive le système de blocage de la crémaillère dans son rail. La force de rappel du ressort entraîne alors la crémaillère et transmet un couple au pignon de la roue.

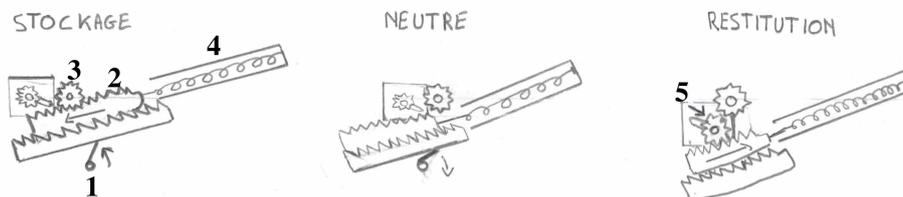


FIGURE 13 – Phases de fonctionnement d’une solution globale à base d’un **ressort de traction et d’une crémaillère** [1. Levier ; 2. Crémaillère ; 3. Pignon sur le moyeu de la roue ; 4. Ressort dans guide ; 5. Engrenage de restitution]

Fonctionnement du système 2 :

Le second système est semblable au système 1 du ressort en spirale (Figure 11) : il comprend deux axes parallèles et le même système de transmission pour la phase de charge. Le premier axe correspond au moyeu de la roue. Le second supporte une bobine sur laquelle s’enroule le câble qui met le ressort sous tension (Figure 14).

Pour stocker l’énergie, le cycliste embraye à l’aide d’un système à tiroirs hydrauliques qu’il enclenche depuis son guidon. L’embrayage connecte l’axe 1 à l’axe 2 au moyen de deux engrenages. Puisque la bobine est fixée à l’axe 2, la rotation de cette dernière permet la mise sous tension du ressort. Des cliquets bloquent la bobine et maintiennent le ressort tendu depuis la phase de stockage jusqu’à la restitution.

En phase neutre, l’embrayage se situe entre l’engrenage de la partie “stockage” et le pignon de la partie “restitution”. Le ressort est bandé. Pour restituer l’énergie au pédalier, deux actions doivent être menées en même temps : l’embrayage doit être couplé avec le pignon de restitution et

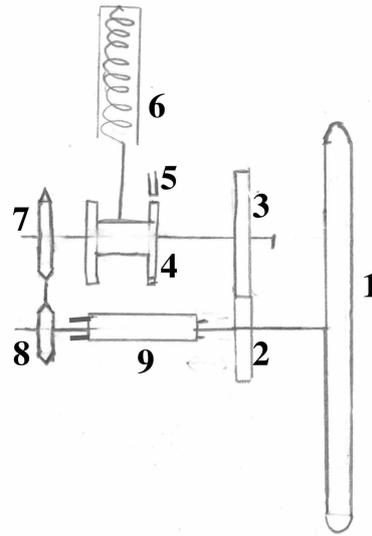


FIGURE 14 – Esquisse d'un SREC à base d'un **ressort de traction et d'une bobine** [1. Roue; 2. Engrenage sur l'axe 1; 3. Engrenage sur axe 2; 4. Bobine; 5. Cliquet; 6. Ressort dans guide; 7. Pignon 1; 8. Pignon 2; 9. Embrayage sur glissière]

le cliquet doit être redressé pour libérer la bobine. La partie “restitution” de la Figure 14 comprend deux pignons entre lesquels une chaîne permet la transmission du mouvement.

4.2.3.4 Système pneumatique

Le SREC constitué d'un stockage pneumatique fait intervenir un réservoir dans lequel un gaz est mis sous pression. Pour répondre aux contraintes ergonomiques, le réservoir peut être imaginé sur plusieurs pièces de vélo existantes. En effet, le gaz peut être mis sous pression dans le cadre du vélo (Figure 15) ou dans la roue. Si la seconde option est choisie, la roue doit être modifiée : une coque lenticulaire résistant à la pression interne doit être installée.

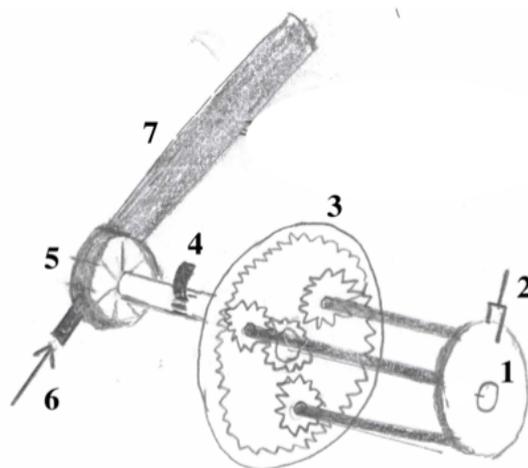


FIGURE 15 – Esquisse d'un SREC à **stockage pneumatique** [1. Porte-satellites; 2. Frein; 3. Couronne; 4. Cliquet sur axe planétaire; 5. Moteur bidirectionnel à palettes; 6. Entrée d'air; 7. Cadre du vélo (Réservoir)]

Le composant principal du système est un moteur à air bidirectionnel (Figure 16). En phase

de stockage, il comprime l'air dans le réservoir et en phase de restitution, le gradient de pression entraîne l'axe moteur, restituant de cette manière l'énergie au vélo. Puisque les moteurs à air nécessitent des vitesses de rotation élevées, l'arbre mécanique du moteur est fixé sur le planétaire d'un train épicycloïdal. En fonction de la démultiplication nécessaire pour faire fonctionner le système, la couronne est soit fixée au moyeu, soit sur la partie interne de la jante. De la même manière que le système comprenant un volant d'inertie, le porte-satellites se bloque lorsque le cycliste freine. Cette action entraîne la rotation du planétaire, qui est solidaire à l'axe moteur, à une vitesse élevée. L'axe moteur tourne dans ce cas en sens inverse par rapport à la rotation de la roue et permet la mise sous pression de l'air présente dans le réservoir.

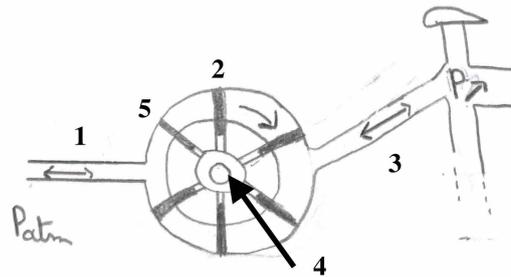


FIGURE 16 – Coupe d'un moteur à palettes [1. Entrée/sortie d'air du compresseur/moteur à pression atmosphérique ; 2. Palette ; 3. Sortie/entrée du compresseur/ moteur ; 4. Arbre moteur ; 5. Moteur bidirectionnel

Lorsque le vélo est à l'arrêt ou que le cycliste relâche le frein, le système entre en phase "neutre" et le planétaire se bloque.

Si le cycliste souhaite une assistance lors du redémarrage, il lui suffit de déclencher la manette de restitution qui réalise deux actions simultanées : le porte-satellites est ralenti ou bloqué complètement et le pignon planétaire est relâché. En libérant celui-ci, le gradient de pression entraîne l'air depuis le réservoir (pression élevée) vers l'extérieur (pression atmosphérique) faisant tourner le "compresseur" de la phase de stockage en sens inverse, donc comme moteur à air. Ce dernier tourne dans le même sens qu'avant et transforme l'énergie stockée sous forme pneumatique en énergie cinétique de rotation transmise à l'aide du train épicycloïdal à la roue.

Il est intéressant de noter qu'en fonction de la force de freinage appliquée par le cycliste sur le porte-satellites (phase de stockage et restitution), la démultiplication de vitesse sera plus ou moins importante. En effet, si le porte-satellites est tout à fait bloqué, la démultiplication est maximale. À l'inverse, un freinage léger ne permettra qu'une faible démultiplication. Cette fonction permet au cycliste d'avoir un contrôle sur le stockage et la restitution de l'énergie.

4.2.3.5 Système à énergie potentielle

Le système utilisant l'énergie potentielle pour le stockage est la solution la plus "basique" qui a été retenue. Comme le montre la Figure 17, le tube de selle sert de guide à une masse cylindrique qui peut être montée et descendue au moyen d'un câble qui s'embobine sur un axe parallèle au moyeu de la roue (avant ou arrière).

Lors du freinage, un embrayage permet l'entraînement de l'axe 2 par l'axe 1 au moyen de deux engrenages. L'engrenage sur l'axe 1 est solidaire de celui-ci alors que l'engrenage sur l'axe 2 se trouve sur des roulements. Pendant toute la phase de freinage la masse est montée dans le tube de selle.

Quand le cycliste arrête de freiner, la masse se bloque en hauteur et l'embrayage retourne en position neutre à l'aide de ressorts de rappel.

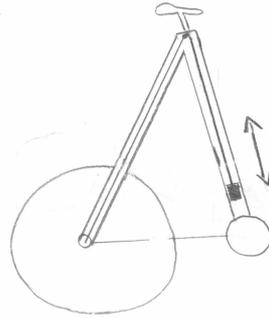


FIGURE 17 – SREC exploitant l'énergie potentielle

L'énergie potentielle peut maintenant être restituée grâce à la “courroie de restitution” (cf. système 2 du ressort linéaire). Pour ce faire le pignon de restitution est couplé à l'axe 1 avant que la masse ne soit relâchée. En chutant, l'énergie potentielle de la masse est transformée en énergie cinétique de rotation transmise au moyeu de la roue. Une fois que la masse atteint son point le plus bas, l'embrayage repasse automatiquement en position neutre, évitant de cette manière que le câble soit entraîné en sens inverse et que la masse soit remontée dans le tube par la force de pédalage du cycliste.

4.3 Évaluation des solutions de stockage

Sur base des solutions globales décrites ci-dessus, une analyse plus détaillée et chiffrée des différents systèmes de stockage est présentée dans cette section. Le but est d'évaluer la pertinence des solutions globales retenues sur base des critères de performance pour, in fine, ne retenir qu'une seule solution de stockage à développer. Le choix de cette solution unique est réalisé à la suite de l'évaluation absolue simple qui permet la comparaison des systèmes entre eux.

4.3.1 Détermination des critères de performance

Sur base des fonctions décrites dans le CDC, sept critères de performances sont retenus pour l'évaluation de chacune des solutions envisagées.

Le premier critère concerne **l'énergie que le système doit être capable de stocker** (capacité énergétique) s'il est implémenté sur le vélo. Deux possibilités s'offrent au concepteur pour déterminer cette valeur. La première compare les SREC sur base de l'énergie maximale qu'ils peuvent emmagasiner s'ils sont installés sur un vélo. Cette valeur est définie par les contraintes techniques d'installation (taille, poids,...). La seconde manière de procéder est de comparer les capacités énergétique des SREC sur base d'un circuit préalablement défini. Dans le présent travail, la seconde méthode est choisie. Un système capable de stocker jusqu'à $1500 J$ est considéré satisfaisant. Cette valeur correspond à l'énergie cinétique que possède un cycliste de 100kg (vélo inclus) lorsqu'il descend une partie de la Rue de Pinchart (Limelette). Le tronçon possède une pente 10% ($5,71^\circ$) sur $15,5 m$. Cette route se prête bien à la comparaison des différents SREC car elle est suivie d'une partie plane et d'une montée durant laquelle le système peut assister le cycliste.

Un des critères les plus importants, lorsqu'il s'agit du stockage d'énergie, est la quantité de l'énergie que le système peut restituer, cette quantité est déterminé par son **rendement**. En effet, il est important que le machine conçue puisse restituer un maximum de l'énergie qui lui a été fournie. En se basant sur le rendement des systèmes de stockages d'énergie électriques (Figure 18), un rendement de 70% pour la solution globale semble satisfaisant.

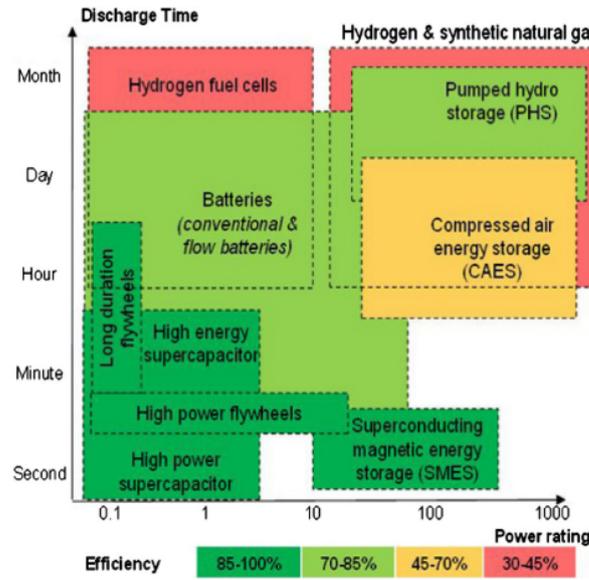


FIGURE 18 – Comparaison des systèmes électriques de stockage d’énergie en fonction du temps de décharge et de la puissance nominale [Aneke and Wang, 2016]

Lorsqu’on implémente un système de récupération mécanique sur un vélo, le **poids** du système joue un rôle déterminant. En effet, le système de récupération, qui a pour but d’assister le cycliste, ne doit pas devenir une contrainte pour l’usager. Le concepteur a dès lors décidé de limiter le poids de l’invention à 3 *kg*. Cette valeur correspond à une augmentation de 18 à 33% du poids du vélo (cf. FC “type de vélo” dans le CDC). Pour les systèmes non-stationnaires de stockage, il est intéressant d’analyser leur positionnement sur un Diagramme de Ragone (Figure 19). Il compare les techniques de stockage sur base de leur densité énergétique [$\frac{J}{Kg}$] et de leur puissance massique [$\frac{W}{Kg}$]. Les deux axes sont en échelle logarithmique, ce qui permet de comparer un grand nombre de moyens de stockage. Les systèmes les plus flexibles et performants sont ceux situés dans le coin supérieur droit du graphique [da Rosa, 2009, Alami, 2020]. La Figure 19 justifie la place importante que prennent les moteurs à combustion et les turbines à gaz dans la société actuelle. En effet, ces systèmes sont capables de libérer une grande quantité d’énergie à puissance élevée, et ce en un temps limité. La place des volants d’inertie sur ce graphe montre leur potentiel en terme de moyen de stockage à court terme (stockage/déstockage court). Dans certaines applications, ils semblent pouvoir concurrencer les systèmes de stockage chimiques les plus efficaces [Alami, 2020].

La **simplicité du SREC** est un critère essentiel de performance, il tient compte du nombre de pièces du système, de la difficulté du montage et de l’entretien de celui-ci. Le système le plus facile à monter et à entretenir est retenu.

Un critère de **facilité d’utilisation** a également été sélectionné. Les phases de stockage et de restitution doivent être faciles à enclencher : un système intuitif est favorisé.

L’utilisateur doit pouvoir utiliser le système en toute **sécurité**. Comme décrit dans le CDC les pièces chaudes et les pièces tournantes doivent être inaccessibles lors du fonctionnement et accessibles à l’arrêt pour l’entretien.

Finalement, le **prix de production** de la machine est fixé à 300 €. Ce prix est donné à titre indicatif. En effet, le prix d’un premier prototype peut être élevés, mais celui-ci diminue lors du passage à l’échelle industrielle.

Le choix des sept critères est réalisé par le concepteur. Même s’ils sont déterminés sur base du CDC, ils restent subjectifs.

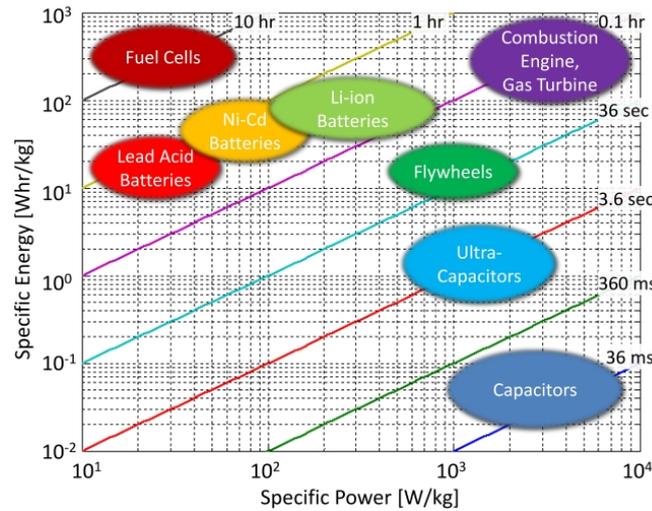


FIGURE 19 – Diagramme de Ragone pour les systèmes de stockage les plus communs [Moura et al., 2010]

4.3.1.1 Volant d'inertie

Le volant d'inertie imaginé est un cylindre en acier dont les caractéristiques sont reprises au Tableau 4.

Tableau 4 – Caractéristiques du volant d'inertie

Caractéristiques matériel	Symbole	Valeur	Unité
Masse	m	3	kg
Rayon extérieur	R_{ext}	0,3	m
Rayon intérieur	R_{in}	0,29	m
Densité	ρ	7850	$\frac{kg}{m^3}$

L'énergie cinétique (E) d'un cylindre creux en rotation est donnée par la formule suivante :

$$E = \frac{1}{2} I \omega^2 \quad (1)$$

avec ω la vitesse angulaire et I le moment d'inertie qui vaut :

$$I = \frac{1}{2} m (R_{ext}^2 + R_{in}^2) \quad (2)$$

Dans le cas présent, cela donne un moment d'inertie de $0,26 \text{ kgm}^2$. Pour la détermination de la vitesse angulaire, on suppose un cycliste amateur qui pédale à une fréquence de pédalage de $70 \frac{T}{min}$ avec un braquet de trois. Le braquet est le rapport entre le nombre de dents que compte le plateau et le nombre de dents du pignon de vitesse sur lesquels se trouve la chaîne. La vitesse de rotation de la roue est donc de $210 \frac{T}{min}$, soit $22 \frac{rad}{s}$.

En insérant les valeurs de I et de ω dans la Formule (1), l'énergie cinétique de rotation que le système peut stocker vaut : $E = 62,92J$. Or, pour répondre au critère de performance concernant la capacité énergétique (cf Section 3), le volant doit pouvoir stocker $1500 J$ soit une quantité d'énergie 23,84 fois plus grande.

Pour répondre à cette demande la vitesse de rotation du volant peut être calculée à l'aide de l'équation (1) et vaut $\omega_{volant} = 107,41 \frac{rad}{s}$. Ceci signifie que le volant doit avoir une vitesse

cinq fois supérieure à celle de la roue. Une telle démultiplication peut être fournie par une suite d'engrenages ou un train épicycloïdal. Cette dernière solution semble être la plus pertinente car le train épicycloïdal est alors le seul élément intermédiaire de transmission, ce qui réduit les pertes d'énergies.

Le rendement du volant d'inertie est fortement dépendant du temps de stockage nécessaire [Amiryar and Pullen, 2017, Beltramin, 2018]. En effet, les petits volants d'inertie présentent des rendements allant de 70 à 95% [Bakay, 2012, Sabihuddin et al., 2015] pour des temps de stockage de l'ordre de la seconde à la minute. Les rendements des autres composants du système valent respectivement 97%, 98% et 98% pour le train épicycloïdal, le contact des plaquettes de frein sur le disque et le contact entre les crabots. Ce qui donne un rendement approximatif de 74,5% pour la totalité du système (en prenant $\eta = 80\%$ pour le volant d'inertie).

L'inconvénient majeur du volant d'inertie est son poids de 3kg. En effet, ces systèmes de stockage présentent une faible densité d'énergie comparé à d'autres systèmes de stockage comme les batteries [IRENA, 2017]. Au poids du volant, il faut ajouter le poids des fixations, du train épicycloïdal et des protections permettant de protéger l'utilisateur de la masse tournante. La totalité du système pèse plus de 3kg et ne permet pas de répondre au critère de performance lié au poids.

La mise en place, le montage et l'entretien sont complexes si tout le système est situé à l'intérieur de la roue. En effet, le système compte un certain nombre de composants (système de roue libre, embrayage à crabots, train épicycloïdal et volant d'inertie) que le concepteur doit tâcher de bien organiser pour rendre le système le plus ergonomique possible.

Le dispositif à volant d'inertie présente l'avantage d'être facile d'utilisation. Le seul changement par rapport à un vélo de ville classique est la phase de restitution qui nécessite l'activation de l'embrayage par l'utilisateur.

Finalement, un des freins pour le développement du volant d'inertie sur un vélo est lié à la sécurité. Une masse qui est en rotation autour d'un axe est soumise à l'effet gyroscopique. Cet effet peut être défini comme la "tendance qu'a tout corps lourd, en rotation rapide autour d'un axe (roue, volant de moteur, etc.), à s'opposer à tout effort visant à modifier la direction de son axe de rotation." [Larousse, 2020]. Ce phénomène peut être calculé au moyen de la formule suivante :

$$\Omega = I\omega \quad (3)$$

Puisque le système à concevoir doit pouvoir tourner à une vitesse de $107 \frac{rad}{s}$ et qu'il possède une inertie de $0,26 \text{ kgm}^2$, le moment angulaire du volant en rotation autour de son axe vaut $27,82 \text{ kg} \frac{m^2}{s}$. Le couple de roulis (C) correspondant au couple nécessaire pour incliner la masse d'un angle x en un temps t , est donné par :

$$C = \omega\alpha \quad (4)$$

avec α la vitesse de mise sur angle. Pour incliner le volant de 30° en une seconde, un couple de roulis de $13,7 \text{ Nm}$ est nécessaire. A titre comparatif, un cycliste qui roule à $20 \frac{km}{h}$ sur un vélo possédant des roues de 300 mm est déjà soumis à un effet gyroscopique de $1,7 \text{ kg} \frac{m^2}{s}$. Pour incliner son vélo de 30° en 1 seconde, le cycliste doit fournir un couple de roulis de $0,85 \text{ Nm}$. La valeur de $13,7 \text{ Nm}$ montre qu'un vélo muni d'un volant d'inertie demandera plus de force de la part du cycliste pour le changement de direction. Même si elle présente une augmentation significative du couple à fournir pour incliner le vélo, cette valeur reste acceptable. Elle devient cependant problématique si un volant possédant un moment d'inertie plus important est utilisé. Pour cette raison, l'utilisation de volants d'inertie pour des applications non-stationnaires se fait généralement sur des machines guidés sur des rails [Ahmed et al., 2007].

Finalement, la conception d'un tel système ne requiert pas de composants trop onéreux. Une fois conçu, le prix du système ne devrait pas dépasser les 300€.

4.3.1.2 Ressort en spirale

Le ressort en spirale choisi pour cette application est un ressort possédant une distance constante entre les spires lorsque celui-ci n'est pas chargé. Ces ressorts possèdent en effet la plus grande densité d'énergie parmi les différents types de ressorts en spirale [Munoz-Guijosa et al., 2019]. Pour ce genre de ressorts, la raideur en torsion (K) est donnée par :

$$K = \frac{EI\alpha}{57,3^\circ l_s} = \frac{Ebt^3\alpha}{690^\circ l_s} \quad (5)$$

où E est le module d'élasticité (module de Young) du matériau, α la déviation angulaire, l_s la longueur, b la largeur et t l'épaisseur du ressort.

En respectant les contraintes exprimées dans le CDC, le concepteur doit essayer d'obtenir un ressort permettant d'emmagasiner une quantité d'énergie de 1500 J . L'épaisseur et la largeur du ressort en acier (caractéristiques en Annexe C) imaginé, sont fixées respectivement à 3,5 mm et 21 mm. Supposons qu'un cycliste exerce une force de 75 N sur ses pédales. Le couple transmis au pédalier (levier de 17cm) vaut 12,75 Nm . Si ce dernier utilise un braquet de 2.5, le couple transmis au pignon vaut 5,1 Nm . Dans le système imaginé, le planétaire est solidaire au moyeu de la roue, la couronne est bloquée en phase de stockage et le porte-satellites permet de charger le ressort, le couple transmis au ressort peut donc être calculé à l'aide du rapport de réduction. En effet, si celui-ci vaut 5, le couple transmis au ressort (C_r) est de 25 Nm . Cette valeur est fixée comme valeur maximale de charge du ressort.

La longueur du ressort peut maintenant être calculée en réarrangeant la Formule (5) en fixant l'angle de rotation maximum à 400°. Une longueur de 4,3 m est obtenue. La constante de raideur du ressort est obtenue par :

$$K = \frac{C_{rmax}}{\alpha_{max}} \quad (6)$$

et vaut 62,5 $\frac{Nm}{\circ}$.

Pour caractériser entièrement le ressort, les Formules 7 et 8 donnent respectivement le nombre de spires (n) et la distance (a) entre celles-ci :

$$n = \frac{l_s}{(R_2 + R_3)\pi} \quad (7)$$

$$a = \frac{(R_2 + R_3)}{n} - t \quad (8)$$

Afin de déterminer si ce système de stockage peut stocker 1500 J , la formule :

$$E = \frac{1}{2}K\alpha^2 \quad (9)$$

est utilisée. Elle caractérise la quantité d'énergie cinétique que le ressort peut emmagasiner. En isolant l'angle de rotation nécessaire au stockage de 1500 J et en le multipliant par la constante K , il découle qu'un couple de 13,68 Nm doit être appliqué au ressort. Ce dernier répond donc aux performances exigées en terme de stockage.

L'avantage principal du système proposé est son rendement intéressant, 90% selon [Hao et al., 2015]. De plus, l'utilisation d'un train épicycloïdal ($\eta=98\%$ selon [Raucent, 2013]) limite l'utilisation d'autres éléments de transmission. Des deux rendements précédents, seul le rendement du système d'embrayage à crabots doit être multiplié ($\eta=95\%$), ce qui donne un rendement total de 84%.

Les ressorts les plus communément utilisés à des fins de stockage sont faits d'acier. La masse volumique élevée de ce matériau en fait un système de stockage qui pèse plus que 3 kg . En effet,

le poids du ressort calculé ci-dessus est de 2.48 kg . A cela il faut ajouter le train épicycloïdal, le système d'accouplement et la structure de protection du ressort. Pour développer le système, le calcul du ressort le plus adéquat pour le stockage peut s'avérer complexe puisqu'un grand nombre de paramètres peuvent être modifiés en fonction des performances recherchées. Cependant, le montage pour le concepteur ainsi que pour l'utilisateur est aisé. Pour le premier, le système ne présente pas de composants complexes à mettre en place, pour le second, il suffit de changer la roue avant du vélo.

L'utilisation est rendue simple pour l'utilisateur et le système ne présente pas de danger particulier puisqu'il est protégé dans un boîtier.

La conception d'un prototype comportant un ressort fait sur mesure peut s'avérer onéreuse, cependant la mise à échelle industrielle devrait faire baisser le prix de vente sous les 300€ fixés dans le CDC.

4.3.1.3 Ressort linéaire

Pour le ressort linéaire, la contrainte principale est le débattement limité. La longueur maximale du ressort tendu est obtenue lorsque le ressort se trouve dans la roue et équivaut à 2m . Pour un diamètre de fil (d) de 4.5 mm et un diamètre du ressort (D) de 35 mm , la constante de raideur (k) peut être obtenue à l'aide de la formule :

$$k = \frac{Gd^4}{8nD^3} \quad (10)$$

avec G le module d'élasticité en cisaillement. La constante k équivaut à $0,9 \text{ Nmm}$ pour un ressort comptant 166 spires. Le ressort conçu possède une longueur active de $0,747 \text{ m}$. Lorsqu'une force de 300N est appliquée au ressort, celui-ci s'allonge de $0,33 \text{ m}$. La longueur limite du ressort est obtenue lorsqu'une force de 843 N est appliquée, elle vaut alors $1,8 \text{ m}$ (crochets de fixation compris). Pour un tel ressort, l'énergie qui peut être stockée est donnée par :

$$E = \frac{1}{2}kx^2 \quad (11)$$

ou x est l'allongement du ressort. L'énergie maximale que le ressort peut stocker est donc de 394 J pour une force appliquée de 843 N et un allongement de $0,94 \text{ m}$. Cette quantité est nettement inférieure aux 1500 J exigés.

Le poids du ressort linéaire est par contre intéressant puisqu'il pèse $2,11 \text{ kg}$ (sans crochets). Cependant, en ajoutant au poids du ressort celui de la structure portante, du système d'inversion, de la bobine, du rochet et de la courroie de restitution, le système dépassera le poids fixé de 3 kg .

Les ressorts linéaires permettent une restitution de l'ordre de 95% de l'énergie stockée, ce qui en fait le système de stockage avec le meilleur rendement.

Etant donné que le système est intégré dans la roue, la mise en place et l'utilisation ne présentent pas de difficultés particulières.

Ce système est très sécurisé puisque la structure portante isole le ressort et empêche tout blocage.

Finalement le système de stockage par ressort linéaire est plus avantageux financièrement que les deux systèmes décrits précédemment. En effet, le prototypage et l'achat de ressorts linéaires est moins coûteux que celui des ressorts en spirale et nécessite moins d'expertise pour sa mise en place que le système par volant d'inertie.

4.3.1.4 Système pneumatique

Le cadre du vélo a été choisi comme réservoir permettant la mise sous pression de l'air. Le volume interne des tubes additionnés (tube de selle, tube de direction, tube oblique, tube supérieur) est estimé à $5,7 \text{ l}$. Pour ce calcul les tubes ont un rayon de 3 cm et une longueur totale de 2 m . Pour le système pneumatique, l'air dans le cadre du vélo doit être comprimé à l'aide d'un compresseur de 1 bar (pression atmosphérique) à 7 bar . La pression finale de 7 bar est choisie car il s'agit d'une pression communément utilisée dans d'autres applications (moteurs à air, bouteilles champagne, pneu vélo, ...). En simplifiant le problème, si on considère qu'il n'y a pas d'échange de chaleur avec l'extérieur et qu'il n'y a pas de perte ou de frottement, le travail nécessaire pour comprimer l'air dans le cadre est donné par :

$$w_{is} = ZRT_{asp} \frac{\gamma}{(\gamma - 1)} \left[\left(\frac{P_{ref}}{P_{asp}} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1 \right] \quad (12)$$

avec Z le coefficient de compressibilité, R la constante universelle des gaz parfaits, T_{asp} la température à l'entrée, γ le coefficient adiabatique, P_{ref} la pression au refoulement et P_{asp} la pression à l'aspiration. Dans la formule γ correspond au rapport des constantes thermiques C_p et C_V et vaut $1,4$ pour l'air. T_{asp} vaut 288 K et Z vaut 1 . Le travail isentropique nécessaire à la compression vaut $6340 \frac{\text{J}}{\text{mol}}$. Sachant que dans $5,7 \text{ l}_{air}$ à pression atmosphérique, il y a $0,24 \text{ moles}$, la quantité d'énergie nécessaire à la compression peut être calculée. Elle vaut 1522 J .

Dans le cadre du système pneumatique il est intéressant d'estimer le temps de remplissage nécessaire à la compression. Celui-ci est donné par le premier principe de la thermodynamique auquel on ajoute le terme $\dot{m}_{in}H_{in}$ et $\dot{m}_{out}H_{out}$ qui présentent respectivement l'apport d'enthalpie du flux entrant et la diminution d'enthalpie du flux sortant.

$$\frac{dU}{dt} = Q + W + (\dot{m}_{in}H_{in}) - (\dot{m}_{out}H_{out}) \quad (13)$$

Dans la Formule (13) dU représente la variation d'énergie interne, Q la quantité de chaleur échangée par le système et W la quantité de travail subie par le système. Considérons un réservoir isolé ($Q = 0$). Dans le cas présent le terme $\dot{m}_{out}H_{out}$ est nul puisqu'il n'y a pas de débit sortant. dU_t représente la variation d'énergie interne totale du système. Dans le cas d'un SREC, le débit n'est pas constant ; il est une fonction décroissante au cours du temps. Il faut donc l'intégrer en fonction du temps :

$$\int_0^t dU^t = \int_0^t (\dot{m}_{in}H_{in})dt + \int_0^t W dt \quad (14)$$

Cette fonction peut encore s'écrire :

$$U_f^t = H_{in} \int_0^t \dot{m}_{in}dt + W_t \quad (15)$$

Puisque le cadre est vide au temps t , l'énergie interne au départ vaut 0 . L'énergie interne finale (U_f^t) correspond à l'enthalpie du système à 7 bar et 503 K , elle vaut $2700 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$. L'enthalpie H_{in} est constante et correspond à l'enthalpie aux conditions d'entrée (1 bar et 288 K). En utilisant les tables de vapeur, une valeur de $63 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$ est obtenue. W_t correspond au travail nécessaire pour la compression de 1 à 7 bar qui a été calculé ci-dessus. Il ne reste plus qu'à déterminer le temps nécessaire pour comprimer l'air. Pour cela, les données d'un compresseur électrique de petite taille fonctionnant à des pressions identiques ont été exploitées [WOB, 2020]. Un débit de $6 * 10^{-4} \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$ est obtenu. Le débit massique peut en être déduit au moyen de la masse molaire de l'air ($0,02896 \frac{\text{kg}}{\text{mol}}$). Une durée de compression de 26677 s est obtenue, soit $7,41 \text{ h}$. La durée obtenue donne un premier aperçu de la difficulté de comprimer de l'air à 7 bar au moyen de petits compresseurs.

Pour la phase de restitution, l'air consommé par un moteur pneumatique dépend du rapport de pression et de la section de passage. Avec un rapport de pression de $\frac{7}{1}$, un col sonique est atteint. En effet, ce phénomène d'étranglement se produit quand le rapport entre la pression absolue extérieure et la pression absolue dans le cadre est égale ou supérieure à 0,58 [O'Keefe Controls co., 2003] Au delà de ce ratio il n'y a pas d'augmentation de la vitesse du flux d'air lorsque la pression interne augmente. La formule pour le débit d'un col sonique s'écrit :

$$\dot{m} = \rho_0 c_0 A \sqrt{\frac{2}{\gamma - 1} \left(\left(\frac{p}{p_0} \right)^{2/\gamma} - \left(\frac{p}{p_0} \right)^{\frac{\gamma+1}{\gamma}} \right)} \quad (16)$$

avec :

- ρ_0 = masse volumique de l'air à 503 K = $4,85 \frac{kg}{m^3}$
- c_0 = vitesse du son à 7 bar et 510 K = $450 \frac{m}{s}$
- A = section effective m^2 du moteur, il correspond à 4 mm inspiré d'un moteur à air de petite taille [LZB, 2017]
- $\frac{p}{p_0} = \left(\frac{2}{\gamma+1} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} = 0,9$

Le débit obtenu vaut $0,039 \frac{kg_{air}}{s}$. Puisque dans le cadre du vélo il y a 5,71 à 7 bar, soit $0,028 kg_{air}$. Le débit nécessaire au bon fonctionnement des moteurs à air de petite taille montre bien que ce type de moteurs sont conçus pour être alimentés par un source à pression constante. De plus, il faut noter que les moteurs vont être fortement affectés par la pression en amont et en aval. Pour une faible différence de pression, le travail fourni par le moteur sera faible.

Les moteurs à air sont réputés pour avoir un rendement faible, de l'ordre de 20% à 50% [Ibrahim et al., 2013, Lan et al., 2012, Lemofouet and Rufer, 2006]. Les courbes de rendement d'un moteur pneumatique à palettes sont représentées à la Figure 20. Ce rendement doit être multiplié par le rendement du train épicycloïdal, ce qui en fait le moyen de stockage avec le rendement le plus faible.

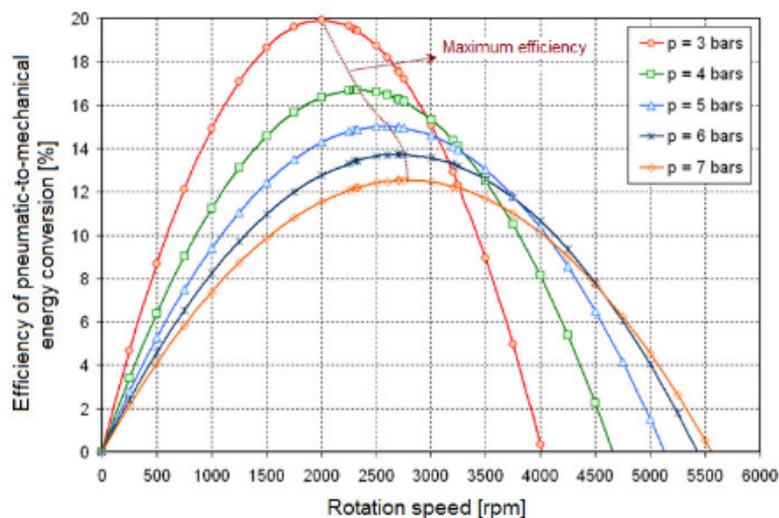


FIGURE 20 – Rendement d'un moteur pneumatique à palettes [Ibrahim et al., 2013]

Le montage d'un système avec un moteur faisant simultanément office de compresseur pendant le stockage et de moteur à air pendant la restitution, ne semble pas évident. En effet, au sein des moteurs à air, les moteurs à palettes sont théoriquement réversibles, mais ne présentent pas de rendement intéressant. Les composants rendent le système pneumatique complexe : un train

épicycloïdal avec un système de blocage au niveau du pignon planétaire est connecté au moteur bidirectionnel qui à son tour est en connexion avec l'enceinte de stockage dans le cadre. Finalement, il faut que le cadre soit spécialement conçu pour pouvoir servir de réservoir et résister à des pressions de 7 bar.

Même si le système pneumatique ne semble pas être le plus approprié à implémenter sur un vélo, il présente un certain nombre d'avantages qui pourraient inciter les chercheurs à se pencher sur la problématique des rendements et de la réversibilité du compresseur. Les moteurs pneumatiques ont l'avantage d'être légers (0,5 kg à 1,5 kg [LZB, 2017]) et ergonomiques. Le système dans son entièreté ne devrait pas dépasser 2 kg puisqu'il utilise un réservoir qui est déjà présent sur le vélo. De plus le stockage par air comprimé ne présente pas de danger particulier pour l'utilisateur. Même si l'arbre moteur tourne à des vitesses élevées, celui-ci est isolé et les petits composants en rotation dans le moteur ne provoquent pas d'instabilité.

Finalement, le développement d'un système opérationnel en dessous de 300 € n'est pas envisageable car les moteurs à air sont coûteux (> 700 € [Duncan Rogers, 2020]).

4.3.1.5 Système d'énergie potentielle

Le dernier système retenu concerne le système à énergie potentielle. L'énergie maximale qui peut être stockée est obtenue par :

$$E = mgh \quad (17)$$

En prenant comme hauteur (h) la longueur du tube de selle (0,6 m) et comme masse (m) 3 kg, l'énergie stockée vaut 17,7 J. Cette quantité est nettement inférieure à celle attendue.

Parmi les autres inconvénients du système figurent son poids (>3 kg) et sa mise en place dans le tube de selle qui nécessite une modification de celui-ci.

Les avantages de ce système sont nombreux : un rendement élevé (2 engrenages isolés : 86%, embrayage : 95%, courroie de restitution : 97%) d'environ 79%, une facilité d'utilisation, un prix attractif et une sécurité garantie.

4.3.2 Evaluation absolue simple

A l'aide des performances calculées dans la section précédente, une évaluation absolue simple visant à comparer les systèmes de stockages entre eux est réalisée. Les signes + et - indiquent respectivement si le système répond ou non aux exigences fixées pour un critère de performance donné.

En analysant le Tableau 5, les deux systèmes répondant le mieux aux exigences sont ceux exploitant l'énergie élastique. En effet, le stockage par ressort est réputé pour son bon rendement et sa pertinence dans les systèmes mécaniques de stockage de courte durée. Cependant, le ressort de traction ne répond pas aux exigences en terme de capacité énergétique nécessaire. Étant donné que cette performance est la plus importante pour atteindre les objectifs fixés, le signe négatif dans la première ligne de la table d'évaluation absolue est exclusif (d'où sa couleur rouge). Il en est de même pour les solutions de stockage exploitant l'air comprimé et l'énergie potentielle.

La dernière ligne du tableau donne un classement des systèmes de stockage selon l'appréciation du concepteur. En raison des - exclusifs, le volant d'inertie prend la deuxième place, derrière le ressort en spirale ; il est suivi du ressort linéaire et du système à air comprimé. Ce dernier devance la solution se basant sur l'énergie potentielle, même s'il répond à un moins grand nombre d'exigences. Ce choix est fait par le concepteur en raison d'avancées technologiques possibles dans le domaine de l'air comprimé. Il serait en effet pertinent de lancer des recherches visant à développer des moteurs pneumatiques réversibles et possédant des rendements intéressants. Quant au système de stockage par énergie potentielle, il a tout son sens dans des applications stationnaires comme le stockage

Tableau 5 – Evaluation absolue simple du SREC

Critère de Performance	Volant d'inertie	Ressort Spirale	Ressort Linéaire	Pneumatique	Potentielle
Energie stockée	+	+	-	-	-
Rendement	+	+	+	-	+
Poids	-	-	+	+	-
Mise en place/ Montage/ Entretien	-	+	+	-	+
Utilisation	+	+	+	+	+
Sécurité	-	+	+	+	+
Coût	+	+	+	-	+
Totaux	4+ 3-	6+ 1-	6+ 1-	3+ 4-	4+ 2-
Classement selon les critères de performance	2	1	3	5	4
Classement du concepteur	2	1	3	4	5

d'énergie éolienne en mer au moyen de masses en béton [SinkFloatSolutions, 2020] ou les stations hydrauliques pompant l'eau vers un bassin en altitude quand un excès d'électricité est présent sur le réseau. Cependant, il n'atteindra jamais les exigences en terme de capacité énergétiques requises pour la présente application.

Suite aux résultats obtenus grâce à l'évaluation absolue, l'option du ressort en spirale dans la roue est retenue pour le prototypage.

4.4 Système retenu

4.4.1 Prédimensionnement

Afin de pousser la caractérisation du ressort plus loin, il incombe au concepteur de vérifier le niveau de sûreté du ressort. Il correspond à la contrainte maximale en flexion autorisée par le matériau (1106 MPa) qu'il faut diviser par la contrainte de flexion subie par le ressort à charge maximale (583 MPa). La contrainte de flexion (σ) est calculée à l'aide de la formule :

$$\sigma = \frac{6K}{bt^2} \quad (18)$$

Le niveau de sûreté exigé pour un ressort dépend de la température, du type de charge, de l'environnement de fonctionnement (corrosif ou non) et du traitement du ressort [MIT, 2020]. Il est vérifié dans le cas présent puisqu'il vaut 1,89 et que le niveau de sûreté exigé est d'au moins 1,76. Un résumé des autres caractéristiques du ressort sont reprises au Tableau 6 et à la Figure 21 :

Tableau 6 – Caractéristiques du ressort en spirale

Caractéristiques	Symbole	Valeur	Unité
Rayon intérieur	R_2	32	mm
Rayon extérieur	R_3	110	mm
Couple maximal appliqué	C_{max}	25	Nm
Angle de rotation maximal	α_{max}	400	°
Constante du ressort	K	62,5	$\frac{Nmm}{\circ}$
Épaisseur de bande	t	3,5	mm
Largeur de bande	b	21	mm
Nombre spires	n	10	/
Espace entre les spires (ressort non chargé)	a	4,2	mm
Poids	m	2,48	kg

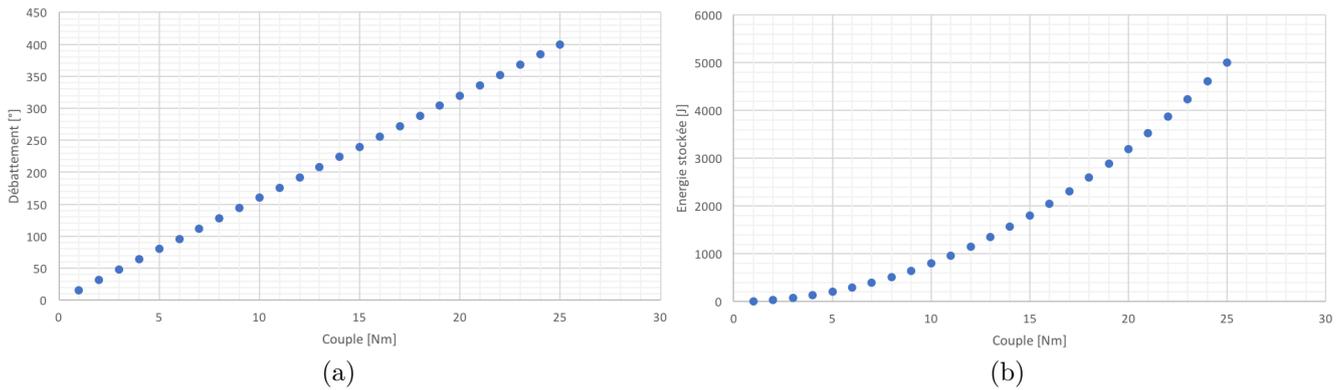


FIGURE 21 – Graphiques de performance du ressort :(a) Débattement en fonction du couple (b) Capacité énergétique en fonction du couple

4.4.2 Dessin du projet

Afin de mieux visualiser l'agencement des différentes parties du système au sein de la roue, une représentation schématique est donnée à la Figure 22.

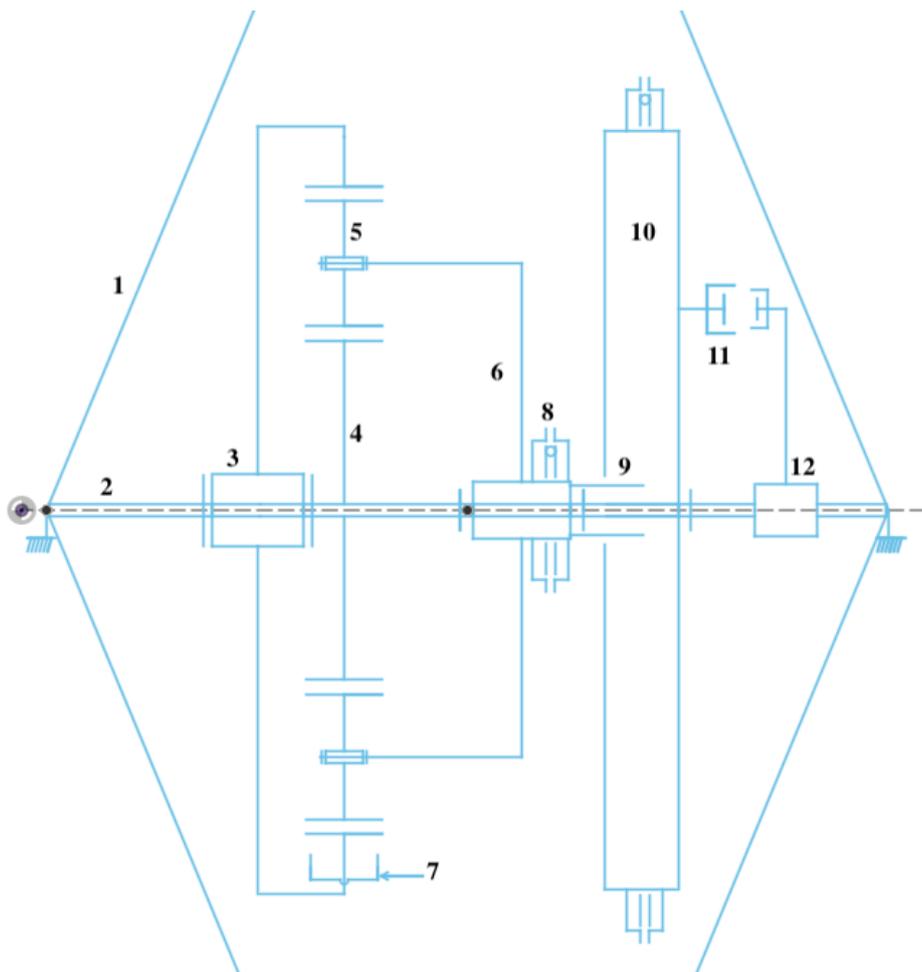


FIGURE 22 – Schéma cinématique du SREC retenu [1. Rayons de la roue avant ; 2. Moyeu ; 3. Couronne ; 4. Planétaire ; 5. Satellites ; 6. Porte-satellites ; 7. Frein ; 8. Roue à rochet ; 9. Extension permettant bandage du ressort ; 10. Boîtier contenant le ressort ; 11. Embrayage ; 12. Glissière]

4.4.3 Analyse de risques

Une Analyse des Modes de Défaillance, de leurs Effets et Criticité (ADMEC) est menée de manière préventive pour identifier les défaillances potentielles des différents composants du système qui affectent négativement le bon fonctionnement du SREC . Pour chacune des pièces le mode de défaillance est expliqué, l'effet sur le système est analysé et les causes potentielles énumérées. Cette analyse permet de mettre en lumière les contrôles à réaliser lors de la conception et tout au long de la vie du produit pour prévenir la défaillance. Finalement, les défaillances sont classées selon un nombre prioritaire de risque (NPR) qui se calcule comme suit :

$$NPR = SFD \quad (19)$$

S,F et D prennent une valeur sur une échelle de 1 à 5

- S = Sévérite ou la gravité de l'effet de la défaillance (1=peu sévère, 5=très sévère)
- F = Fréquence d'apparition de la défaillance (1=très peu fréquent, 5= très fréquent)
- D = Capacité de détection de la défaillance avant dégradation (1=détection facile, 5=détection impossible)

Étape du Cycle	Ensemble ou composant	Mode de défaillance potentiel	Effet de la défaillance	Sévérité (S)	Cause potentielle	Fréquence (F)	Contrôle de prévention et détection en conception	Détection (D)	Action recommandée
Fonctionnement	Frein sur couronne (7)	Frein sur la couronne ne freine plus de manière optimale	Moins d'énergie stockée	2	Usure des patins ou circuit hydraulique	2	Vérifier état des patins et du système hydraulique (câbles, leviers de frein,...)	1	Changer les patins avant usage complet, purger le circuit hydraulique une fois par an
		Reste bloqué	Freine le vélo	4	Problème du circuit hydraulique ou levier de frein bloqué	1	Vérifier le système hydraulique de freinage, vérifier les ressorts de rappel dans les leviers de frein	1	Purger circuit hydraulique une fois par an
	Train épicycloïdal (3, 4 et 5)	Usure des engrenages	Glissement des engrenages entre eux et pertes d'énergie	3	Déformation couronne, usure des engrenages	1	Vérifier bon engrènement avant installation	3	Entretien complet du système tous les 10000 km
	Roue à rochet et cliquet (8)	Ne bloque pas le porte-satellite ou boîtier du ressort	Renvois dans le mauvais sens / pas de stockage d'énergie	5	Rupture du mécanisme permettant le retour du cliquet sur la roue à rochet	1	Vérifier le fonctionnement du système de non-retour avant l'installation	1	Changer mécanisme de non retour lors de l'entretien complet du système
	Embrayage de restitution (11)	Glissement entre l'embrayage et le boîtier du ressort	Energie stockée est partiellement perdue/ usure de l'embrayage	2	Usure de l'embrayage/ embrayage désaxé sur le moyeu / chocs fréquents	1	Vérifier le fonctionnement de la glissière sur le moyeu et l'accouplement des embrayages	3	Entretien complet du système tous les 10000 km
	Système de restitution (10, 11 et 12)	Mauvaise synchronisation entre relâchement du cliquet et l'embrayage	Perte d'énergie et usure de l'embrayage	2	Dysfonctionnement du système hydraulique permettant la synchronisation	1	Vérifier le temps de latence entre le déclenchement de la restitution et la transmission à la roue/ vérifier l'état des gaines et joints du système hydraulique	4	Purger le système hydraulique de restitution lors de l'entretien complet
	Ressort	Rupture du ressort	le SREC ne fonctionne plus/ blocage complet du moyeu de la roue	5	Coup sur le boîtier du ressort/ surcharge du ressort/Rupture dû à la fatigue	1	Vérifier la qualité du ressort avant installation dans son boîtier/ Faire contrôler le système après un gros choc ou accident de vélo	1	Entretien complet du système tous les 10000 km ou changement du ressort après 10 ⁵ cycles de fonctionnement
	Extension du porte-satellite (9)	Rupture extension	le SREC ne fonctionne plus	5	Le boîtier du ressort est désaxé sur le moyeu/ Rupture dû à la fatigue ou à un choc	1	Vérifier bon accouplement ressort-extension du porte-satellite	1	Inspection de l'extension lors de l'entretien complet

FIGURE 23 – Analyse du mode de défaillance pour le SREC

5 Preuve de concept au moyen d'une maquette

En se basant sur les calculs et les documents fournis dans les sections précédentes, il a été décidé de poursuivre le développement du projet en adoptant une approche agile. Celle-ci postule que la planification détaillée de la totalité de la conception de la machine avant de commencer la mise en oeuvre d'un premier prototype, n'est pas la méthode la plus efficace. Le travail est divisé en cycles de développements avec des objectifs fixés à court terme [Collignon and Schöpfel, 2016].

Chacune des FP est développée à son tour. Lorsqu'une solution satisfaisante est trouvée pour l'enclenchement du système, le concepteur se penche sur le développement du stockage et ainsi de suite, jusqu'à obtention d'un prototype final opérationnel répondant aux exigences fixées. L'avantage principal d'une telle approche est la facilité d'apporter des ajustements en cas d'imprévu ou d'ajouter des fonctions qui n'ont pas été pensées au préalable. Finalement, pour qu'une telle approche fonctionne, il faut beaucoup d'interactions entre les membres de l'équipe afin de pouvoir adapter le travail en continu.

5.1 Simplification du système retenu

En raison des contraintes de réalisation, un nouveau dispositif est imaginé par le concepteur. Avec les matériaux et outils disponibles, et une bonne dose de créativité, un système plus simple que celui présenté à la Figure 22 a vu le jour. Celui-ci est basé sur le système 2 comprenant un ressort linéaire (cf. Section 4.2.3.3) et ne comprend donc pas de ressort en spirale comme moyen de stockage, mais un ressort de traction. Le changement de moyen de stockage par rapport au système retenu à la section précédente est motivé par la difficulté de trouver des ressorts en spirales sur des machines d'usage quotidien. Les ressorts de traction sont beaucoup plus répandus. Le schéma cinématique de la maquette (Figure 24) illustre une vue d'ensemble de l'agencement des composants entre eux. Il permet également de voir comment le système va fonctionner, de prendre connaissance du mouvement relatif des pièces entre elles et d'observer les limites du système, qui peuvent être corrigées, avant de passer à la réalisation. Finalement, ce schéma distingue les composants en fonction de leur rôle dans le mécanisme et des FP (en pointillés) auxquelles elles contribuent.

A cette représentation simplifiée il est intéressant d'ajouter un schéma reprenant de manière séquentielle les différentes étapes du mécanisme. Le GRAFCET (Graphe Fonctionnel de Commande Étape Transition) est un graphique reprenant une suite d'étapes à réaliser par le pilote. Chaque étape est définie par un numéro, représenté dans un carré, et une action. Les différentes étapes sont reliées entre elles par une liaison (ligne verticale) elle-même caractérisée par une transition. Le sens de la liaison est indiqué au moyen d'une flèche noire.

Les cinq étapes caractérisant le prototype sont reprises à la Figure 25. La première étape consiste à enclencher le système. Suite à cette action, le tiroir hydraulique passe en position 1, ce qui est l'état de transition entre l'étape 1 et 2. Après l'activation du limiteur de couple, le ressort est soit totalement, soit partiellement bandé. Le tiroir hydraulique reprend sa position neutre après débrayage. Entre l'étape 3 et 4, le mécanisme peut prendre deux voies différentes ; soit le cycliste freine à nouveau et la séquence est recommencée, soit l'utilisateur déclenche l'assistance. Dans ce dernier cas, deux transitions ont lieu simultanément (rectangle à longueur double) : le tiroir passe en position 2 et le cliquet sur la bobine se redresse. De cette manière l'énergie stockée dans le ressort peut être restituée au pédalier sans pertes. En effet, en cas de redressement du cliquet sur la bobine avant le glissement de l'embrayage en position 2, l'énergie emmagasinée dans le ressort n'est pas transmise à l'axe 1 et est perdue. Finalement, l'embrayage reprend sa position neutre et la séquence peut reprendre à la première étape.

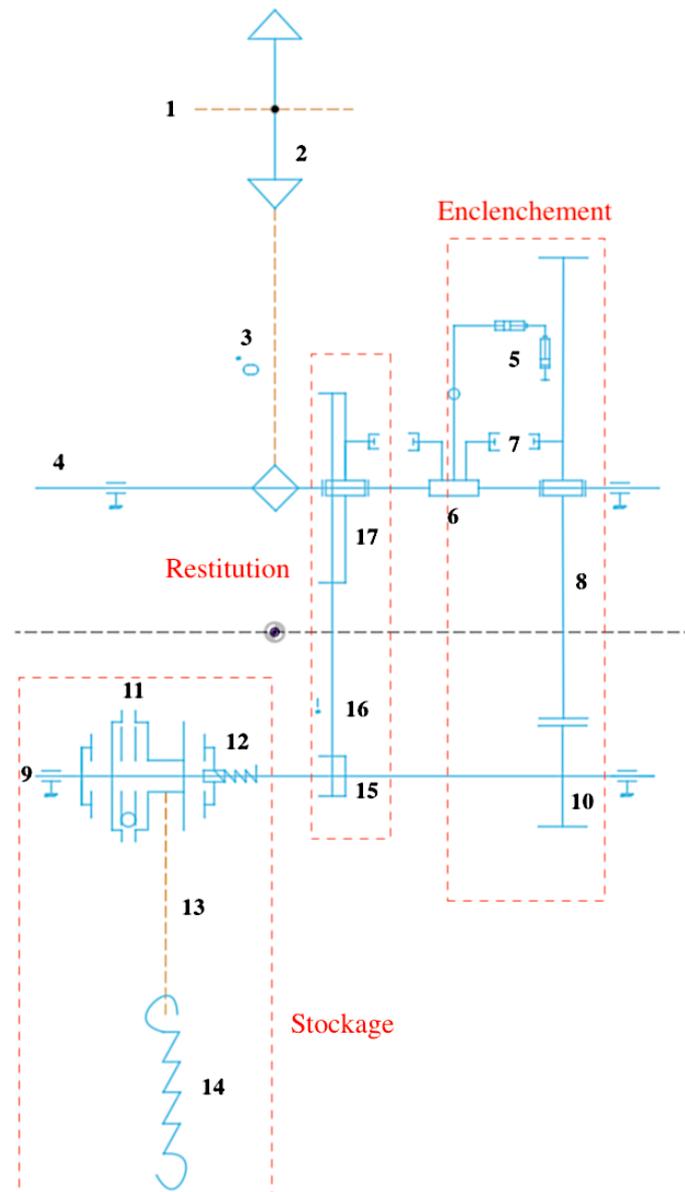


FIGURE 24 – Schéma cinématique du prototype [1. Axe du pédalier ; 2. Plateau ; 3. Chaîne à maillons ; 4. Axe 1 ; 5. Système d'enclenchement ; 6. Glissière supportant l'embrayage ; 7. Embrayage ; 8. Engrenage 1 ; 9. Axe 2 ; 10. Engrenage 2 ; 11. Roue à rochet et cliquet ; 12. Limiteur de couple ; 13. Câble ; 14. Ressort ; 15. Poulie ; 16. Courroie Plate ; 17. Poulie de restitution]

5.2 Réalisation d'une maquette

Le but de la maquette est de représenter le système retenu dans l'espace afin de pouvoir analyser le mouvement des différents composants du système entre eux. Elle permet d'identifier les pièces et les mouvements critiques et de valider le fonctionnement du SREC. Finalement, des mesures peuvent être réalisées sur la maquette, permettant la caractérisation du système retenu.

Dans le cadre de l'approche agile, trois objectifs de réalisation à court terme sont fixés. Les trois grandes fonctions présentées sur le schéma cinématique sont réalisées une à une, ne suivant pas l'ordre de la séquence définie dans le GRAFCET. Les axes 1 et 2 sont en réalité des axes arrières de cuistax pour enfants. La structure métallique supportant le premier axe est maintenue pour faciliter la fixation de celui-ci et pour permettre sa mise en rotation au moyen du pédalier qui

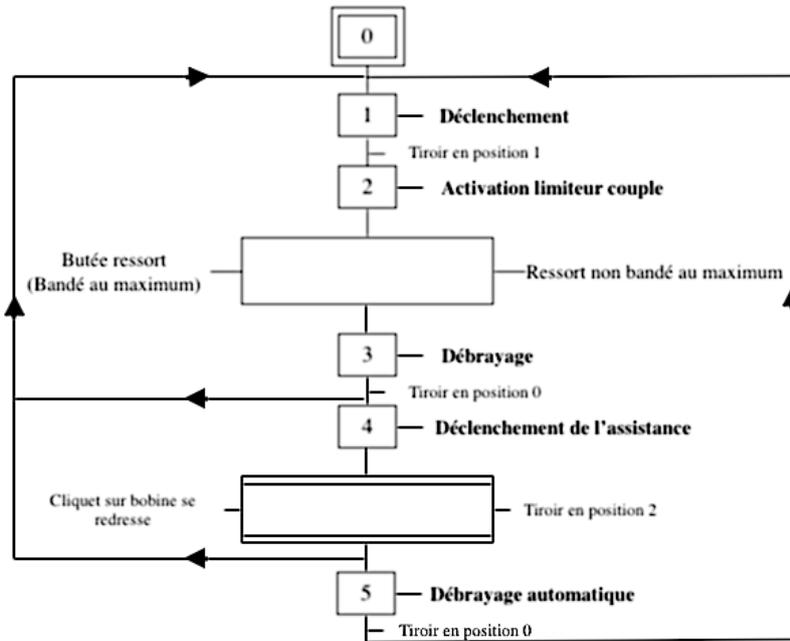


FIGURE 25 – GRAFCET du prototype

fait tourner la chaîne entraînant le pignon. En insérant les axes dans des supports à roulements et en fixant ceux-ci aux moyens d'équerres et de colliers, leur mouvement est fortement limité. Pour permettre une transmission entre les axes, des engrenages sont découpés dans du MDF (Medium Density Fibreboard) à l'aide d'une défonceuse manuelle et d'une scie sauteuse. Les engrenages ainsi découpés, assurent la transmission du mouvement mais les forces de frottement entre les deux éléments en bois empêchent un mouvement tout à fait fluide entre les deux composants. Pour réduire les frottements, une combinaison de bouche-pore et de paraffine sont utilisés. La Figure 26 illustre le résultat final de l'engrenage qui repose sur des roulements à billes récupérés du pivot de direction d'un vélo.



FIGURE 26 – Engrenage en MDF sur roulement à billes

5.2.1 Enclenchement

Deux seringues (Figure 27) sont utilisées pour simuler un commande permettant la synchronisation des embrayages par un moyen hydraulique. En tirant ou poussant sur le piston de la seringue 1, l'utilisateur peut changer la position des embrayages. Un arbre, fixé à l'extrémité du piston de la seringue 2, tourne autour d'une liaison pivot et place les embrayages situés sur la glissière

(Figure 28) dans une des trois positions (0, 1 ou 2). La position 1 correspond à l'entraînement de

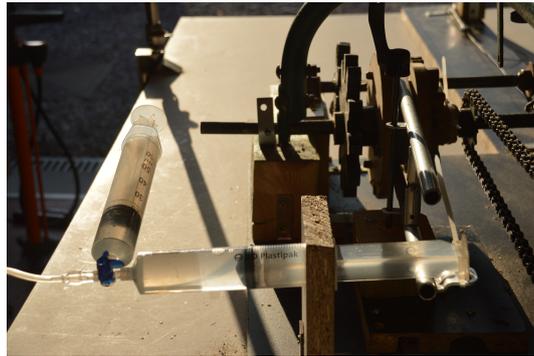


FIGURE 27 – Système d'enclenchement hydraulique

l'engrenage 1, la position 0 est le point neutre et la position 2 couple l'embrayage à la poulie de restitution. Les embrayages sont également construits en MDF et sont munis de tenons qui glissent entre les dents des engrenages en position "embrayée", ce qui permet leur rotation.



FIGURE 28 – Glissière servant de support à l'embrayage et mécanisme de transmission par engrenage entre l'axe 1 et 2

La Figure 29 montre l'embrayage qui est monté sur la glissière et se trouve en position neutre. Les tenons de part et d'autres des disques n'entraînent donc aucun engrenage.

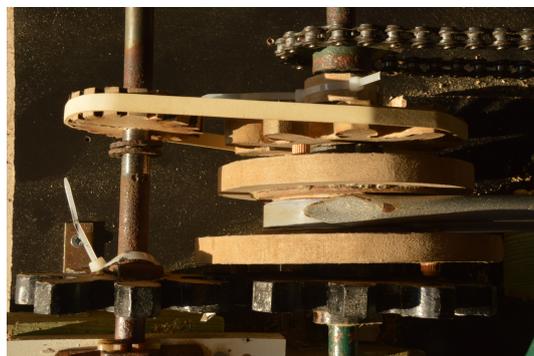


FIGURE 29 – Vue du dessus du système "d'enclenchement" et "restitution"

5.2.2 Stockage

En phase de stockage, le ressort doit être bandé et doit rester en position, soit jusqu'à ce que le cycliste décide d'utiliser l'assistance, soit jusqu'à ce qu'il décide de freiner à nouveau. Dans le premier cas, le ressort revient à sa position initiale (détendue) ; dans le second cas, il continue son étirement jusqu'à arrêt complet du freinage.

Le maintien du ressort en position est réalisé au moyen d'une roue à rochet et cliquet installée sur le côté externe d'une bobine qui est solidaire à l'axe 2. Le ressort est accroché d'une part à un câble le reliant à la bobine et d'autre part à un bloc fixe. Lorsque l'axe 2 se met en rotation, la bobine enroule le câble, allongeant ainsi le ressort. En tournant, la roue à rochet soulève le cliquet qui, au moyen du système de rappel par élastique, reste en contact permanent avec la roue et évite le mouvement en sens inverse en se bloquant dans les encoches. Une illustration de la roue est donnée à la Figure 30, montrant le système de rappel du cliquet et l'arrivée du câble entre les deux disques de la bobine.

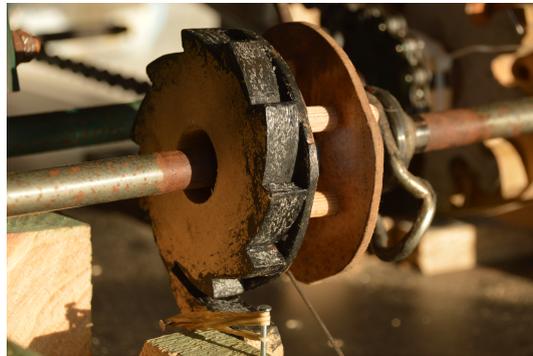
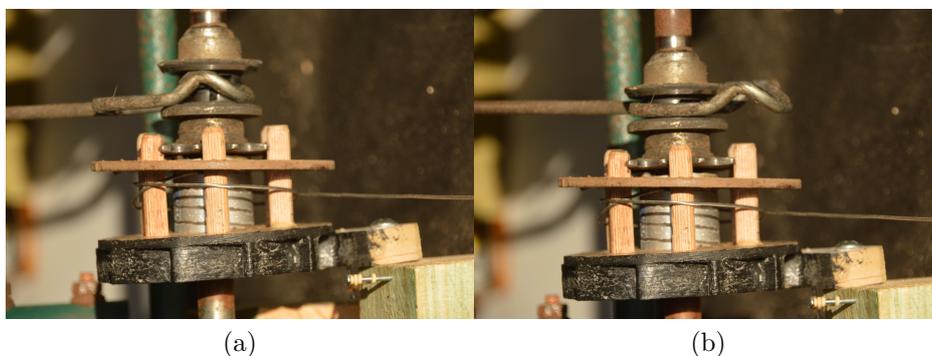


FIGURE 30 – Roue à rochet et cliquet

Afin de solidariser la bobine avec l'axe 2, les tenons formant le corps de la bobine ressortent du côté opposé à la roue à rochet et sont fixés entre les dents d'un pignon solidaire à l'axe 2. A côté de ce pignon se trouve un embrayage à crabots qui évite la surcharge du ressort (Figure 31). Lorsqu'il est débrayé, la rotation de l'axe 2 n'entraîne plus la partie gauche sur laquelle se trouve la bobine.

Finalement, le constituant principale du stockage, le ressort, provient d'une ancienne lampe de



(a)

(b)

FIGURE 31 – Embrayage limiteur de charge permettant le couplage (a) ou découplage (b) de la bobine avec l'axe 2

bureau. Sa fixation et son lien avec la bobine au moyen d'un câble, sont illustrés à la Figure 32.



FIGURE 32 – Système de stockage

5.2.3 Restitution

Pour restituer l'énergie du ressort au pédalier, l'embrayage passe en position 2 et le cliquet est redressé. De ce fait, la bobine entraîne l'axe 2 en sens opposé à celui permettant la charge du ressort. L'axe 2 tourne donc dans le même sens que celui du pédalier pour faire avancer le vélo. Afin de maintenir ce sens de rotation, la partie restitution est dotée d'une transmission par courroie en cuir disposée sur deux poulies. L'une d'entre elles (15 du schéma cinématique) est solidaire à l'axe alors que l'autre est disposée sur des roulements. La Figure 33 illustre le prototype en phase de restitution : l'embrayage est en position 2 permettant la transmission de l'axe 2 à l'axe 1.



FIGURE 33 – Courroie de restitution entre l'axe 2 et l'axe 1

5.3 Observations et pistes d'améliorations de la maquette

En construisant le prototype pas à pas et en favorisant les échanges au sein de l'équipe, des modifications ont rapidement été apportées au prototype et une version opérationnelle a vu le jour. Cependant un certain nombre d'améliorations sont envisageables pour rendre le système plus performant.

Tout d'abord, le matériau dans lequel la plupart des pièces ont été usinées, le MDF, peut être changé. En effet, ce matériau est facilement usinable et idéal pour vérifier le fonctionnement d'un mécanisme. Néanmoins il est rugueux et ne permet pas une transmission fluide du mouvement, à moins d'avoir des pièces parfaitement découpées, poncées et traitées (vernis, paraffine, silicone).

Le MDF est un matériau qui s'use rapidement lorsqu'il est soumis à des forces appliquées sur une petite surface. Des signes d'usure peuvent être observés à l'endroit de la fixation de l'engrenage 2 sur l'axe 2 (Figure 34).



FIGURE 34 – Signes d'usure sur l'engrenage 2

En raison des contraintes de fabrication, les engrenages du prototype sont grands et ne comptent pas beaucoup de dents (7 et 11). Le faible nombre de dents réduit le fond de creux entre les dents et peut causer des difficultés lors de l'entraînement. Généralement les engrenages comptent plus de douze dents pour éviter ce problème [Anglade and Horsin, 2017].

Les deux problématiques citées combinées aux couples importantes appliquées sur les engrenages et à leur alignement imparfait, limitent le bandage du ressort. En effet, à partir d'une élévation de 35 cm, les engrenages se bloquent.

Concernant la restitution, le système courroie/poulie peut être amélioré. La courroie en cuir a tendance à se désaxer lors de la phase de restitution. Pour l'éviter, il faudrait bomber les poulies afin de favoriser l'alignement automatique ou utiliser une courroie trapézoïdale. La poulie de restitution sur l'axe 1 est en réalité un engrenage sur lequel la courroie est déposée. Ce montage permet à l'embrayage d'insérer les tenons entre les dents de l'engrenage (cf. Figure 29) et de synchroniser les deux axes. Cependant, le grand écart entre les dents réduit les forces de frottement entre la courroie et l'engrenage, ce qui entraîne une perte d'énergie par glissement. En adaptant la courroie et les poulies, une restitution plus efficace pourrait être obtenue.

Finalement, il serait intéressant de synchroniser le redressement du cliquet de la bobine et l'embrayage. Sur le prototype actuel, l'embrayage est d'abord fixé en position 2, puis le cliquet est redressé manuellement.

6 Essais et mesures

Sur la maquette, des mesures sont réalisées. Elles servent dans un premier temps à caractériser les performances du système mis en place. La comparaison des valeurs obtenues et attendues donne une idée des pertes d'énergie du système et pousse le concepteur à identifier les parties qui doivent être modifiées. Les mesures servent également à extrapoler les résultats obtenus pour avoir une première estimation des performances du système réel imaginé. Si les valeurs de performances obtenues sont trop éloignées des valeurs calculées, des corrections peuvent toujours être apportées.

6.1 Mesures réalisées

Puisque le ressort de traction provient d'une ancienne lampe de bureau, ses caractéristiques principales ont été mesurées (Annexe D). Sa raideur, k , déterminée en mesurant les différentes élongations après pendaison de quatre masses (1,2,3 et 4 kg) au bout du ressort, équivaut à $313 \frac{N}{m}$.

Afin de déterminer la puissance nécessaire pour allonger le ressort d'une certaine longueur, il faut connaître le couple appliqué par le cycliste au pédalier. Ne possédant pas de capteur de couple, un système de masse pendu à une poulie circulaire est installé sur la table de travail. Une corde est accrochée, par une extrémité, à la chaîne à maillons qui entraîne l'axe 1 (3 du schéma cinématique) et par l'autre à la masse pendue au bout de la table (Figure 35).



FIGURE 35 – Dispositif "masse-poulie" de prise de mesures

L'élongation du ressort est mesurée pour cinq masses différentes [4, 6, 8, 10 et 12 kg] avec une répétition de cinq mesures par masse. Chacune des mesures est réalisée de manière similaire :

1. la masse est accrochée au bout de la corde et soutenue par l'expérimentateur
2. l'expérimentateur met la corde sous tension pour éviter une chute brutale de la masse, ce qui fausserait les mesures
3. l'élongation du ressort est mesurée
4. le cliquet est redressé et le ressort reprend sa position neutre
5. une nouvelle mesure est réalisée

Chaque masse est multipliée par le bras de levier par rapport à l'axe 1 (rayon du pignon, soit $0,032 m$) pour obtenir le couple appliqué à cet axe. Lors de chacune des mesures, le pignon de l'axe 1 qui est entraîné par la chaîne est filmé à l'aide d'un appareil photo [25 images par secondes]. Les vidéos sont ensuite traitées pour déterminer la vitesse de rotation, ω , du pignon. En multipliant cette dernière au couple, la puissance nécessaire à l'élongation peut être obtenue.

La Figure 36 reprend les couples et puissances calculés en fonction de la vitesse de rotation du pignon. Les deux courbes en pointillés montre une tendance exponentielle dans les deux cas. La Figure 37 illustre l'énergie stockée pour un couple et une puissance donnés.

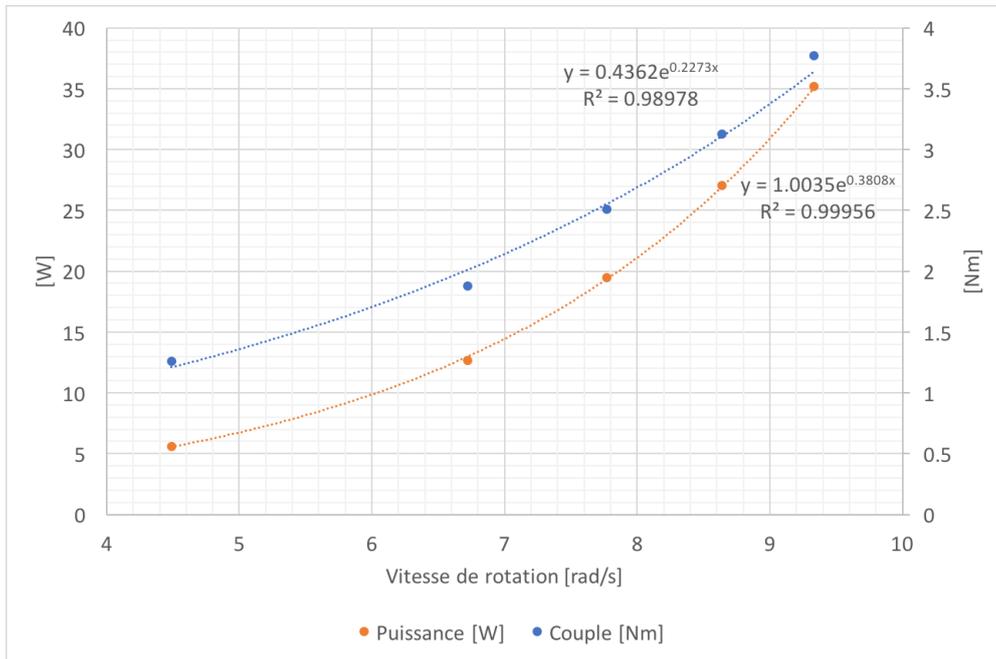


FIGURE 36 – Courbe de puissance et de couple en fonction de la vitesse de rotation

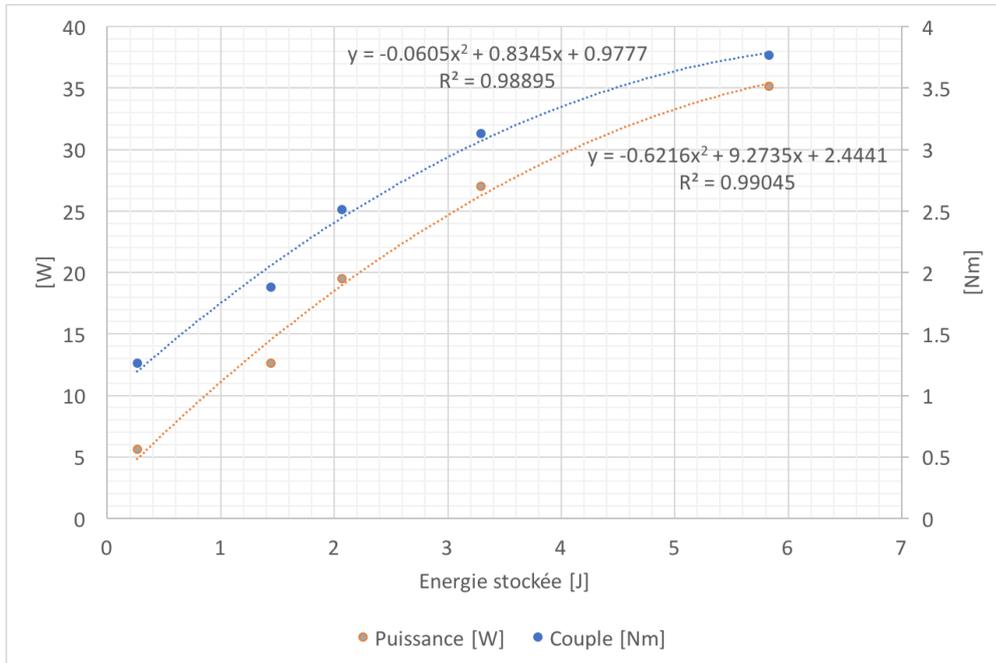


FIGURE 37 – Courbe de l'énergie stockée en fonction de la puissance et du couple

Le rendement théorique du prototype peut être calculé en multipliant les rendements de tous les composants individuels du système. Le Tableau 7 reprend pour chacun d'eux le rendement individuel, le nombre et le rendement total.

En prenant comme rendement du ressort 90%, le rendement total théorique du système avoisine les 70%. A cette valeur il est intéressant de comparer le rendement obtenu pour le prototype. Pour

Tableau 7 – Rendements théoriques des composants du prototype

composant	$\eta_{composant}$ [%]	nombre	η_{total} [%]
engrenages	93	2	86
chaîne	97	1	97
courroie plate	96	1	96
embrayage	97	1	97
roulements	99	2	98
ressort	90	1	90
Total			68

ce faire, le pédalier est tourné manuellement de 90° , bandant le ressort de 23,9 cm. Lors de la restitution, la rotation du pédalier est analysée. L'angle moyen de restitution sur cinq essais est de 46° , ce qui donne une restitution de l'ordre de 51%.

La différence entre le rendement théorique et le rendement effectif du prototype peut être expliquée par les pertes lors de la transmission mécanique. Celles-ci sont majoritairement dues aux frottements entre les engrenages et au mécanisme de restitution par courroie (cf. Section 5.3). De plus, l'usure visible à l'endroit de contact entre l'engrenage 2 et l'axe 2 (Figure 34), donne du "jeu" à l'engrenage et complique la rotation du train d'engrenages lorsque des couples plus importants sont appliqués.

6.2 Extrapolation des mesures

Si un système de ressort en traction est installé dans une roue, la contrainte principale est la longueur de débattement. Comme mentionné à la section 4.3.1.3, sur un vélo, un ressort d'élongation maximale de 2 m peut être installé. Les contraintes liées au diamètre du ressort limitent celui-ci à 35 mm. En reprenant les caractéristiques du ressort calculées à la section mentionnée ci-dessus, la quantité maximale d'énergie stockée par le ressort est de 394 J pour une longueur du ressort de 1,69 m. Si ce ressort est implémenté dans une roue possédant le même mécanisme que le prototype, l'énergie maximale théorique restituée ne vaudrait plus que 267,9 J. Ce rendement théorique de 68% n'est valable que si le système est parfaitement installé, avec des matériaux adéquats et une bonne lubrification. De plus il faut que le système ne soit soumis à aucune autre perte. En pratique, le système présentera un rendement inférieur de quelques pourcents à celui du rendement théorique, mais nettement supérieur au rendement calculé pour le prototype. Les modifications concernant les matériaux et les engrenages décrites à la Section 5.3 permettront effectivement d'optimiser la récupération et restitution de l'énergie.

La quantité d'énergie stockée et restituée pour ce ressort est nettement inférieure aux performances attendues dans le CDC et peut difficilement être améliorée en raison des contraintes liées aux dimensions du ressort.

gramme d'Ashby (Figure 38). Il répartit les matériaux en fonction de leur rigidité et de leur résistance spécifique. La rigidité spécifique correspond au module de Young (E), aussi appelé module d'élasticité, divisé par la masse volumique. Ce module est élevé pour des matériaux "raides" et de masse volumique faible. C'est le cas des céramiques et des matériaux composites. Les métaux par contre, ont un module spécifique plus petit à cause de leur masse volumique plus importante. Sur l'axe des abscisses, la résistance spécifique est obtenue en divisant la résistance à la traction d'un matériau par sa masse volumique. Pour cette grandeur, les valeurs les plus élevées sont obtenues pour les composites suivis des métaux et des céramiques. [Ashby, 2005] illustre avec ce diagramme le potentiel des matériaux composites dans des applications de stockage d'énergie non stationnaires, comme les ressorts. En effet, ces matériaux sont légers et possèdent une grande rigidité et une grande raideur spécifique.

Pour choisir le matériau le plus propice à la fabrication du SREC, il est intéressant de comparer les densités énergétiques et les densités de puissance entre elles. La Figure 39 illustre la densité énergétique de différents matériaux composites et ajoute les valeurs de quelques moyens de stockages courants à titre de comparaison. La première observation flagrante est la différence de densité énergétique entre les matériaux composites et le ressort en acier. En effet, les matériaux composites à base de fibre de carbone-époxy (T700S, T800H et T1000G) possèdent une énergie spécifique 100 fois plus élevée que celle des ressorts en acier [Munoz-Guijosa et al., 2019].

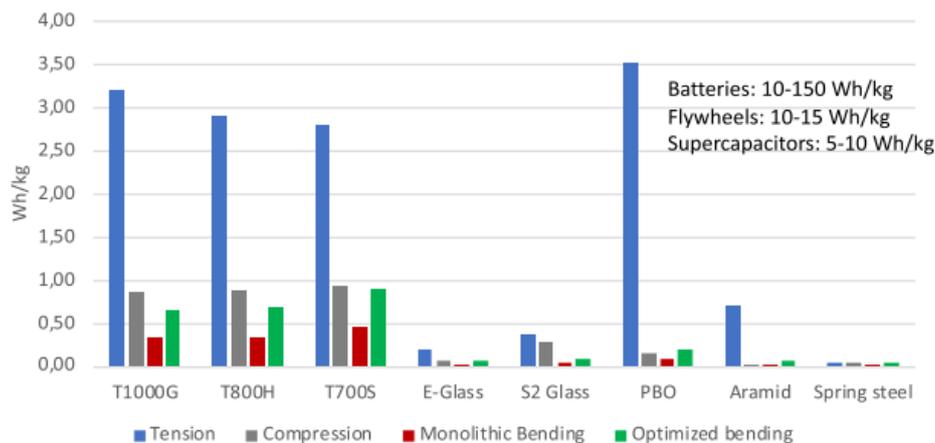


FIGURE 39 – Densités énergétiques de différents matériaux composites et d'un ressort en acier [T1000G, T800H, T700S : composites en fibres de carbone ; E-Glass, S2 Glass : Composites a base de fibres de verre ; PBO : Polybinzoxazole] [Munoz-Guijosa et al., 2019]

Cette valeur peut facilement être expliquée à l'aide de la formule de la densité énergétique (U) :

$$U = \gamma \frac{\sigma}{E\rho} \quad (20)$$

où σ est la résistance à la traction et γ est un facteur dépendant de la répartition des contraintes causé par le mode de chargement. En effet, pour une même contrainte appliquée, les matériaux qui possèdent une masse volumique et un module de Young plus faible, ont une densité énergétique plus élevée. D'autre part, la Figure 39 montre que la densité énergétique des matériaux composites reste nettement inférieure à celle des volants d'inertie et des batteries.

Finalement, le diagramme de Ragone (Figure 40) révèle que les matériaux composites, malgré leur densité énergétique plus faible que les volants d'inertie et les batteries, possèdent tout de même une densité de puissance intéressante pour des temps de décharge de l'ordre de quelques dixièmes

à quelques centaines de secondes. Ceci s'applique en particulier aux composites en traction et en flexion.

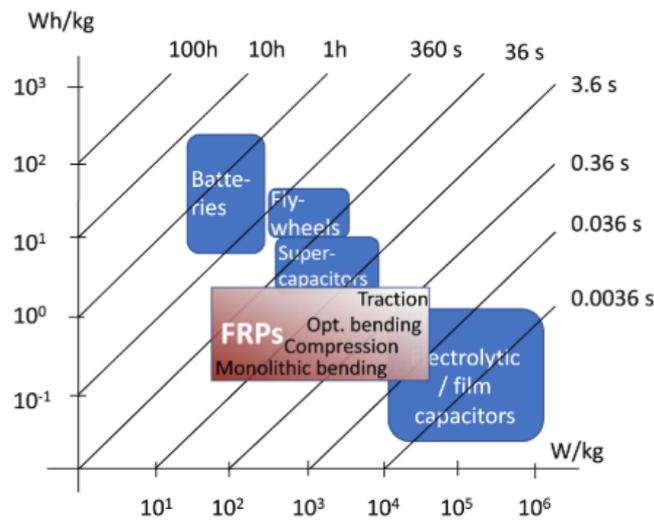


FIGURE 40 – Diagramme de Ragone comparant les Polymères Renforcés de Fibres (FRPs) à d'autres moyens de stockage d'énergie [Munoz-Guijosa et al., 2019]

7.2 Perspectives

Même si la maquette valide la fonctionnalité d'un SREC basé sur un ressort linéaire, elle ne permet pas de confirmer le bon fonctionnement du système plus complexe illustré à la Figure 22. De futures recherches pourraient, dans un premier temps, se pencher sur le prototypage en laboratoire du SREC contenant le ressort spiralé en acier. Pour cela, les calculs de prédimensionnement, la représentation schématique et l'analyse de risques fournissent des informations utiles et mettent en lumière les points critiques du système.

Concernant les mesures, il serait intéressant de tester le prototype avec un système simulant un parcours avec des start-stop fréquents. Pour les véhicules utilitaires légers à combustion interne et électriques, les cycles harmonisés pour la conduite urbaine et péri-urbaine existent (ex. world-wide harmonized light duty test cycle (WLTC)) et sont utilisés pour la certification des véhicules dans le monde [Tutuianu et al., 2015]. Un exemple d'un tel cycle est donné à la Figure 41.

Une même approche serait envisageable pour les vélos. En récoltant et en combinant un grand nombre de données sur la conduite de cyclistes, des cycles réalistes de conduite pourraient être obtenus. Appliqués au prototype préalablement créé, ceux-ci permettraient de juger la pertinence d'un système de freinage régénératif.

En complément au prototypage effectué, des simulations numériques pourraient être développées tenant compte des limites du SREC retenu (stockage maximum d'énergie, dissipation d'énergie, ...). Dans ce modèle, seraient injectées des données caractérisant de manière réaliste la conduite des cyclistes. Pour ce faire, deux solutions existent ; soit un vélo est muni d'équipement de mesure et enregistre le comportement de celui-ci pendant des tests de conduite [Lipowsky et al., 2017], soit les données d'un cycle de conduite harmonisé pour vélo, préalablement créé, sont utilisées. Cette alternative permettrait de simuler un grand nombre de situations (conduite urbaine, sur terrain plat ou vallonné, ...) et de déterminer la pertinence théorique du SREC avant prototypage.

La réduction du poids du système est l'autre enjeu majeur du SREC. Si les résultats de la modélisation ou des mesures réalisées sur le prototype montrent un bénéfice potentiel élevé, la création

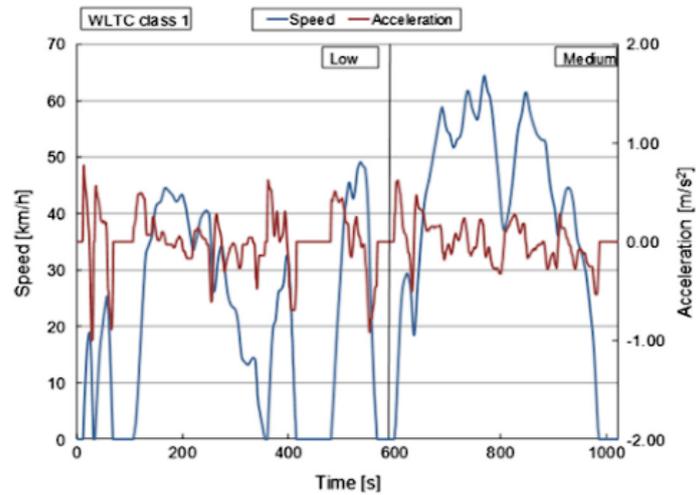


FIGURE 41 – Exemple d'un cycle de conduite automobile [Tutuianu et al., 2015]

d'un système contenant un ressort en matériau composites prend tout son sens. Le développement industriel de ressorts à base de PRF de carbone est un des grands défis de la conception : malgré leur densité énergétique élevée par rapport aux ressorts en acier, leur développement n'en est qu'à ses prémices.

Finalement, dans une logique de cohérence par rapport au contexte général de ce travail, une analyse de cycle de vie (ACV) devrait être menée pour déterminer le bilan environnemental du produit. Celle-ci pourrait, in fine, déboucher sur un écolabel qui détermine la qualité environnementale du SREC.

8 Conclusion

Les premières étapes du design conceptuel ont permis de distinguer cinq solutions pouvant potentiellement répondre à l'objectif principal du SREC. Un système comprenant un volant d'inertie, un ressort en spirale, un ressort linéaire, un moteur à palettes réversible et une masse dans le cadre ont été analysés et caractérisés en fonction des critères de performance basés sur le CDC. Les critères déterminants lors de la comparaison sont la capacité de conservation énergétique de 1500 J , le rendement de 70 % et le poids de 3 kg imposés. Malgré un poids légèrement supérieur aux exigences, le SREC sur base d'un ressort en spirale, possédant un rendement théorique de 84 % et une capacité énergétique supérieure à 1500 J , est retenu suite à l'évaluation absolue.

Un prédimensionnement du SREC retenu a permis la caractérisation plus approfondie des performances du système et la validation du niveau de sûreté. Finalement, un ressort de raideur 62,5 $\frac{N}{mm}$, de rayon extérieur de 110 mm et de poids 2,48 kg est calculé. De plus, un schéma cinématique et une analyse de risque ont permis de visualiser l'agencement des différents composants et de mettre en lumière les points du système qui méritent une attention particulière.

La maquette a validé la fonctionnalité d'un SREC possédant un système de conservation d'énergie à base d'un ressort de traction, a permis de tester et d'analyser le comportement des pièces dans l'espace, de prendre des mesures et d'extrapoler celles-ci. La différence entre le rendement réel (51 %) et le rendement théorique de la maquette (68%) est due aux pertes d'énergie lors de la transmission mécanique. Un prototype construit avec des matériaux adéquats et correctement lubrifié permettrait d'obtenir un rendement total proche de 70%.

Vu du rendement intéressant, et de la facilité d'utilisation, le SREC purement mécanique proposé dans ce travail s'avère être une solution prometteuse d'assistance à court terme. Le SREC à base du ressort spiralé, composé d'un matériau plus léger et performant en termes de densité énergétique, répondrait à tous les critères de performance. Les ressorts en PRF de carbone, avec leur grande rigidité, leur raideur spécifique élevée et leur densité énergétique de deux ordres de grandeur supérieur aux ressorts en acier, mériteraient de faire l'objet de recherches futures.

9 Bibliographie

- [LZB, 2017] (2017). *Air motors*. Atlas Copco. LZB22-RL-A005-11.
- [WOB, 2020] (2020). *Compressors, Vacuum and Liquid Pumps*. Thomas. WOB-L 8900D.
- [Ahmed et al., 2007] Ahmed, H. B., Multon, B., Bernard, N., and Kerzreho, C. (2007). Le stockage inertiel électromécanique. *Revue 3EI*, 48 :18–29.
- [Alami, 2020] Alami, A. H. (2020). *Mechanical Energy Storage for Renewable and Sustainable Energy Resources*.
- [Amiryar and Pullen, 2017] Amiryar, M. E. and Pullen, K. R. (2017). A Review of Flywheel Energy Storage System Technologies and Their Applications. *Applied Sciences*, 7(286).
- [Aneke and Wang, 2016] Aneke, M. and Wang, M. (2016). Energy storage technologies and real life applications – A state of the art review. *Applied Energy*, 179 :350–377.
- [Anglade and Horsin, 2017] Anglade, B. and Horsin, H. (2017). Engrenages , conditions d ’ engrènement et procédés d ’ obtention.
- [Arai et al., 2019] Arai, Y., Sakuraba, T., Sano, S., Sakaguchi, T., and Uchiyama, N. (2019). Design and Experimental Verification of a Regenerative Brake System with a Spiral Spring and Gears. In *International Synopsium on System Integration*, pages 729–733.
- [Ashby, 2005] Ashby, M. F. (2005). *Materials Selection in Mechanical Design*. Elsevier, Oxford, 3 edition.
- [Bakay, 2012] Bakay, L. (2012). *Dimensionnement et pertes dans un centreur magnétique guidant un volant d’inertie soumis à un balourd : Application au stockage d’énergie de longue durée*. PhD thesis.
- [Beltramin, 2018] Beltramin, L. (2018). *State-of-the-Art of the Flywheel / Li-ion Battery Hybrid Storage System for Stationary Applications*. PhD thesis.
- [Cao and Emadi, 2012] Cao, J. and Emadi, A. (2012). A New Battery / Ultra-Capacitor Hybrid Energy Storage System for Electric , Hybrid and Plug-in Hybrid Electric Vehicles. *IEEE Transaction on Power Electronics*, 27(1) :122–132.
- [Chiu et al., 2007] Chiu, C.-h., Hwan, C.-L., Tsai, H.-S., and Lee, W.-P. (2007). An experimental investigation into the mechanical behaviors of helical composite springs. *Composite Structures*, 77 :331–340.
- [Collignon and Schöpfel, 2016] Collignon, A. and Schöpfel, J. (2016). Méthodologie de la Gestion Agile d’un Projet. Scrum - Les Principes de Base. *I2D – Information, données & documents Pratiques & recherches*, 53 :12–15.
- [da Rosa, 2009] da Rosa, A. V. (2009). *Fundamentals of Renewable Energy Processes*. 2 edition.
- [Duncan Rogers, 2020] Duncan Rogers (2020). Atlas copco parts list. <https://www.duncanrogers.com/>. [en ligne : accès en avril 2020].
- [Ehsani et al., 2005] Ehsani, M., Gao, Y., Gay, S. E., and Emadi, A. (2005). Fundamentals of Regenerative Braking. In *Modern Electric, Hybrid Electric and Fuel Cell Vehicles : Fundamentals, Theory and Design*, pages 333–343. CRC Press.
- [Hao et al., 2015] Hao, S., Cui, L., Guo, F., and Liu, Y. (2015). Achieving large linear elasticity and high strength in bulk nanocomposite via synergistic effect. *Scientific Reports*, 5(8892).

-
- [Hill et al., 2014] Hill, F. A., Havel, T. F., Lashmore, D., Schauer, M., and Livermore, C. (2014). Storing energy and powering small systems with mechanical springs made of carbon nanotube yarn. *Energy*, 76 :318–325.
- [Ibrahim et al., 2013] Ibrahim, H., Ilinca, A., Perron, J., and Merabet, A. (2013). Modeling and Simulation of a Novel Small- Scale Compressed Air Hybrid System for Stand- Alone Off-Grid Applications.
- [IRENA, 2017] IRENA (2017). Electricity storage and renewables : costs and markets to 2030. Technical Report October, IRENA.
- [Johansson et al., 2010] Johansson, B., Trajkovic, S., and Tunestal, P. (2010). Vehicle Driving Cycle Simulation of a Pneumatic Hybrid Bus Based on Experimental Engine Measurements. *SAE Technical Paper*.
- [Kannengiesser et al., 2017] Kannengiesser, U., Gero, J. S., and Gmbh, I.-s. (2017). Can Pahl and Beitz’ systematic approach be a predictive model of designing? *Design Science*, 3 :1–20.
- [Ke et al., 2019] Ke, J., Wu, Z.-y., Chen, X.-y., and Ying, Z.-p. (2019). A review on material selection , design method and performance investigation of composite leaf springs. *Composite Structures*, 226.
- [Lan et al., 2012] Lan, C.-C., Cheng-Wei, C., and Chun-Yi, T. (2012). Modeling and Design of Air Vane Motors for Minimal Torque Ripples. *Journal of Mechanical Design*, 134.
- [Lemofouet and Rufer, 2006] Lemofouet, S. and Rufer, A. (2006). A Hybrid Energy Storage System Based on Compressed Air and Super Capacitors with Maximum Efficiency Point Tracking (MEPT). *IEE Transactions on Industrial Electronics*, (4) :1105–1115.
- [Lipowsky et al., 2017] Lipowsky, T., Stegmaier, J., and Lang, M. (2017). Simulative Potential Assessment of Regenerative Braking with Electric Bicycles under Consideration of Realistic Boundary Conditions. In *Conference on Research and Education in Mechatronics*, pages 1–7.
- [Maia et al., 2015] Maia, R., Silva, M., Araújo, R., and Nunes, U. (2015). Electrical vehicle modeling : A fuzzy logic model for regenerative braking. *Expert Systems With Applications*, 42(22) :8504–8519.
- [MENJ, 2020] MENJ (2020). Design, innovation et créativité : critères et niveaux du cahier des charges. <https://eduscol.education.fr/sti/sites/eduscol.education.fr.sti/files/ressources/pedagogiques/10020/10020-dic-1-2-c2b-mf-criteres-niveaux-cdc.pdf>, [en ligne : accès en mars 2020].
- [MIT, 2020] MIT (2020). Mechanical, industrial and technical calculations. <http://www.mitcalc.com/en/products.htm>. [en ligne : accès en mars 2020].
- [Moura et al., 2010] Moura, S., Siegel, J. B., Siegel, D. J., and Stefanopoulou, A. G. (2010). Education on Vehicle Electrification : Battery Systems , Fuel Cells , and Hydrogen. Number October.
- [Muetze and Tan, 2007] Muetze, A. and Tan, Y. C. (2007). Electric Bicycles : A performance evaluation. *IEEE Industry Applications Magazine*, 13(4) :12–21.
- [Munoz-Guijosa et al., 2019] Munoz-Guijosa, J. M., Zapico, G. F., Peña, J. D., and Echávarri, J. (2019). Using FRPs in elastic regime for the storage and handling of mechanical energy and power : Application in spiral springs. *Composite Structures*, 213 :317–327.
- [Odhams et al., 2010] Odhams, A. M. C., Roebuck, R. L., Lee, Y. J., Hunt, S. W., and Cebon, D. (2010). Factors influencing the energy consumption of road freight transport. *Journal of Mechanical Engineering Science*, 224 :1995–2010.
- [O’Keefe Controls co., 2003] O’Keefe Controls co. (2003). Choked Flow of Gases Metal Orifice Air Flow – SCFH.
-

- [Pahl et al., 2007] Pahl, G., Beitz, W., Feldhusen, J., and Grote, K. (2007). Introduction. In : Engineering Design. *Springer*.
- [Pinch and Kuhn, 2020] Pinch, W. and Kuhn, P. (2020). Composite Suspension Leaf Springs : The Smart Solution. *SAE Technical Paper*.
- [Raucent, 2013] Raucent, B. (2013). MECA 2801 : Machine design.
- [Sabihuddin et al., 2015] Sabihuddin, S., Kiprakis, A. E., and Mueller, M. (2015). A Numerical and Graphical Review of Energy Storage Technologies. *Energies*, 8 :172–216.
- [Sardou, 2018] Sardou, M. (2018). Composite Springs for : Suspension Vehicles, Spacecraft Stage Separation, and Satellite Ejection on Orbit. *SAE Technical Papers*, April.
- [SinkFloatSolutions, 2020] SinkFloatSolutions (2020). Sinkfloatsolutions : Deep ocean gravitational energy storage. <http://sinkfloatsolutions.com>. [en ligne : accès en mai 2020].
- [Tutuianu et al., 2015] Tutuianu, M., Bonnel, P., Ciuffo, B., Haniu, T., Ichikawa, N., Marotta, A., Pavlovic, J., and Steven, H. (2015). Development of the world-wide harmonized light duty test cycle (wltc) and a possible pathway for its introduction in the european legislation. *Transportation Research Part D : Transport and Environment*, 40 :61 – 75.

10 Annexes

A Cahiers des charges

Tableau 8 – CDC de la trieuse de carottes

Cahier des charges de la trieuse de carottes		
Contexte : Proposer une machine aux agriculteurs/ distributeurs permettant de trier les carottes récoltées en fonction de leur taille.		
Date	Origine	
12/02	S. Malvaux	FONCTIONS PRINCIPALES FP 1 : Trier les carottes
12/02	S. Malvaux	CRITERE ET NIVEAUX DES FONCTIONS PRINCIPALES CP 1.1 La machine doit avoir une capacité de tri de 10 T/h. CP 1.2 La machine doit être compatible pour toutes les variétés de carottes. CP 1.3 Le diamètre des carottes à trier se situe entre 10-35 mm. CP 1.4 La machine élimine les carottes qui ont une fourche.
15/02	S. Malvaux	FONCTIONS DE CONTRAINTE FC 1 : Conditions d'arrivée
12/02		FC 2 : Taille de salle de tri
12/02		FC 3 : Facilité d'installation et d'utilisation
15/02		FC 4 : Conditions de sortie
12/02		FC 5 : Nuisances
12/02	S. Malvaux	CRITERES ET NIVEAUX DES FONCTIONS DE CONTRAINTE CC 1.1 Les carottes arrivent en caisses de 1 m ³ et sont déposées sur un tapis roulant.
15/02		CC 2.1 La taille du local de tri est de 100 m ² .
12/02		CC 2.2 Le local de tri doit être équipé d'une alimentation en électricité de type 3-phase.
12/02		CC 3.1 Un manuel technique doit permettre à l'utilisateur d'installer et entretenir la machine sans assistance.
12/02		CC 3.2 Le nettoyage et l'entretien de la machine se fait à l'eau.
12/02		CC 3.3 Temps de nettoyage doit être court : 5 minutes maximum.
12/02		CC 4.1 La terre est évacuée dans des caisses de 1m ³ .
12/02		CC 4.2 Les eaux usées doivent passer par système de filtration pour extraire la terre.
15/02		CC 4.3 Les carottes sont subdivisées en maximum 3 groupes (diamètre + longueur) de taille différentes (choix de l'opérateur) et stockées dans des caisses de 1m ³ .
12/02		CC 4.4 Les carottes non conformes sont séparées dans un autre caisse de 1m ³ .
12/03		CC 5.1 Le bruit généré par l'installation doit être inférieur à 75 dB.

Tableau 9 – CDC du SREC appliqué au vélo

Cahier des charges du Système de Récupération d'Énergie Cinétique (SREC) appliqué au vélo	
Contexte : Proposer un système/kit permettant de récupérer l'énergie dissipée pendant le freinage d'un vélo et de la restituer pour assister le cycliste lors du (re)démarrage.	
Date	Origine
27/02	S. Malvaux
<p>FONCTIONS PRINCIPALES</p> <p>FP 1 : Récupération de l'énergie cinétique. FP 2 : Stockage de l'énergie. FP 3 : Restitution de l'énergie stockée. FP 4 : Décharge/ dissipation lors du dernier parking.</p>	
27/02	S. Malvaux
<p>CRITERES ET NIVEAUX DES FONCTIONS PRINCIPALES</p> <p>CP 1.1 Le cycliste est initialement en mouvement et freine. CP 1.2 L'enclenchement de la récupération de l'énergie se fait automatiquement dès que le cycliste freine. CP 1.3 La récupération se fait de manière instantanée. CP 1.4 La récupération a lieu au niveau moyeu/ roue/ système freinage. CP 1.5 La récupération est testée sur un circuit de référence. CP 1.6 Le système de récupération freine le vélo.</p>	
08/04	
<p>CP 2.1 Le stockage se fait à l'aide d'un système mécanique CP 2.2 L'énergie est stockée en modifiant des pièces existantes ou en ajoutant des pièces nouvelles au vélo à endroit qui doit être défini CP 2.3 Le temps de stockage est court (quelques secondes), lorsque le cycliste est en activité</p>	
23/03	
<p>CP 3.1 La restitution se fait au moyen d'une traction ou propulsion (roue arrière ou avant) CP 3.2 La restitution est progressive. CP 3.3 La vitesse maximale de restitution est de 20 km/h.</p>	
<p>CP 4.1 Quand le cycliste arrête son activité, il doit y avoir dissipation (sous forme de chaleur) de l'énergie emmagasinée</p>	
27/02	S. Malvaux
<p>FONCTIONS DE CONTRAINTE</p> <p>FC 1 : Type de vélo FC 2 : Caractéristiques du système FC 3 : Ergonomie FC 4 : Matériaux adaptés FC 5 : Sécurité du cycliste FC 6 : Utilisation simple FC 7 : Prix</p>	
	S. Malvaux
<p>CRITERES ET NIVEAUX DES FONCTIONS DE CONTRAINTE</p> <p>CC 1.1 Le système est inséré sur un vélo de ville existant sans assistance électrique (start-stop fréquents) CC 1.2 Le poids du vélo est de 10 à 18 kg non chargé, son poids total maximal (vélo+cycliste) est 140 Kg. CC 1.3 La vitesse maximale est 60 km/h.</p>	
09/04	
<p>CC 2.1 Le système pèse maximum 3kg CC 2.2 Le système est pensé de manière à maximiser l'utilisation des pièces déjà présentes sur le vélo (cadre, roues, ...)</p>	
<p>CC 3.1 Le mécanisme remplace des pièces existantes ou est constitué de nouvelles pièces tout en minimisant la place prise sur le vélo</p>	
<p>CC 4.1 Les pièces du système sont adaptées à l'environnement : aux températures (de -10°C à 40°C), à la pluie, sel, ... CC 4.2 Les composants sont récupérés d'autres systèmes ou recyclés. CC 4.3 En fin de vie : les matériaux doivent être recyclables</p>	
<p>CC 5.1 Le déclenchement de la restitution se fait de façon manuelle pour éviter propulsion non souhaitée CC 5.2 Un système d'arrêt, empêche la restitution en cas d'urgence/problème CC 5.3 Une attention particulière doit être apportée aux pièces tournantes/ chaudes : elles doivent être inaccessibles en fonctionnement et accessibles à l'arrêt</p>	
<p>CC 6.1 Le système est facile à mettre en place CC 6.2 L'entretien et les réparations du système sont aisées</p>	
08/04	
<p>CC 7.1 Contrainte budgétaire = 300€</p>	

B Graphe morphologique du SREC

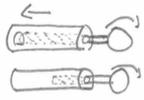
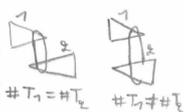
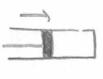
SOLUTION FT	1	2	3	4	5	6
TRANSFORMATION MOUVEMENT LINEAIRE ↕ ROTATION	 BIELLE - MANIVELLE	 VIS + ECROU	 CREMAILLIÈRE	 CABLE + BOBINE	 ARBRE A CAME	 MOTEUR BIDIRECTIONNEL
GUIDE DU MOUVEMENT	 GAINE	 COULISSEAU	 GLISSIÈRE	 ROULEMENT A BILLES	 PALER A COUSSINETS	
DEMUTLIPLICATION REDUCTION DU MOUVEMENT	 ENGRENAGES DE TAILLES DIFFERENTES	 $\#T_1 = \#T_2$ $\#T_1 \neq \#T_2$ REGULATEURS CONIQUES TRAPEZOIDaux	 TRAIN EPICYCLOIDaux	 VIS SANS FIN		
INVERSER	 ENGRENAGES	 COURROIE CROISEE	 INVERSER SANS CROISER COURROIE			
COMPRESSION	 PATINS	 DISQUES	 PISTON			

FIGURE 42 – Graphe morphologique du SREC appliqué au vélo (2/2)

C Caractéristiques du matériau constitutif du ressort en spirale

Caractéristiques matériel	Symbole	Valeur	Unité
Matériau	acier SS1870		
Module d'élasticité en tension	E	206000	MPa
Module d'élasticité en compression	G	78500	MPa
Densité	ρ	7850	kg/m^3
Résistance limite à la traction	R_m	1580	MPa
Contrainte maximale en flexion	σ	1106	MPa
Contrainte maximale en torsion	τ	790	MPa

D Caractéristiques du ressort de traction du prototype

Caractéristiques	symbole	valeur	unité
diamètre du fil	d	1,3	mm
diamètre moyen du ressort	D	11	mm
nombre de spires actives	n	91	
constante de raideur	k	313	$\frac{N}{m}$
masse du ressort	m	30	g