\documentclass{article}

\usepackage[utf8]{inputenc}

\usepackage{natbib}

\usepackage{graphicx}

\usepackage{enumitem}

\usepackage{amsmath}

\usepackage[english,francais]{babel} %dernière langue est la principale

\usepackage[a4paper]{geometry}% RÃ©duire les marges

\usepackage{cancel}%pour barrer du texte

\usepackage{caption}

\pagestyle{headings} % Pour mettre des entÃªtes avec les titres

% des sections en haut de page

\graphicspath{ {C:/Users/julien/Documents/Julien/X/PSC/final/imagesRapport/} }

\begin{document}

\title{PSC\\Coupe de France de Robotique}

\title{MEC11 Rapport final}

\author{Julien Agier, Hamza Chaquiq Elbadre, Raphaël Colson\\Maxime Escande, Yahya Ibenbrahim}

\date{23 Avril 2019}

\maketitle

\tableofcontents

%% J'ai ajouté trois packages et il manque la subsection{Design Control}

\section{Executive summary}

LAPIN\\

LAPIN\\

LAPIN\\

LAPIN\\

LAPIN\\

\section{Introduction}

La coupe de France de robotique est une compétition de robotique amateur qui a lieu chaque année et dont la participation fait l'objet d'un PSC régulièrement depuis la X2014. Pour l'anecdote, une équipe de l'Ecole Polytechnique a même gagné en 1998. La Coupe de France de robotique consiste en une série de matchs opposants deux robots au cours desquels ceux-ci doivent accomplir un certain nombre d'action comme envoyer une balle ou empiler des cubes. Au plus une action est ardue, au plus elle rapporte de points. Il est important de noter que si le format de la coupe consiste en des matchs, la philosophie du jeu et le règlement font qu'une stratégie pour gagner ne peut pas consiste à gêner son adversaire. En effet, la plupart des éléments de jeu sont en doubles pour que les deux robots puissent réaliser les mêmes actions de manière simultanée et par ailleurs, le règlement stipule que pour qu'un robot puisse participer à la coupe, il doit être homologué, soit avoir passé un test qui vérifie entre autre que le robot s'arrête avant de rencontrer un autre robot. Pour résumer, une bonne stratégie consiste à avoir un robot capable d'obtenir un maximum de points tout en réduisant les chances de trop souvent rencontrer le robot adverse ce qui est au pire un risque d'élimination en cas de collision et au mieux une perte de temps pouvant entraîner un changement de trajectoire intempestif.\\

Toutefois, une particularité de la coupe de robotique est que les règles, au sens des actions que doit accomplir le robot, changent chaque année pour que les participants doivent réinventer leur technologies d'une année à l'autre. Cependant, on observe sur les dernières années que certaines règles, en particulier celles concernant le format des matchs et du robot varient peu. Par exemple, les dimensions de la table de jeu sont systématiquement de 3m par 2m, les dimensions maximales du robot sont elles aussi toujours les mêmes.\\

En définitive, l'expérience montre que les équipes les plus performantes ne créent pas un robot ex-nihilo mais se contentent plutôt d'adapter leur travail précédent. La performance à une édition particulière de la coupe une fois ce travail réalisé passe alors avant tout par le choix d'une stratégie efficace et un temps accru pour la réalisation des actionneurs à mettre sur la base déjà construite.\par

C'est justement là la stratégie que nous souhaitons adopter dans ce projet en construisant un châssis mobile adaptable selon les besoins que rencontreront les équipes ultérieures pour qu'elles puissent petit à petit, en accumulant de l'expérience monter dans les classements. C'est autour de cet intérêt que s'est formé notre équipe de deux groupes de PSC distincts travaillant sur un même projet. Notre groupe est en charge de la partie mécanique du robot tandis que le groupe INF09 s'occupe de la partie Software du robot.

\section{Notre projet}

\subsection{Étude du règlement de l'édition 2019}

\subsection{Stratégie et objectifs}

blabla\\

%partie julien

Comme nous l'avons vu en introduction, pour qu'un robot puisse être performant à la coupe de France de robotique, il est intéressant que son développement se fasse sur plusieurs années. L'exemple de nos prédécesseurs, les X2016, nous a montré qu'il était possible de construire un système capable de marquer des points à la coupe, mais que cependant, vouloir à tout prix réaliser des actions rapportant un grand nombre de points se faisait finalement au détriment de l'amélioration d'autres points techniques du robot, comme par exemple son odométrie, sa capacité du robot à mesurer sa position relative au fur et à mesure de son mouvement, ce qui peut poser des problèmes pour réaliser des actions nécessitant un positionnement précis.\par

Ces difficultés rencontrées nous ont encouragées à repartir une nouvelle fois de zéro pour la base roulante, avec l'idée de ne pas se concentrer sur des actionneurs complexes, comme en témoigne la stratégie retenue. Nous nous sommes ainsi fixés deux objectifs : premièrement, réaliser une base roulante adaptable, facile d'utilisation et douée d'une odométrie précise que l'on puisse transmettre pour évolution aux années suivantes et deuxièmement d'utiliser et d'adapter notre base roulante au déplacement d'atomes pour pouvoir adopter la stratégie que nous avons choisie lors de la coupe de France de robotique.\\

Pour être en mesure de remplir ces objectifs, nous avons choisi de jalonner l'année avec des échéances précises correspondant à des livrables de notre démarches industrielle présentée dans la partie suivante, pour pouvoir être capables d'anticiper en cas de dérive, nous avons donc réalisé le planning suivant :

\begin{figure}[h!]

\centering

%\includegraphics[scale=1]{Images/timeline1.jpg}

%\caption{Première timeline, définition de jalons temporels précis en accord avec les plans de design control détaillé en partie 3.4}

%\label{fig:timeline1}

\end{figure}

Cependant, au fur et à mesure de l'année nous avons été forcés de constater que certaines tâches étaient plus laborieuses que prévues, nous aurons l'occasion d'en préciser quelques unes dans la suite de ce document. Nous nous sommes ainsi retrouvés face au choix suivant : chercher à tout prix à raccrocher au planning pour tâcher d'avoir un robot capable de participer à le coupe, ou bien prendre le risque de ne pas avoir de machine satisfaisante à la coupe pour mûrir au mieux le design de la base roulante et maximiser les chances de pouvoir transmettre un système satisfaisant et polyvalent. Dans un souci de cohérence avec notre premier objectif, nous avons fait le choix de la deuxième option ce qui nous a conduit à repenser notre planning pour parvenir à la version suivante :

\begin{figure}[h!]

\centering

%\includegraphics[scale=1]{Images/Bouftonblanc.jpg}

%\caption{Deuxième version de la Timeline après recentrage des objectifs fin Janvier}

%\label{fig:timeline2}

\end{figure}

\subsection{Cadre du projet}

\section{Choix structurels et réalisation}

\subsection{Plateau de jeu}

\subsection{Structure générale du robot}

Pour réaliser un système capable de réussir un maximum d'actions de la coupe, il est important de bien réfléchir à la forme générale que l'on souhaite donner au robot, à la disposition et au nombre de moteurs et à tous les autres petits détails structurels généraux qui auront un impact direct sur les capacités du robot. La solution la plus adaptée pour réussir cette tâche au mieux nous à semblée consister à analyser les capacités basiques que nous souhaitions donner au robot, puis à trouver quelle solution technologique nous permettait d'y arriver au mieux.\\

Commençons donc par définir les besoins structuraux. Pour pouvoir effectuer un déplacement quelconque sur l'aire de jeu, c'est-à-dire partir d'un point A avec une orientation A et arriver en un point B avec une orientation B, il suffit au robot d'être capable d'avancer, de reculer, de tourner et de mesurer ses mouvements de manière assez précise. Ces déplacements autoriseraient au systèmes les mêmes capacités de mouvements qu'une voiture de tous les jours, ce qui implique comme chacun s'en rend bien compte que certains déplacements pourraient nécessiter des man\oe uvres parfois complexes dans l'éventualité ou des obstacles seraient gênants. Les man\oe uvres, si elles ne sont pas difficiles à programmer sur le papier génèrent pourtant plusieurs problèmes comme une distance et un temps de déplacement accrus ou des chances plus grandes de voir sa trajectoire altérée par une rencontre avec le robot adverse ou un choc sur un obstacle. Ainsi, elles sont à proscrire ou en tout cas à limiter au maximum, ce qui peut se faire facilement par l'ajout d'une capacité supplémentaire : celle de tourner sur place, c'est-à dire que le système soit capable de faire un tour sur lui même sans heurter d'obstacles fixes et ce quelle que soit la disposition des obstacles.\par

Pour terminer, comme expliqué dans les premières parties de ce document, la table de jeu de la coupe de France de robotique a des dimensions de 2m par 3m, chaque match ayant une durée de 100s, on comprend que la vitesse ou l'endurance du robot n'est pas le point clef, en effet, les actions à effectuer ne nécessitent généralement pas de traverser la table de bout en bout le plus de fois possibles ainsi même une vitesse faible de $10\, \text{cm}\,s^{-1}$ permet de faire la grande traversée en 30s environ ce qui laisse déjà un temps important pour effectuer des actions et marquer des points. Ainsi, l'enjeu n'est pas de mettre l'accent sur la vitesse mais sur l'efficacité de déplacement sous-entendu qu'un déplacement efficace ne heurte pas d'obstacle et amène précisément à la position souhaitée.\\

\subsubsection{Moyen de locomotion}

Une fois que les besoins à remplir sont définis, il reste à trouver le meilleur moyen pour le faire. Nous avons fait le choix de d'abord choisir le moyen de déplacement avant d'arrêter la forme de la structure, celle-ci pouvant être influencée par le moyen de locomotion.\par

Il existe de nombreuses manières de faire se déplacer un robot. Certaines sont classiques, comme le recours à des roues basiques ou bien des chenilles comme on peut en trouver sur les chars d'assaut et d'autres sont plus originales comme c'est par exemple le cas avec les roues holonomes permettant des trajectoires de nature très complexes avec en particulier des translations dans n'importe quelle direction sans rotation du robot, ou avec les innovations comme celles du secteur de la soft robotique à la recherche de méthode de déplacements plus proches de méthodes se rencontrant dans la nature.

%https://www.autodesk.com/redshift/caterpillar-robot/

%https://www.ted.com/talks/giada\_gerboni\_the\_incredible\_potential\_of\_flexible\_soft\_robots/up-next

\par

Si les innovations portées par la soft robotique ferons sans aucun doutes partie du paysage futur de la robotique, il n'en demeure pas moins qu'elles en sont encore aujourd'hui au stade de la recherche et font appel à des matériaux innovant et souples dont la maîtrise n'est pas à notre disposition. Pour cette raison, nous avons décidé de rester sur des moyens de locomotions plus classiques ayant déjà fait leurs preuves à la coupe de France. Les chenilles quant à elles ont un réel avantage sur des terrains avec de fortes irrégularités, ce qui n'est pas le cas du plateau de jeu de la coupe. On peut même imaginer qu'un robot capable de monter trop facilement sur des obstacles, ce qui dans notre édition pourrait être des atomes serait finalement désavantagé en augmentant son risque de basculer ou de rester coincé. Pour terminer sur le cas des chenilles, le fait que celles-ci aient une grande surface de contact avec le sol empêche de réaliser une rotation sur place ce qui achève de les écarter.\par

Ainsi, notre raisonnement nous amène à privilégier à ce stade des roues holonomes ou classiques. Étudions maintenant le cas des roues holonomes. D'origine suédoise, ce système de roues permet, une fois bien maîtrisé de réaliser des trajectoires d'une complexité et d'une fluidité impressionnante. Il n'en demeure pas moins que certains inconvénients nous ont pourtant rebutés. En effet, Les roues holonomes sont relativement difficiles à faire fonctionner si l'on en croit les essais de différentes équipes de la coupe qui mettent généralement plus d'un an à intégrer de manière efficaces des roues holonomes à leur robot. Le format de la coupe à l'Ecole polytechnique consistant plus en une expérience transmise sur un an au maximum, le choix de roues holonomes nous a paru ne pas aller dans le sens de nos objectifs. Par ailleurs, lors d'un déplacement avec des roues holonomes, la nature des trajectoires étant assez complexes, il n'est pas évident de parvenir à l'analyser pour pouvoir nourrir l'odométrie avec, ainsi l'asservissement des trajectoires dont nous parlerons dans la dernière partie se serait lui aussi vu complexifié. Pour ces deux raisons, nous avons décidé de ne pas retenir les roues holonomes. \\

En définitive, notre choix se porte sur des roues classiques, il reste cependant à en choisir le nombre, la disposition et si certaines doivent être directionnelles. Les roues directionnelles se rencontrent au quotidien sur les voitures, les vélos et la liste est longue. Elle permettent un changement de direction efficace et précis profitant du fait qu'une roue génère une résistance de type frottement d'autant plus grande que son axe de rotation fait un angle important avec la direction orthogonale au déplacement. Cependant, comme nous l'avons fait remarquer plus haut, nous cherchons dans notre stratégie de déplacement à limiter au maximum les man\oe uvres, ce qui diminue les avantages des roues directionnelles. D'autres part, d'un point de vue plus pragmatique, équiper le robot de roues directionnelles est mécaniquement plus compliqué que des roues à axe fixe : il faut par exemple équiper chaque roue d'un servomoteur pour gérer la direction de l'axe où réaliser un système plus complexe encore de direction gérée par un seul servomoteur qui serait d'une certaine manière en charge de \emph{tourner le volant} comme le ferait le conducteur d'une voiture. Dans tous les cas, la complexité générée par des roues directionnelles vient modifier le système risquant ainsi de le rendre plus fragile, plus encombrant, et moins facile d'utilisation. Le problème est donc reformulé de la manière suivante : est-ce que le recours unique à des roues unidirectionnelles peut permettre de réaliser tous les mouvements souhaités?\par

Un rapide raisonnement permet de se rendre compte que si l'on souhaite éviter le glissement lors d'un déplacement dans une direction non orthogonale à l'axe de la roue, il n'est pas utile d'avoir plus de deux roues disposée selon le même axe. En effet, ajouter une roue supplémentaire aux deux déjà coaxiales n'aurait aucun intérêt moteur, et l'ajout d'une roue en dehors de cet axe s'opposerait soit à la rotation du robot soit à son déplacement en ligne droite selon son orientation. De plus, pour que le robot puisse être capable de tourner sur place, il est évident que l'axe des deux roues motrices doit être un \emph{diamètre} de la structure du robot (appellation abusive à ce stade puisque la forme de la base mobile du robot n'a pas encore était explicité).\\

Voilà qui conclue ce paragraphe sur le choix des roues motrices, nous allons maintenant expliquer l'un des choix technologiques les plus audacieux que nous avons retenu pour notre robot ainsi que les raisons qui nous y ont conduites avant de finir cette partie en résumant la manière dont tous les éléments peuvent être intégrés à la structure roulante et la forme que doit avoir celle-ci.

\subsubsection{Mesurer le déplacement indépendamment}

Comme nous avons déjà pu l'expliquer, nous souhaitons que notre base roulante soit douée d'une bonne odométrie capable d'effectuer un match même en l'absence de communication avec la caméra, c'est-à-dire même en l'absence de positionnement absolu. Pour ce faire, il faut que l'erreur, particulièrement l'erreur accumulée au cours du match par le robot soit toujours assez faible pour accomplir des actions. Nous allons maintenant essayer de voir comment le robot peut-avoir accès à sa position et quelle sont les sources d'erreurs principales permettant de quantifier la précision des mesures nécessaires.\\

Pour mesurer son déplacement, le robot doit parvenir à mesurer son mouvement par rapport au sol. Cela peut se faire soit de manière directe en mesurant la rotation du moteur et en multipliant par le rayon de la roue motrice, soit de manière indirecte en disposant des roues codeuses non reliées au moteurs et en contact avec le sol dont on quantifie la rotation. Dans les deux cas, les roues motrices et les roues de mesures doivent être sur le même axe pour que tout déplacement du robot se fasse orthogonalement à l'axe de rotation des roues codeuses.\\

Pour bien comprendre tous les aspects qui rentrent en compte dans ce questionnement, il est important de s'attarder à ce stade sur la notion d'hyperstatisme. On dit qu'un système est hyperstatique lorsqu'il est surcontraint. Pour se faire une idée, le lecteur pourra penser à une chaise à quatre pieds, trois points suffisant pour définir de manière non ambiguë un plan, à chaque instant, l'un des pieds n'est pas en contact avec le sol. Une chaise à trois pieds, elle, serait dit isostatique. Cependant, s'il n'est pas dérangeant pour une chaise d'avoir quatre pieds ce qui se contente de renforcer sa résistance et d'une certaine façon sa stabilité, il n'en va pas de même pour un robot sur lequel l'ensemble des points de contacts prévus doit forcément être en contact avec le sol. En effet, si une seule des deux roues motrices est en contact avec le sol, le robot aura une trajectoire incontrôlable et si une roue codeuse n'est pas en contact avec le sol c'est toute l'odométrie qui se verrait erronée.\\

Pour savoir quelle méthode de mesure, directe ou indirecte choisir, il est nécessaire d'avoir une idée d'où vient l'erreur et des précision nécessaires sur l'encodage. En notant $\alpha$ l'angle dont tourne une roue codeuse, R son rayon, $l$ a longueur entre le centre du robot et la roue codeuse, $\theta$ l'angle de rotation du robot et $L$ la distance parcourue sur un déplacement, on a :

Erreur finale due au déplacement de L :

\begin{equation\*}

\epsilon(L) = 2 dL = 2 R \text{u}(\alpha)

\end{equation\*}

Erreur finale due à la rotation de $\theta$ avant l'avancée de L:

\begin{equation\*}

\epsilon(\theta) = 2L\text{u}(\theta) \approx \frac{R}{l} L \text{u}(\alpha)\theta

\end{equation\*}

L'approximation venant du fait que l'on néglige l'incertitude sur les longueurs, soit :

\begin{equation\*}

\theta = \frac{R}{l}\alpha \text{, donc} \frac{\text{u}(\theta)}{\theta} = \sqrt{\cancel{ \left( \frac{\alpha}{R}\right)^2 \text{u}(R)^2} \, + \,\cancel{ \left( \frac{R\alpha}{l^2}\right)^2 \text{u}(l)^2 } \, + \, \left( \frac{R}{l}\right)^2 \text{u}(\alpha)^2 }

\end{equation\*}

Le point important à remarquer et que si l'erreur sur un déplacement en ligne droite est indépendante de la distance parcourue, il n'en va pas de même pour l'erreur due à une rotation qui elle est proportionnelle à la distance parcourue ce qui en fait la génératrice principale d'erreur au cours d'un match.\par

Pour un déplacement classique de coupe de France choisi arbitrairement à une distance de 4m parcourue avec 5 demi-tours et en souhaitant une erreur de moins de 5 cm à l'arrivée, on obtient (avec R=5cm et $l=15$cm des valeurs choisies pour être représentatives d'un robot de la coupe) :

\begin{equation\*}

\text{u}(\alpha) \approx \frac{5}{5} \; \frac{15}{3\cdot200\cdot\pi} = 2\pi \frac{1}{800}

\end{equation\*}

Il faut donc que l'encodage soit précis au moins au $1/800^{\text{ème}}$ de tour.\\

Par ailleurs, un conflit apparaît entre l'encodage et la motricité : pour que le robot puisse se déplacer efficacement, il faut qu'il ait une bonne surface de contact avec le sol au niveau des roues motrices soit des roues de grand rayon avec des pneus larges tandis que pour être précis dans l'encodage, il faut tendre vers un contact ponctuel permettant de minimiser l'erreur sur la longueur $l$ soit des roues très fines et de très petit rayon avec un pneu assez rigide pour minimiser l'incertitude sur $R$. La précision nécessaire sur l'encodage étant par ailleurs disponible sur une gamme très peu étoffée de moteurs, nous avons décidé de faire le choix d'un encodage indirecte en disposant deux roues codeuses sur le même axe que les moteurs (cf figure dans le paragraphe suivant) permettant ainsi d'optimiser indépendamment la motricité et l'encodage.\par

Cependant, un tel choix conduit notre base roulante à avoir au minimum 4 points de contacts nécessaires en permanence sur le sol et donc à être a priori hyperstatique. Pour pouvoir remédier à ce problème, il nous a fallu trouver une solution pour maintenir les quatre points de contact. Nous avons donc opté pour un système d'amortisseur à équiper sur les roues codeuses. nous avons tout d'abord essayer de réaliser un amortisseur très simple, une bride imprimée en PLA grâce à de l'impression 3D et censée se déformer mécaniquement, cependant la rigidité du PLA était trop importante et ne permettait pas de lever l'hyperstatisme de manière satisfaisante en conservant une pièce solide. Ainsi, dans un deuxième temps nous avons décidé de recourir à un système de liaison pivot avec un bras tenant le codeur et la roue qui serait rappelé vers le sol par un élastique.

\begin{figure}[h!]

\centering

\includegraphics[scale=0.5]{brideCodeuse}

\caption{Photo de la bride à déformation mécanique}

\label{fig:brideCodeuse}

\end{figure}

Par ailleurs, pour obtenir des roues codeuses correspondant au mieux à nos exigences, en particulier rayon et épaisseur faible et contact avec le sol de bonne adhérence, nous avons réalisé nous même les roues par impression 3D et pris un joint torique pour la bande de roulement. Après avoir étudié plusieurs matériaux de joints toriques, il est apparu que le matériaux grand commerce le plus adapté à nos besoins était le NBR70 plus ductile que les NBR80 et 90, il est le plus rigide permettant un bon contact de roulement en maintenant une déformation faible, soit un contact proche du ponctuel.

\subsubsection{Organisation de la base roulante}

Pour terminer cette partie, nous allons maintenant essayer de trouver la meilleure organisation pour la base roulante. Comme nous l'avons vu plus haut, nous souhaitons que le robot soit capable de tourner sur place sans heurter d'obstacles dans le mouvement. La seule forme qui peut garantir cela est un disque puisque c'est la seule forme dont l'espace occupé au sol est invariant au cours d'une rotation. Cependant, un disque présente plusieurs défauts. Tout d'abord, le règlement de la coupe impose une contrainte sur le périmètre du robot, la majorité des cartes, moteurs et autres composants à intégrer dans le robot étant proches de parallélépipèdes essayer de les agencer sur une surface circulaire aurait donc pour effet de perdre de l'espace utile.

\begin{minipage}{0.49\textwidth}

De plus, l'environnement dans lequel évolue le robot est une aire de jeu rectangulaire donc pour pouvoir se recaler sur un mur ou interagir avec les objets du plateau il peut-être utile d'avoir des côtés droits sur la structure. Un compromis nous a donc paru être un octogone, proche du cercle mais qui favorise tout de même l'intégration de composants et présente en particulier l'avantage d'avoir des côtés droits parallèles sur certains diamètres.\par

\end{minipage}

\begin{minipage}{0.49\textwidth}

\centering

\includegraphics[scale=1]{baseRoulante.png}

\captionof{figure}{Schéma de la base roulante}

\label{fig:baseRoulante}

\end{minipage}\\

Avec tous ses points de contacts sur un seul axe, le robot ne serait pas stable, il est donc nécessaire de lui ajouter des points d'appuis supplémentaires n'entravant pas son mouvement et n'aggravant pas l'hyperstatisme. La solution la plus simple que nous avons trouvé pour cela est inspirée de l'exemple de la chaise à 4 pieds. Imaginons que deux pieds en face l'un de l'autre soient légèrement plus courts que les deux autres. Le contact serait alors sur 3 points au plus les trois points comprenant toujours les deux pieds les plus longs. Il suffisait donc de disposer sur deux rotules, une à l'avant et une à l'arrière du robot et légérement plus hautes que les roues motrices. Ainsi lorsque le robot avance il s'appuiera sur ses roues motrices et la rotule avant et réciproquement avec la rotule arrière lorsqu'il recule.

\begin{figure}[h!]

\centering

\includegraphics[scale=1]{base3D.png}

\caption{Design3D de la base sans les brides}

\label{fig:base3D}

\end{figure}

Pour que l'architecture soit modulaire en accord avec nos objectifs exprimés plus haut, nous avons décidé d'opter pour une architecture par étage. L'idée est que tout ce qui est nécessaire à la base roulante soit regroupé dans l'étage du bas apportant une certaine masse permettant de descendre le sens de gravité du robot. Les actionneurs spécifiques permettant d'accomplir des tâches particulières seraient alors placés dans les étages supérieurs.

\subsection{Alimentation et schéma électrique}

\subsection{Motorisation}

Le bon choix des moteurs est un point important dans la réalisation d'un robot. En effet si les moteurs n'ont pas assez de couple, il sera très difficile pour le robot de se mouvoir à faible vitesse, de démarrer ou même de freiner efficacement. Si la vitesse de rotation est trop faible, le robot sera lent, si le moteur est sous-dimensionné il sera utilisé en sur-régime, ce qui peut être bénin pour une utilisation de courte durée comme critique si l'utilisation est en fait trop violente et entraîner la fonte de la gaine du bobinage et donc la destruction du moteur. En bref de nombreux paramètres sont à étudier lors du choix d'un moteur et à chaque utilisation il existe des moteurs de caractéristiques différentes plus ou moins adaptés.\par

Un dernier point d'importance qui à influencé le cadre de notre recherche de moteurs est que par l'intermédiaire de notre contrat de partenariat, nous avions accès à des fonds relativement élevés dont l'intérêt était justement de pouvoir investir dans des moteurs haut de gamme offrant de meilleures performances et des rendements plus élevés pour un encombrement moindre. Après quelques recherches, nous nous sommes rendu contre que la référence dans le domaine était la marque suisse \emph{Maxon Motors} qui offre par ailleurs la possibilité de composer son assemblage de moto-réducteur parmi un catalogue très fourni. Il ne nous restait alors plus qu'à estimer de manière précise et quantitatives les caractéristiques nécessaires pour nos moteurs.\\

Pour être sûrs que le robot soit capable d'appliquer des stratégies variables dépendant des règles des années suivantes, il est important que l'équipe souhaitant l'utiliser ne soit pas limitée par la vitesse du robot. Nous avons donc décidé que le robot devait être capable d'atteindre une vitesse de pointe de $0.5\text{m}\,\text{s}^{-1}$ lui permettant de traverser le plateau de jeu en comptant une phase d'accélération et de décélération en moins de 15s à 20s selon la trajectoire de vitesse choisie. Pour être plus sûrs de ne pas faire de bêtises, nous avons choisi de prendre une marge de 2, c'est-à-dire que les moteurs doivent être capables de faire avancer le robot à une vitesse d'au moins $1\text{m}\,\text{s}^{-1}$. Soit avec des roues de 6cm de de rayon :

\begin{equation\*}

\omega\_{\text{arbre moteur}} \geq136\text{rpm}

\end{equation\*}

L'autre paramètre à évaluer est le couple nécessaire pour remplir les requirements que nous avons choisis dans les SRS. Plus précisément deux phases peuvent fixer le couple minimal nécessaire, une accélération au démarrage et atteignant la vitesse de $0.5\text{m}\,\text{s}^{-1}$ en moins de 1s ou bien au moment d'un freinage d'urgence à pleine vitesse sur moins de 20cm. \par

Avant de chercher à trouver lequel de ces deux cas est le plus contraignant, il est intéressant de chercher à voir si l'hypothèse de roulement sans glissement reste toujours valable dans ces deux phases. On considère donc le modèle suivant :

\begin{figure}[h!]

\centering

\includegraphics[scale=0.5]{glissement.png}

\caption{Schéma du modèle d'étude de non glissement, R1 est une roue folle R2 est motrice}

\label{fig:CdtNonGlissement}

\end{figure}

En se plaçant dans le référentiel non galiléen du robot et en appliquant le PFD et le TMC en P1 et P2, on obtient que :

\begin{equation\*}

N\_2=\frac{mgl\_1}{D} - \frac{mah}{D}

\end{equation\*}

Le premier terme correspondant à un terme statique et le second à un transfert de charge. En écrivant ensuite la condition de non-glissement au niveau du contact roue2-sol et en notant f le coefficient d'adhérence, il vient :

\begin{equation\*}

a\_{\text{max}}\leq \frac{fgl\_1}{D+fh}

\end{equation\*}

En prenant un coefficient d'adhérence $f=0.7$ ce qui correspond à un pneu sur une route et permet d'avoir un ordre d'idées, on a alors dans le cas le plus défavorable où le centre de gravité est le plus excentré (soit $l\_1=l\_2=15cm$) $a\_{\text{max}}=2.8\text{m}\,\text{s}^{-2}$ hors nos deux valeurs précédentes valaient respectivement $a\_{\text{freinage}}=1.25\text{m}\,\text{s}^{-2}$ et $a\_{\text{accélération}}=0.5\text{m}\,\text{s}^{-2}$, on observe donc que nous sommes a priori bien en roulement sans glissement d'adhérence sur ces différentes phases.\\

On peut maintenant évaluer le couple minimal que doit avoir le moteur en sortie de réducteur (à noter que le facteur $1/2$ vient du fait qu'il y a deux roues et que l'application numérique est faite avec une masse de 8kg et une roue de 6cm de rayon) :

\begin{equation\*}

C\_{\text{min}} = a\_{\text{max}} \text{m} \frac{R\_{\text{roue}} }{2}= 0.35 \, \text{N}\text{m}

\end{equation\*}\par

Il ne reste donc maintenant qu'à choisir le moteur pour répondre à ces contraintes. Il existe deux technologies de moteurs électriques, les moteurs\emph{brushed} à l'intérieur desquels le changement de polarité permettant de maintenir le couple au cours de la rotation se fait dans l'enceinte du moteur par l'intermédiaire de petits patins qui viennent \emph{brosser} les parois, et les moteurs \emph{brushless} dans lesquels l'inversion de polarité est gérée électroniquement. Les moteurs \emph{brushless} n'ont presque que des avantages par rapport à des moteurs \emph{brushed} étant d'un meilleur rapport encombrement couple fourni et d'une plus grande résistance à l'usure du fait de l'absence des patins. Cependant, le fait que le changement de polarité doive être effectué électroniquement entraîne que le moteur \emph{bushless} est plus difficile d'emploi au sens où il nécessite des cartes de commandes bien spécifiques.\\

%http://electrathonoftampabay.org/www/Documents/Motors/Brushless%20DC%20%28BLDC%29%20Motor%20Fundamentals.pdf

Dans notre cas, les moteurs ne subiront pas une utilisation intensive et l'avantage des moteurs maxon est qu'ils sont réputés pour leur robustesse, l'argument de la durée de vie n'est pas à prendre en compte.\par

La question qui demeure dans le choix de la technologie des moteurs est donc la nature des cartes de commandes que nous souhaitons utiliser. Comme nous avons déjà pu le voir dans la partie schéma électrique et comme nous aurons l'occasion de le réexpliquer dans la partie suivante traitant de l'automatisation, notre robot pour une simplicité d'utilisation accrue est piloté par une carte arduino et une carte raspberry, deux micro-contrôleurs grands publics et open source conçus pour pouvoir être rapidement mis en \oe uvre. Cependant, les possibilités qu'ils intègrent ne sont pas infinis et il nous a en particulier semblé plus difficile, peut-être à tort car nous n'avons pas pu le tester, de gérer des driver pour moteur \emph{brushless} avec. En effet, le driver idéal était une carte éditée par maxon la epos 4

%https://www.maxonmotor.com/medias/sys\_master/root/8828280209438/536630-Hardware-Reference-En.pdf

qui offre la possibilité de piloter un moteur \emph{brushed} ou \emph{brushless} en intégrant même directement la partie asservissement. Le problème que nous avions avec cette carte est qu'elle ne pouvait contrôler qu'un seul moteur à la fois. Ainsi, son utilisation aurait soit complexifiée l'organisation décisionnelle du robot en séparant les décisions prises dans le contrôle de chaque moteur, soit consister en une sous-utilisation aberrante d'outils de qualité professionnel. Pour cette raison, nous avons décidé de réutiliser les même cartes de puissances que celles utilisées l'année passée. Cette carte offre en effet la possibilité de piloter les deux moteurs à la fois et communique très simplement avec l'arduino en recevant des informations sous forme de pwm (pulse width modulation) et en renvoyant aux moteurs un pwm de la tension de la batterie.

\begin{minipage}{0.49\textwidth}

\centering

\includegraphics[scale=0.2]{pwm.png}

\captionof{figure}{Exemple de signal PWM}

\label{fig:pwm}

\end{minipage}

\begin{minipage}{0.49\textwidth}

La technique de pwm consiste à moduler un signal avec un créneau irrégulier à haute fréquence, selon la forme du créneau envoyé, le récepteur analogique \emph{voit} un signal moyenné sous la forme d'un pourcentage de la tension d'entrée. Ainsi, les moteurs reçoivent en consignes un pourcentage de la tension convertie en sortie de la batterie et ce selon la consigne transmise par la carte arduino. A noter toutefois que si cette méthode possède l'attrait de la simplicité, il n'en demeure pas moins qu'elle ne fonctionne pas pour des moteurs \emph{brushless}.

%https://www.embedded.com/electronics-blogs/beginner-s-corner/4023833/Introduction-to-Pulse-Width-Modulation

\end{minipage}\\

Maintenant que le choix de la technologie des moteurs \emph{brushed} est fait, il reste à trouver le duo moteur-réducteur approprié. On parle en effet de duo moteur réducteur car les moteurs électriques ont généralement une vitesse de rotation très élevée doublée d'un couple très faible, il est donc le plus souvent utile de recourir à un réducteur, une série d'engrenages, qui va augmenter de le couple d'autant plus qu'il réduit la vitesse de rotation. Le dernier point nécessaire de connaître pour choisir le motoréducteur est sa tension de fonctionnement. Comme nous l'avons vu dans la partie précédente, la batterie avec laquelle nous souhaitons équiper notre robot est une 12V ou une 14V, il est donc logique de chercher un moteur dont la tension nominale ne dépasse pas 12V et tant qu'à chercher à maximiser la puissance des moteurs, autant opter pour des moteurs fonctionnant sur 12V.\par

Avec ces informations en tête et les valeurs calculées précédemment, nous sommes arrivés au choix d'un moteur de puissance nominale de 14W associé à un réducteur planétaire de rapport de réduction 44:1 et d'efficacité énergétique de 71\%. Ce choix s'est opéré en prenant le moteur 12V le plus puissant, et en l'équipant du réducteur le plus fort permettant de maintenir la vitesse de pointe souhaitée des 136 rpm de l'arbre moteur soit $44 \cdot 136 = 6000$ rpm pour l'axe du moteur. Les différentes valeurs calculées que nous serions amenés à demander au moteur sont récapitulés dans le tableau suivant et comparées aux valeurs nominales qui correspondent aux valeurs de fonctionnement normal.

\begin{figure}[h!]

\centering

\includegraphics[scale=0.4]{choixMoteur.png}

\caption{Confronations des valeurs estimées aux valeurs nominales}

\label{fig:choixMoteur}

\end{figure}

Pour terminer l'étude du choix des moteurs, il est intéressant de vérifier que les points de fonctionnement auxquels nous comptons utiliser les moteurs sont adéquats, c'est-à-dire qu'ils n'entraineront pas de surchauffe ou de dommage du matériel. Le graphique de fonctionnement du moteur est disponible sur le site de maxon.\\

\begin{figure}[h!]

\centering

\includegraphics[scale=0.2]{grapheMoteur.png}

\caption{Drive disposition du motoréducteur}

\label{fig:grapheMoteur}

\end{figure}\\

On constate sur la figure suivante que tous les points de fonctionnements sont dans des zones où le moteur opère sans risque de dommages. Seul le freinage d'urgence empiète sur la zone où le moteur est en fonctionnement légèrement sur-régime mais ces phases étant normalement exceptionnelles et de très courte durées, le moteur ne devrait pas avoir tendance à surchauffer et donc ce cadre d'utilisation parait tout à fait correct. On peut toutefois relever que les phases de freinage d'urgence, si elle ne demandent pas d'exploits de la part du moteur peuvent pour autant demander un courant très important à la batterie, mais l'étude réalisée dans la partie précédente montre que la batterie elle aussi peut tolérer des pics de consommation occasionnel, d'autant plus que ce point de fonctionnement est le plus dur possible puisqu'il a été calculé pour un cas où le robot est lancé à pleine vitesse.

\section{Automatisation}

\subsection{Asservissement}

\subsection{Capteurs de distance}

\subsection{Lien avec le groupe INF09}

\bibliographystyle{plain}

\bibliography{references}

\begin{figure}[h!]

\centering

%\includegraphics[scale=1]{Images/Bouftonblanc.jpg}

%\caption{Copiez ce code pour ajouter une figure. Ceci est un boufton blanc <3}

%\label{fig:universe}

\end{figure}

\section{Conclusion}

``I always thought something was fundamentally wrong with the universe'' \citep{adams1995hitchhiker}

\bibliographystyle{plain}

\bibliography{references}

\end{document}