



La construction de robots en éléments LEGO

Version: 1.3
9 Août 2004

par
Dean Hystad



Introduction à la version française

Ce document est une traduction d'un document américain disponible gratuitement sur le net à cette adresse :

<http://www.hightechkids.org/download.php?file=BLRforFLL-Version1.3.pdf>

Le document original, créé à l'intention des participants à la FIRST LEGO League (FLL), a une visée pédagogique. La FLL est une compétition par équipe de robotique basée sur le système Mindstorms de la société LEGO.

Nous remercions Dean Hystad pour son aimable collaboration.

Février2006

Didier Enjary
Philippe Hurbain

A propos de l'auteur et de ce document

Dean Hystad est un fan de LEGO de premier ordre. Dean est ingénieur auprès de MTS Systems, situé à Eden Prairie dans le Minnesota. MTS Systems Corporation est un des leaders mondiaux dans le domaine des appareils de simulation et d'essais mécaniques, proposant aussi bien des simulateurs de tremblement de terre que des manèges pour parcs de loisir. Chez MTS, Dean écrit les logiciels de contrôle pour toute une gamme de systèmes automatisés. Comme vous le voyez à travers ce livre, Dean apporte son expertise à sa passion pour le LEGO. Dean a arbitré des tournois de la FIRST LEGO League sur une période de plusieurs années et collabore actuellement à la rédaction d'un livre à paraître sur LEGO Mindstorms. Dean peut être contacté à cette adresse : dean.hystad@mts.com.

Ce livre correspond à la mission que s'est fixée INSciTE à travers le projet HighTechKids, de développer des programmes innovants qui donnent aux enfants, aux éducateurs et à l'ensemble de la communauté technique un environnement favorable pour partager au long cours le savoir en science, mathématiques et technologie.

Fred Rose
Fredrose@hightechkids.org
Président d'INSciTE
20 Septembre 2002

Droit de copie et protection des marques

© 2002-3 INSciTE avec l'accord et l'autorisation de FIRST et de la société LEGO.

Ce document est élaboré par INSciTE et n'est pas un document officiel FLL de FIRST ou de la société LEGO.

Ce document est sous licence "Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike License". Cette licence est disponible à cette adresse <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/2.0/> ou bien auprès de Creative Commons, 559 Nathan Abbott Way, Stanford, California 94305, USA.

LEGO®, ROBO LAB, et MINDSTORMS™ sont des marques déposées de la société LEGO et utilisées ici avec autorisation.

FIRST™ LEGO® League est une marque déposée de FIRST (For Inspiration and Recognition of Science and Technology) et de la société LEGO utilisée ici avec autorisation.

INSciTE™ et High Tech Kids™ sont des marques déposées de Innovations in Science and Technology Education.

INSciTE
PO Box 41221
Plymouth, MN 55441
www.hightechkids.org



1 Structures

1.1 Briques, plaques, et barres

Les briques, les plaques et les barres¹ ne sont pas aussi attrayantes que la brique RCX, les moteurs et les détecteurs. Mais ce sont des composants fondamentaux qui sont utilisés pour construire les châssis qui soutiennent le RCX, qui transmettent les efforts mécaniques et qui maintiennent fermement les détecteurs en place. Maîtrisez d'abord les fondamentaux de la construction LEGO et alors vous connaîtrez le succès. Ignorez-les, et alors vous passerez plus de temps à réparer votre robot que vous n'en avez passé à le construire.

1.1.1 Briques

Ceci est une brique de construction LEGO. Elle n'a subi que peu de changement depuis sa création en 1949. D'après la société LEGO, 320 milliards de briques² ont été produites depuis lors. Cela représente environ 52 briques par personne dans le monde.



Illustration 1-1. La brique de base LEGO

Les briques LEGO sont en plastique ABS. Elles sont fabriquées par injection dans des moules avec des tolérances précises (0.002mm)³. La face supérieure de la brique est couverte de protubérances cylindriques nommées tenons. Le dessous de la brique présente des trous cylindriques ou tubes. Quand vous emboîtez deux briques, les tubes se déforment légèrement autour des tenons, maintenant fermement les briques assemblées.

1.1.1.1 Dimensions

L'habitude est de nommer les briques en donnant leurs dimensions : largeur, longueur et hauteur (bien que la hauteur soit souvent omise en ce qui concerne les briques de taille normale). Les dimensions sont alors données en **tenons**⁴. La pièce ci-dessous est une brique 2x4.

¹ NdT : De l'anglais « beams ». Il s'agit des briques de la gamme Technic.

² <http://www.lego.com/eng/info/history> - NdT : Le lien n'est aujourd'hui plus valide.

³ **Jin Sato's LEGO MINDSTORMS: The Master's Technique**, Jin Sato, No Starch Press, 2002

⁴ NdT : Le terme tenon représente ici l'unité de mesure et non pas l'objet.

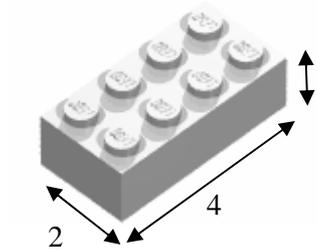


Illustration 1-2. Dimensions d'une brique

Les dimensions des briques LEGO sont basées sur le système métrique. La brique 2 x 4 ci-dessus mesure 16mm de large pour 32mm de long et 9.6mm de hauteur (sans compter les tenons). Le **tenon** vaut alors 8mm. On note que la hauteur de la brique est de 1,2 **tenon**. Cette asymétrie peut conduire à des difficultés de conception et de montage dont nous discuterons plus loin.

Question: Quelle est la taille du plus petit cube que l'on peut faire avec des briques LEGO ?

1.1.2 Plaques

Pour l'essentiel, les plaques sont des briques aplaties. Elles sont trois fois moins épaisses : 3,2 mm ou 0,4 **tenon**. Les plaques sont nommées de la même manière que les briques.

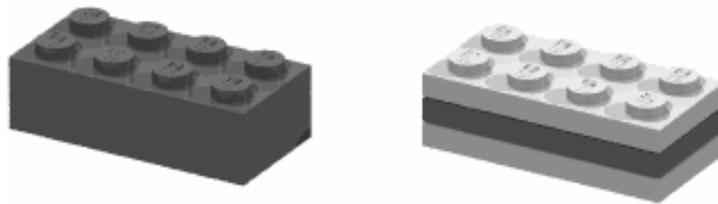


Illustration 1-3. Trois plaques = Une brique

Certaines plaques sont transpercées dans l'alignement des tubes. On les appelle des plaques Technic, ou encore, de manière moins obscure, des plaques trouées. La taille de ces trous est compatible avec l'usage des axes et des chevilles de connexions et rend ces plaques Technic très utiles.

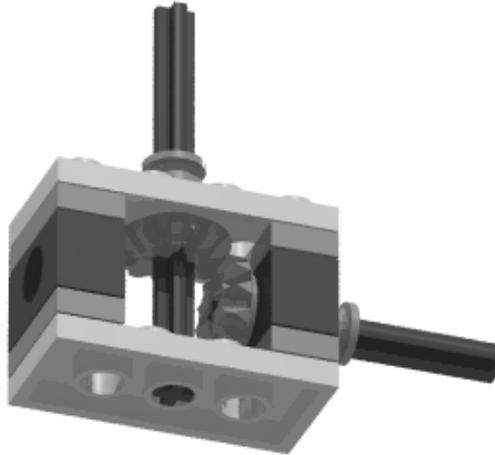


Illustration 1-4. Un montage simple utilisant les plaques Technic

Conseil de montage : Utilisez des plaques normales quand vous n'avez pas l'utilité des trous traversant. Gardez les plaques Technic pour l'occasion où vous en aurez besoin.

Question : Quelle est la taille du plus petit cube que l'on peut faire avec des plaques et des briques LEGO ?

1.1.3 Barres

En 1977, la société LEGO créa la gamme Technic⁵, comprenant une série de modèles pour des enfants plus âgés. Les pièces maîtresses de cette gamme sont les barres qui sont des briques 1xn avec des trous latéraux. Les trous sont espacés d'un **tenon** et centrés entre les tenons de la brique. Les barres peuvent être empilées les unes sur les autres tout comme des briques. Par ailleurs, des chevilles peuvent être placées dans les trous latéraux permettant ainsi l'assemblage des barres côte à côte. Le nombre de techniques d'assemblage avec ces nouvelles pièces est multiplié.

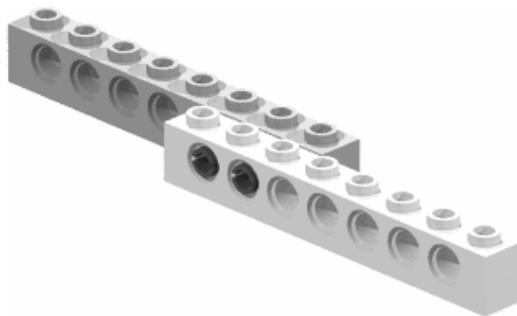


Illustration 1-5. Les barres Technic

⁵ <http://www.lego.com/eng/info/default.asp?page=timeline>

1.1.4 Axes et chevilles

Le kit RIS⁶ contient une grande variété de chevilles et d'axes qui permettent d'attacher les barres entre elles. La plus utile est la cheville Technic à friction noire ou plus simplement la « cheville à friction ». La cheville à friction est pourvue de petits bourrelets qui, dans les trous des barres, créent un lien serré procurant ainsi un assemblage solide entre barres. Une version longue de cette cheville permet d'assembler trois barres ensemble. La cheville double est utile avec le bloc connecteur multiforme bleu transparent que l'on trouve dans le RIS 1.5 et 2.0. Elle possède également un trou d'axe qui peut s'avérer utile.

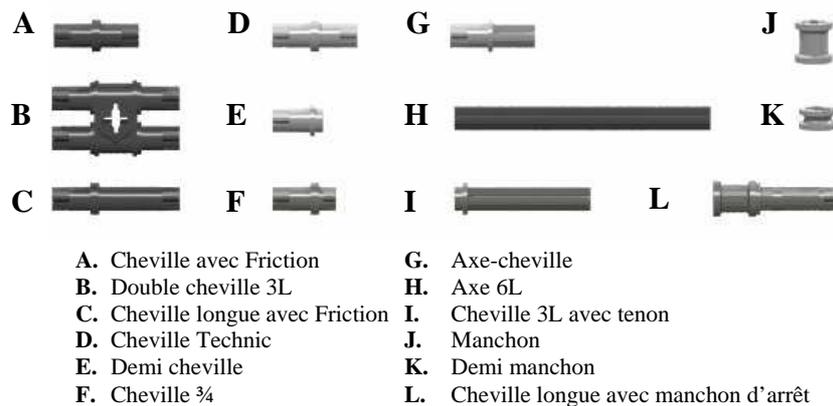


Illustration 1-6. Chevilles et axes

La cheville Technic grise est légèrement moins courante. Semblable en apparence à la cheville à friction, elle ne présente pas de bourrelets et la connexion qu'elle procure est faible. C'est donc un choix judicieux pour des pivots ou des charnières. La partie courte de la cheville de longueur $\frac{3}{4}$ correspond parfaitement aux trous présents sur les côtés du RCX, c'est pourquoi on l'utilise couramment pour fixer des barres sur la brique programmable. La partie courte de la cheville de longueur $\frac{1}{2}$ à la même taille qu'un tenon et l'on s'en sert pour les imiter sur les côtés des barres.



Illustration 1-7. Tenons sur les flancs d'une barre

Les axes sont de longues tiges de section cruciforme. Ils coulisent facilement à travers les barres mais sont maintenus fermement dans les trous en forme de croix que l'on trouve sur les roues, les engrenages, les manchons et sur d'autres pièces de la gamme Technic. La taille des axes varie de 2 à 12 pour les tailles paires. Il existe aussi des axes

⁶ NdT : RIS : Robotic Invention System – un raccourci pour parler de la boîte Mindstorms contenant la brique programmable RCX.

de taille 3 et 5⁷. Il est habituel de nommer les axes en utilisant leur taille suivit de la lettre L. Un axe de taille 4 est un axe 4L.



Illustration 1-8. Montage classique pour roue motrice

Il y a quelques pièces inclassables pour lesquelles aucune des catégories axe ou cheville ne convient. La première est le bien nommé axe-cheville qui est mi-axe mi-cheville. Il est le plus souvent utilisé pour fixer des roues dentées sur les barres. Une autre est l'axe 3L avec tenon, qui est un axe Technic de taille 3 avec un tenon à l'extrémité. Si vous tentez de placer ce tenon dans le trou d'une barre Technic, vous serez surpris de la solidité de la connexion. La cheville Technic longue avec manchon est ma pièce préférée. Je l'utilise partout où j'ai besoin d'une liaison par cheville démontable car le manchon offre une bonne prise. Le trou d'axe du manchon permet en outre d'y placer un axe pour créer des montages intéressants.



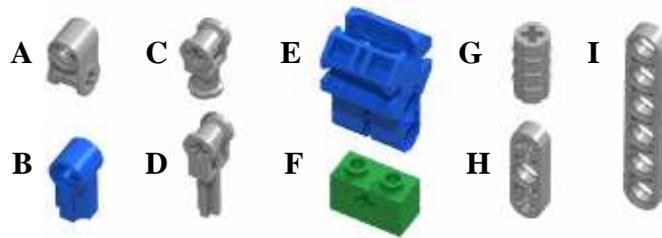
Illustration 1-9. Une cheville 16L

1.1.5 Vocabulaire LEGO

Le kit du RIS comporte une variété de pièces plastiques intéressantes avec lesquelles vous n'êtes pas habitués de construire. Même en y regardant bien, vous ne trouverez pas de vis, d'écrous, de boulons ou de clous. En lieu et place vous trouvez un machin bleu avec des trous ou un petit truc gris avec un axe dedans.

Pour améliorer la communication et faciliter les échanges d'idées, la communauté LEGO a créé des noms pour chacun de ces vistantoires et bitoniaux. La plupart de ces termes proviennent de la société LEGO – repérés sur les prospectus marketing ou sur les emballages. Mais beaucoup de ces noms ont été donnés par les fans eux-mêmes. L'illustration suivante donne une liste de noms associés aux pièces présentes dans le kit du RIS.

⁷ NdT : Le document original datant de 2003, il ne fait pas état des axes de taille 7,16 et 32 qui sont apparus depuis lors.



- | | |
|-----------------------------------|--------------------------------|
| A. Raccord d'axe perpendiculaire | F. Barre 1 x 2 avec trou d'axe |
| B. Connecteur d'angle n°1 | G. Raccord d'axes |
| C. Connecteur avec trou d'axe | H. Longrine 1 x 3 |
| D. Manche d'inverseur de polarité | I. Longrine 1 x 6 |
| E. Bloc connecteur 3 x 2 x 2 | |

Illustration 1-10. Pièces de la gamme Technic

Liens : Jim Hughes a créé *Technica*, un très beau site Internet qui répertorie les pièces de la gamme Technic avec des photos ainsi qu'un intéressant historique de la marque LEGO.
<http://isodomos.com/technica/technica.html>

1.2 Construire un châssis

Un robot a besoin d'un châssis qui lui donnera sa forme. Le châssis donne des points d'ancrage pour les détecteurs et réagit aux forces engendrées par les moteurs et les engrenages. Il est à l'image de notre squelette, qui nous donne notre forme, soutient nos organes et réagit aux forces générées par nos muscles. Un bon châssis est solide, léger et fiable pour résister à un usage intensif.

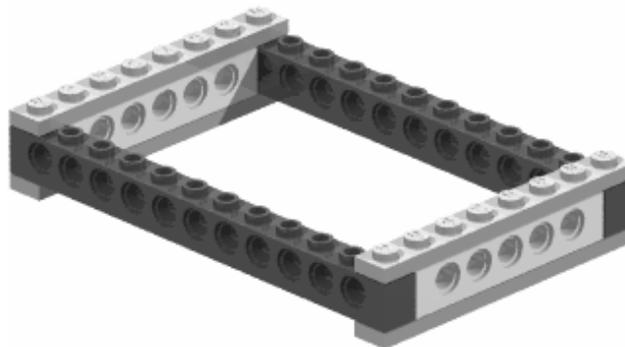


Illustration 1-11. Un cadre simple

L'illustration 1.11 représente un cadre simple fait à partir de barres Technic et de plaques 1x8. Il est solide, léger et ses dimensions sont appropriées pour amorcer la création de la plate-forme d'un robot. Toutefois il manque de rigidité. Des contraintes faibles exercées sur les coins opposés créent une déformation de la structure qui, si les attaches en coin sont trop faibles, ira jusqu'à la rupture.

Le problème vient du fait que les plaques ne verrouillent pas les coins à angle droit. Il y a un petit jeu entre les extrémités des barres 1x6 et les bords des barres 1x12. Les tenons

peuvent alors agir comme des charnières. En remplaçant une ou plusieurs plaques 1x8 par des plaques 2x8, on rend la structure bien plus rigide.

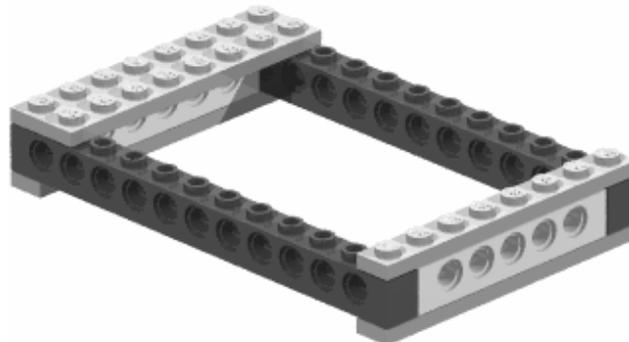


Illustration 1-12. Cadre amélioré

Le cadre amélioré est plus raide. Une contrainte appliquée sur un des coins ne le fait pas fléchir. La plaque 2x8 lit fermement la barre courte à la longue selon un angle droit. Ce cadre est suffisant pour la plupart des applications mais on peut faire encore plus solide.

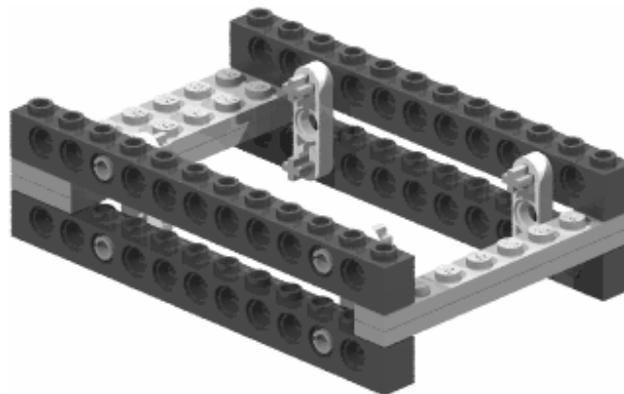


Illustration 1-13. Cadre à entretoise

Le cadre de l'illustration 1.13 utilise un assemblage par entretoises. Les longrines 1x3 empêchent le cadre de se désolidariser. L'entretoisement est une technique très utile pour construire des structures LEGO très solides. Les connexions entre les briques LEGO sont très fortes en compression (force poussant les briques l'une vers l'autre) et en cisaillement (force latérale faisant glisser les briques l'une contre l'autre) mais relativement faible en tension (force écartant les briques). L'entretoisement renforce une liaison qui travaille en tension grâce à une liaison qui travaille en cisaillement. Dans ce cas, la longrine 1x3 et les chevilles travaillent en cisaillement quand vous essayez de séparer les barres Technic.

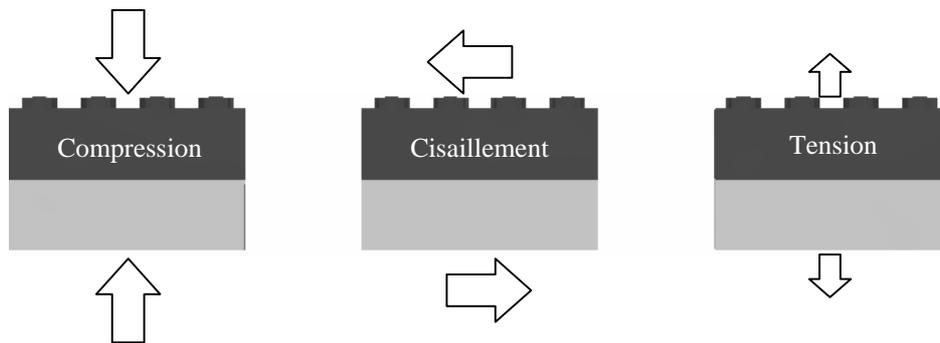


Illustration 1-14. Emboîtements faibles en tension

1.2.1 Géométrie LEGO

Une barre Technic 1x6 est large de 1 **tenon**, longue de 6 et haute de 1,2 **tenon**. Les briques et les barres ayant une hauteur différente d'un nombre entier, cela pose problème lorsque l'on souhaite faire des entretoisements, comme on peut le voir à gauche de l'illustration 1.15. Le second trou de la barre verticale n'est pas aligné avec celui de la barre horizontale.

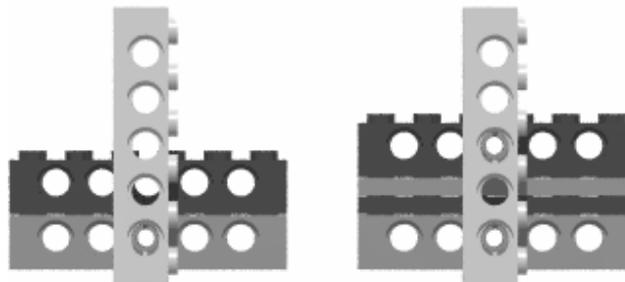


Illustration 1-15. Entretoisement

Sur l'assemblage de droite, le troisième trou de la barre verticale s'aligne parfaitement avec celui de la barre horizontale. Ceci s'explique par le fait que la taille d'une barre et de deux plaques vaut exactement 2 **tenons** ($1,2+2*0,4=2$). Vous constaterez que l'entretoisement ne fonctionne que pour des espacements pairs entre les trous de la barre verticale.

Question : Quelle est le plus petit empilement de barres (sans plaques) qui présente un alignement des trous avec une barre verticale ?

Conseil de montage : Les deux assemblages ci-dessous ont la même hauteur, mais celui de droite permet une connexion avec la barre en un point intermédiaire et présente des espacements plus adaptés à la création de trains d'engrenages.

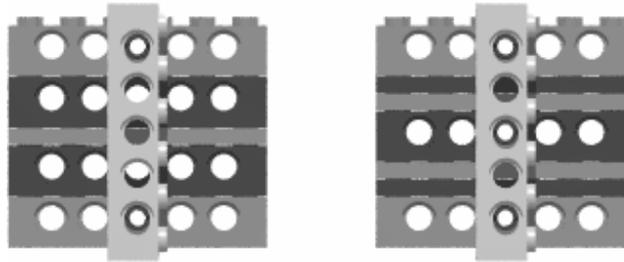


Illustration 1-16. Choix entre deux entretoisements

Cette technique peut tout aussi bien être employée pour construire des structures hautes, légères et solides. L'illustration 1.17 représente une structure de ce type utilisant des chevilles à friction aux coins pour joindre les barres horizontales et verticales. Remarquez que la technique du 1-2-1 (1 barre – 2 plaques – 1 barre) est utilisée pour obtenir l'espacement correct.

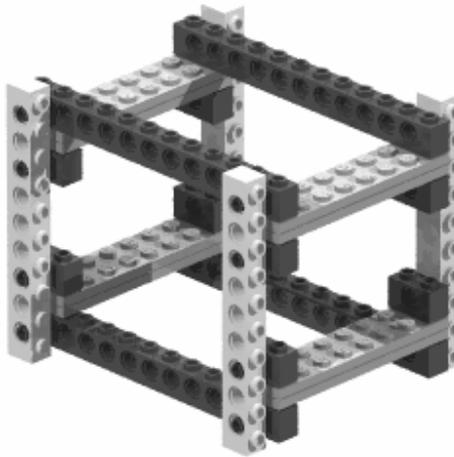


Illustration 1-17. Un cadre en hauteur

1.2.1.1 L'entretoisement oblique

On pourrait croire que l'entretoisement à angle droit est le seul possible, conforté en cela par la nature rectangulaire des pièces LEGO. Mais les montages en diagonale sont également possibles.

L'entretoisement oblique est plus difficile à réaliser que le montage perpendiculaire. L'entretoisement droit peut s'utiliser partout où l'espacement est multiple de deux tenons, et seulement là. Avec l'entretoisement oblique les solutions sont plus variées mais moins évidentes.

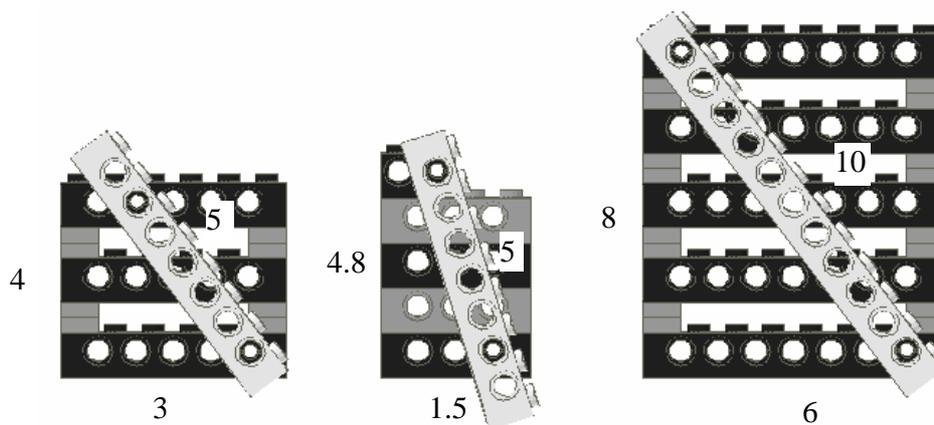


Illustration 1-18. Entretoisement oblique

On peut trouver les possibilités d'entretoisement oblique par tâtonnements. Fixez une des extrémités de l'entretoise puis faites la bouger jusqu'à trouver l'endroit où les trous s'alignent. Vous pouvez aussi trouver les solutions par le calcul en utilisant le théorème de Pythagore que l'on utilise pour le calcul des dimensions des triangles à angle droit. La somme des carrés de côtés de l'angle droit du triangle égale le carré de l'hypoténuse. On écrit souvent ce théorème sous la forme $C^2=A^2+B^2$. Les côtés sont la base et la hauteur. L'hypoténuse est la barre diagonale. L'entretoisement oblique est possible si la valeur de l'hypoténuse est proche d'un entier (moins de 0.05 **tenon** d'écart).

Tableau 1-1. Calcul des longueurs de la diagonale

Base (A)	Hauteur (B)	Hypoténuse	Commentaires ⁸
4	4	5.65	Ne convient pas
3	4	5	Convient parfaitement
1.5	4.8	5.03	Convient, mais un peu serré
6	8	10	Convient parfaitement

1.3 SNOT

Le SNOT fait fureur aujourd'hui dans la communauté Internet des fans adultes de LEGO. Le SNOT est un acronyme anglais qui signifie « les tenons pas sur le dessus » et il regroupe les techniques qui permettent de construire autrement qu'en empilant simplement les pièces LEGO les unes sur les autres. Faire du SNOT peut se révéler difficile et demande d'être imaginatif mais les maquettes qui en résultent sont très belles et plutôt réalistes.

⁸ NdT : Attention : la valeur n à prendre en compte pour ces calculs correspond au nombre d'intervalles entre trous. Les longrines correspondantes, mesurées en nombre de trous, sont donc de longueur n+1. Les barres, mesurées en nombre de tenons, seront de longueur n+2.



Illustration 1-19. Une des créations stupéfiantes de Jennifer Clark. Oui, c'est bien du LEGO.

Par chance, la gamme Technic offre plus de possibilités de montage qu'avec les autres éléments LEGO. Il reste parfois difficile d'imaginer une solution pour fixer un moteur où vous l'avez souhaité ou bien pour placer un détecteur au bon endroit. Trouver de nouvelles techniques de montage est un défi qui peut offrir beaucoup de plaisir. Voici quelques idées pour vous y aider.

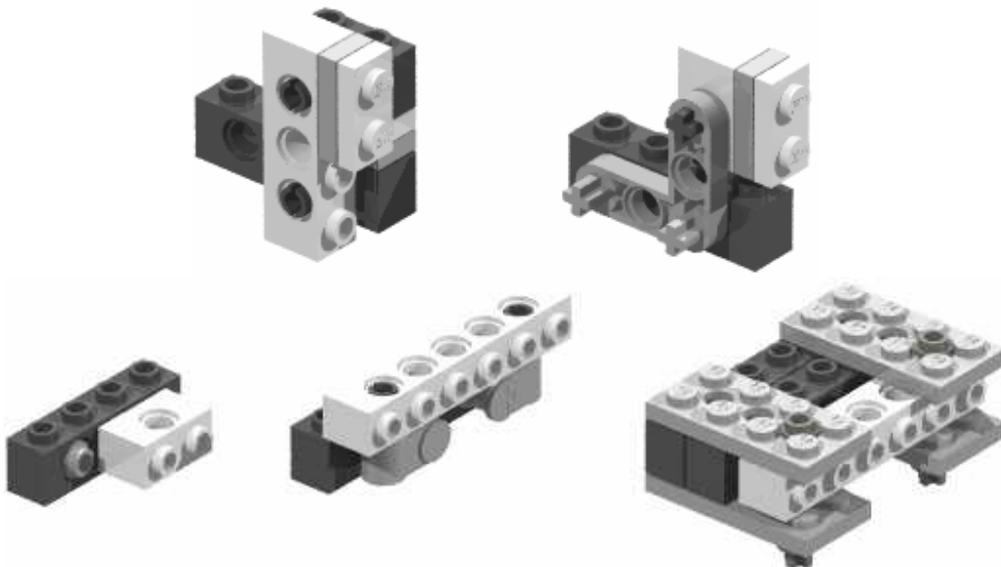


Illustration 1-20. Rotation 90°. Tenons visibles

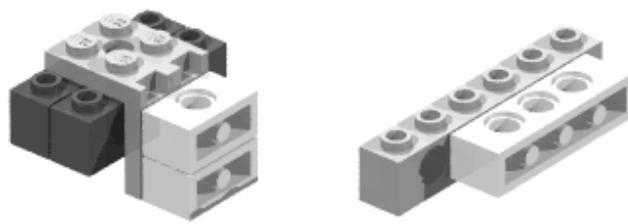


Illustration 1-21. Rotation de 90°. Tenons cachés

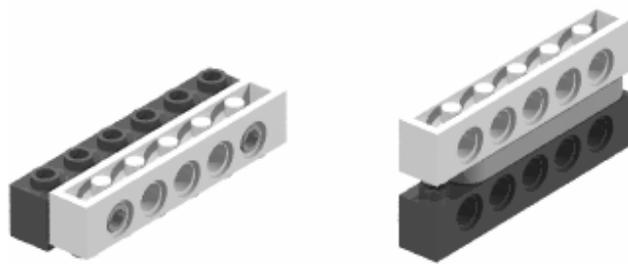


Illustration 1-22. Rotation de 180°



Illustration 1-23. Extension de barre par chevilles et plaques

2 Roue dentées

Sans doute voudrez-vous que votre robot puisse bouger. Après tout il ne s'agit pas d'un concours de sculpture auquel vous participez. Le moteur 9v va fournir la motorisation, mais il se peut qu'il ne tourne pas à la bonne vitesse ou bien qu'il ne soit pas assez puissant. Il peut aussi être difficile de placer le moteur à l'endroit où il peut être directement fixé aux roues. Tous ces problèmes se résolvent grâce aux engrenages⁹.

Les engrenages sont généralement utilisés dans l'une de ces circonstances :

1. transmettre du couple d'un axe vers un autre,
2. augmenter ou réduire la vitesse de rotation,
3. inverser le sens de rotation,
4. transférer le mouvement de rotation d'un axe vers un autre,
5. transformer le mouvement de rotation en mouvement de translation,
6. conserver le mouvement de rotation de deux axes synchrone.

2.1 Roues dentées droites

Les roues dentées droites sont utilisées quand les axes sont parallèles entre eux. Dans un engrenage droit, les dentures sont droites et parallèles aux axes. Les engrenages droits sont de loin les plus courants et ce sont ceux que se représentent les gens quand on leur parle d'engrenages. Vous trouverez quatre tailles différentes de roues dentées droites dans le Robotic Invention System (RIS).

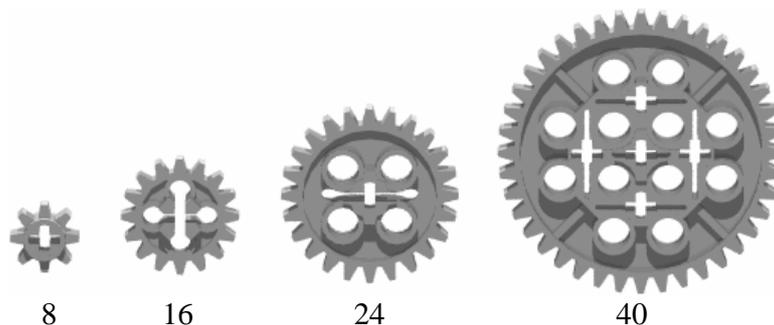


Illustration 2-1 Roues dentées droites LEGO

On nomme les roues suivant leur type et leur nombre de dents. Par exemple, nous parlons d'une roue droite à 8 dents. Souvent par simplification on remplace «dents» par «t»¹⁰ et on omet d'indiquer le type pour les roues droites (parce qu'elles sont courantes). On se référera ainsi à une roue dentée droite de 40 dents par le terme «roue 40t».

2.1.1 Ecartement entre roues dentées

Les tailles des roues dentées LEGO sont listées dans le tableau 2.1. Il est intéressant de noter que le rapport entre les rayons est égal au rapport entre les nombres de dents

⁹ NdT : Un engrenage est un ensemble de deux ou plusieurs pièces mécaniques comportant des dentures et destinés à engrener ensemble. (<http://fr.wikipedia.org/wiki/Engrenage>)

¹⁰ «t» viens de «teeth» qui signifie dents en anglais

$(8/24=0,5/1,5=1/3)$. C'est du au fait que, quelle que soit la taille des roues, la taille de leurs dents est identique – même celles au profil en développante de cercle du pignon¹¹ 8t. L'égalité des tailles de dents permet un engrènement parfait.

Table 2-1. Tailles des roues dentées droites

Dents	8	16	24	40
Rayons (tenons)	0.5	1	1.5	2.5

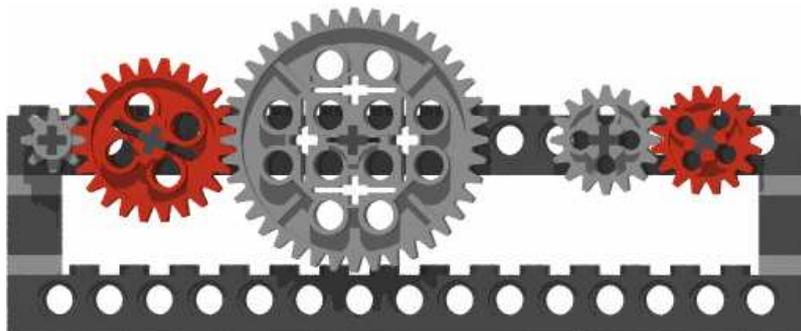
Etant donné le rayon d'une roue et son nombre de dents, on peut en déduire la taille de chacune des dents. Cette information peut être utile à connaître quand on utilise un pignon avec une crémaillère.

$$\begin{aligned}
 \text{Circonférence} &= 2 \times \text{Pi} \times \text{Rayon} \\
 \text{Circonférence} &= \text{Taille des dents} \times \text{Nombre de dents} \\
 \text{Taille} \times \text{Nombre} &= 2 \times \text{Pi} \times \text{Rayon} \\
 \text{Taille} &= 2 \times \text{Pi} \times \text{Rayon} / \text{Nombre} \\
 &= 2 \times \text{Pi} \times 1 / 16 \\
 &= \text{Pi} / 8 \text{ tenons} \\
 &= \mathbf{0.392 \text{ tenons or } 3.14 \text{ mm}}
 \end{aligned}$$

Vous pouvez le vérifier par vous-même. La taille des dents de chaque roue est vraiment la même !

2.1.1.1 Ecartement horizontal entre roues dentées

A l'aide des données de l'illustration 2.2, nous pouvons calculer les distances entre roues dentées pour un engrènement optimal. La distance entre les deux axes est égale à la somme des deux rayons.



¹¹ Ndt : En anglais, il n'y a pas de différence entre roues dentées et pignons (gears). En français, le pignon désigne la plus petite des deux roues qui composent un engrènement.

	8t	16t	24t	40t
8t	1.0 tenons	1.5 tenons	2.0 tenons	3.0 tenons
16t	1.5 tenons	2.0 tenons	2.5 tenons	3.5 tenons
24t	2.0 tenons	2.5 tenons	3.0 tenons	4.0 tenons
40t	3.0 tenons	3.5 tenons	4.0 tenons	5.0 tenons

Illustration 2-2. Ecartement entre roues dentées (en tenons)

Les engrenages à huit, vingt-quatre et quarante dents ne posent pas de problèmes. Les roues à 16 dents s'utilisent aisément ensemble mais il faut un écartement d'un demi-tenon pour les utiliser avec les roues 8t, 24t et 40t. Cet espacement d'un demi-tenon peut être réalisé à l'aide d'une brique Technic 1x2 à deux trous.

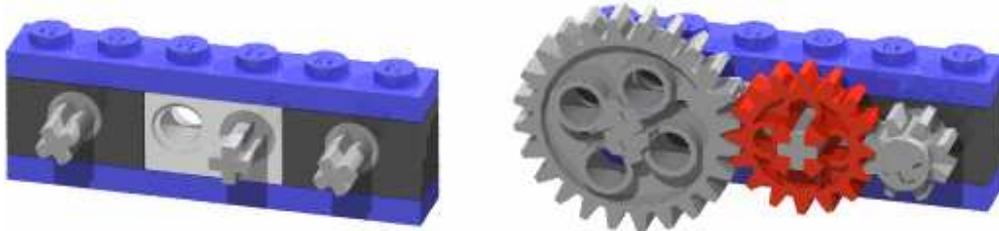
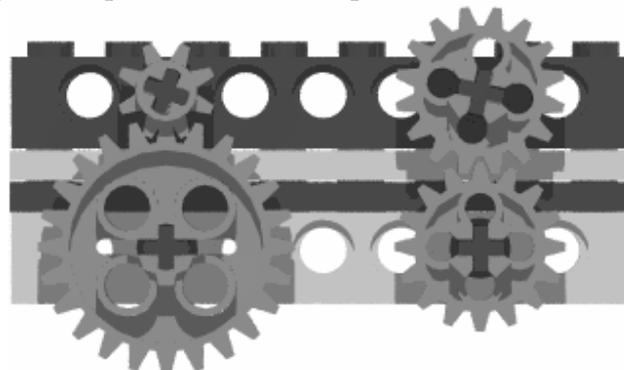


Illustration 2-3. Espacement d'un demi-tenon réalisé à l'aide d'une brique Technic 1x2 à deux trous.

Note de montage : Les écartements de deux ou trois **tenons** sont ceux qui offrent le plus de possibilités d'engrenages. L'écartement de deux **tenons** est aussi bien adapté en vertical.

2.1.1.2 Ecartement vertical

Il est difficile de créer des engrenages suivant la verticale. Le tableau des écartements entre roues dentées montre que les distances possibles varient par demi-tenon de un **tenon** à cinq **tenons**. Pour un bon engrènement vertical, il nous faut construire à l'aide de barres de 1,2 **tenon** de hauteur et de plaques de 0,4 **tenon** d'épaisseur un écartement correct. Il s'avère que c'est possible seulement pour des écarts de 2 et de 4 **tenons**.



	8t	16t	24t	40t
8t			2.0 tenons	
16t		2.0 tenons		
24t	2.0 tenons			4.0 tenons
40t			4.0 tenons	

Illustration 2-4. Espacement vertical entre roues dentées (en tenon)

L'espacement entre roues n'a pas besoin d'être parfait pour permettre l'engrènement. Un écart inférieur à 0,08 **tenons** est admissible. Les roues 8t et 16t s'engrènent à 1,6 **tenon** de distance (l'écart idéal est de 1,5), mais elles ne le font pas de manière certaine et des patinages sont possibles.



Illustration 2-5. Outrepasser les restrictions d'espacement vertical

La figure 2.5 montre une méthode pour contourner les restrictions d'espacement vertical des roues dentées. La roue du milieu est maintenue en place par un axe-cheville inséré dans un trou de la brique verticale. Les roues en haut et en bas sont espacées de 6 tenons, ce qui leur permet de s'adapter parfaitement aux axes traversant les briques horizontales.

2.1.1.3 Ecartement diagonal entre roues dentées

Le calcul de l'espacement en diagonal entre roues dentées est plus délicat que pour l'écartement perpendiculaire ou vertical. Comme nous l'avons fait pour calculer les solutions d'entretoisement diagonal, nous calculons les solutions diagonales du triangle (hypoténuse) à l'aide du théorème de Pythagore. Ces valeurs sont alors comparées aux valeurs idéales de l'espacement entre roues dentées rassemblées dans l'illustration 2.2.

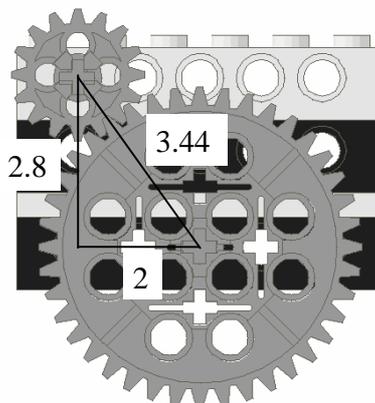


Illustration 2-6. Ecartement diagonal entre roues dentées

Le tableau 2.2 récapitule les engrenages possibles pour les roues droites de 8, 16, 24 et 40 dents. Les dimensions verticales sont indiquées dans la colonne de gauche, les

dimensions horizontales dans la ligne du haut. A l'intersection de chaque ligne et colonne est placée la valeur de l'écartement diagonal. La case est laissée vide si la valeur ne correspond à aucun engrenage possible. L'écart à la distance idéale toléré est inférieur à 0.08 **tenon**. Une distance trop faible et les roues se coincent. Une distance trop grande et il y aura trop de jeu et un risque de patinage.

Tableau 2-2. Ecartement diagonal entre roues dentées

Ecartement horizontal

Ecartement vertical

	0	0.5	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4	4.5	5
0			1	1.5	2	2.5	3	3.5	4		5
1.2			1.56	1.92							
1.6					2.56	2.97					
2	2	2.06		2.5				4.03		4.92	
2.4		2.45				3.47					
2.8			2.97		3.44						
3.2				3.53		4.06					
3.6								5.02			
4	4	4.03					5.00				
4.4						5.06					
4.8				5.03							

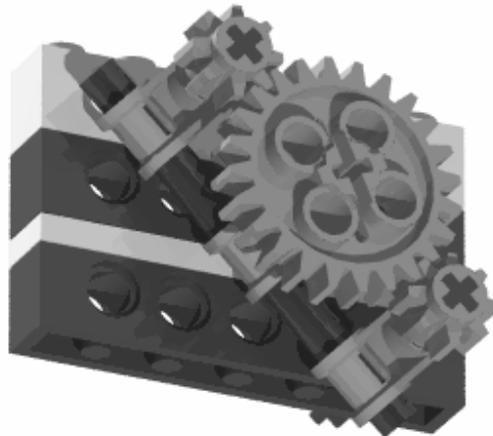


Illustration 2-7. Outrepasser les restrictions d'espace diagonal

L'illustration 2.7 montre une façon de s'affranchir des restrictions d'espace diagonal. Trois connecteurs d'axes perpendiculaires sont utilisés pour maintenir les roues dentées en place. La roue 24t est fixée à l'aide d'un axe-cheville. Les deux pignons sont placés à une distance de 4.1 **tenons** ce qui permet de les fixer par des axes aux barres horizontales. Le jeu de 0.1 **tenon** est également réparti entre les deux engrenements.

2.1.2 Rapport d'engrenage

Le rapport d'engrenage est le nombre de rotation qu'effectue l'axe mené quand l'axe menant effectue une rotation complète. L'illustration 2.8 montre un rouage constitué d'un seul engrenage : un pignon 8t sur l'axe menant et une roue 24t sur l'axe mené. Si le pignon fait un tour complet, 8 de ses dents vont passer la droite de contact. Comme il

engrène la roue, elle-même verra 8 de ses dents passer cette ligne. Comme les dents sont également réparties sur la circonférence de la roue, la roue 24t tourne de $8/24^{\text{ème}}$ ou bien encore $1/3$ de tour.

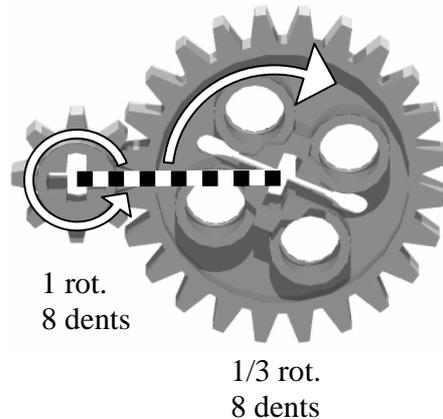


Illustration 2-8. Rapport d'engrenage 3 : 1

En utilisant l'information sur la rotation, on calcul le rapport d'engrenage. La convention admise est d'écrire les rapports comme fraction de nombres entiers.

$$\begin{aligned} \text{Rapport d'engrenage} &= 1 : 1/3 \\ &= 3 : 1 \end{aligned}$$

Le rapport de 3:1 nous indique que l'axe menant (celui du pignon 8t) doit effectuer trois tours complets pour que l'axe mené (celui qui porte la roue 24t) effectue un tour complet. Utiliser des engrenages pour diminuer la vitesse de rotation ou diminuer l'angle de rotation s'appelle une réduction. Si nous inversions les roues dentées, l'axe mené ferait trois tours à chaque tour de l'axe menant. Il s'agit alors de démultiplication, et le rapport d'engrenage serait alors de 1:3.

Vous aurez peut-être remarqué que le rapport d'engrenage est l'inverse du rapport du nombre de dents. La raison de ceci est facile à concevoir si nous imaginons que l'axe menant ne tourne que d'une seule dent. Dans le cas du pignon 8t menant la roue 24t, l'axe menant effectuera $1/8^{\text{ème}}$ de tour alors que le l'axe mené effectuera dans le même temps $1/24^{\text{ème}}$ de tour.

$$\begin{aligned} \text{Rapport d'engrenage} &= 1/8 : 1/24 \\ &= 24 : 8 \\ &= 3 : 1 \end{aligned}$$

Utiliser le nombre de dents pour calculer directement les rapports d'engrenages est plus facile et plus rapide que de calculer d'abord le nombre rotations et d'en déduire les rapports d'engrenages.

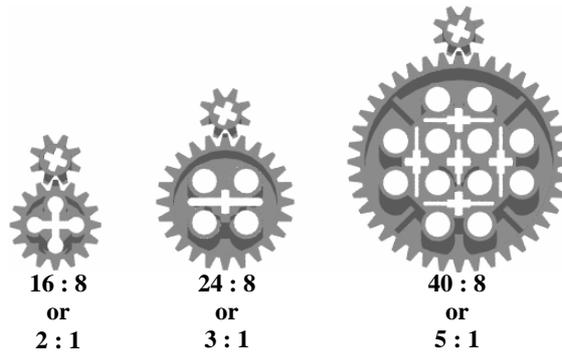


Table 2-3. Rapport d'engrenage des roues dentées droites LEGO
Arbre de sortie ou Roue menée

Arbre d'entrée ou Roue menante	Arbre de sortie ou Roue menée			
	8t	16t	24t	40t
8t	1:1	2:1	3:1	5:1
16t	1:2	1:1	3:2	5:2
24t	1:3	2:3	1:1	5:3
40t	1:5	2:5	3:5	1:1

Lien : Ted Cochran traite de façon agréable des rapports d'engrenage à l'aide d'exemples de la FIRST LEGO League du Minnesota sur www.highttechkids.org/fll/coaching/Gears/gear.htm.

2.1.3 Le Couple

Le couple est une force qui tend à faire tourner les objets. Vous générez du couple à chaque fois que vous appliquez une force pour serrer à l'aide d'une clé. Cette force crée un couple sur l'écrou, qui tend à le faire tourner. Si l'écrou est serré il vous faut pousser plus fort (plus de force) ou bien utiliser un manche plus long (plus de distance).

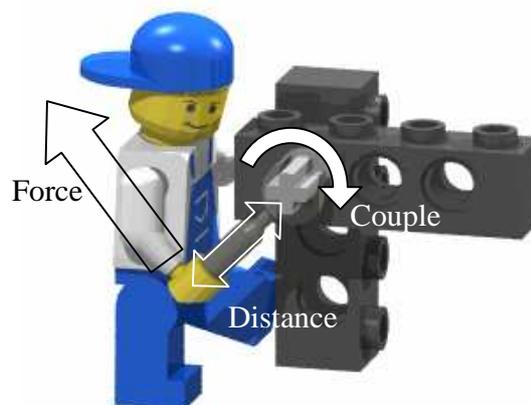


Illustration 2-9. Couple = Force x Distance

Comme le montre cet exemple de la clé et de l'écrou, le couple est le produit de la force par la distance. L'unité en usage pour mesurer le couple en est le newton-mètre. On mesure le couple dans le système métrique en Newton.mètre (N.m).

Les roues dentées fonctionnent en transmettant la force aux dents des roues. Sur l'illustration 2.10, la roue 24t exerce une force sur la roue 40t. La force (f) est égale au couple (t1) appliqué à la roue 24t divisé par le rayon (r1). La force transmise par une roue est inversement proportionnelle au rayon de la roue. Plus la roue est grande, moins la force qu'elle transmet est importante, pour un couple donné.

La force appliquée à la roue 40t génère un couple (t2) égale à la force (f) fois le rayon (r2). Le couple appliqué est proportionnel au rayon de la roue. Appliquer une force à une grande roue génèrera plus de couple que si on applique cette même force à une petite roue.

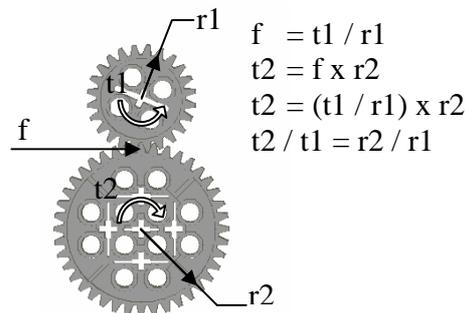


Illustration 2-10. Le rapport des couples est égal au rapport des rayons.

Le couple disponible sur l'axe de la roue menée (roue 40t) peut être exprimé en fonction du couple disponible sur la roue menante (roue 24t) et des deux rayons ($t2=t1 \times r2/r1$). Un pignon menant une roue augmentera le couple. Il y aura plus de couple disponible sur l'axe de la roue que de couple appliqué sur l'axe du pignon.

Comme discuté plus tôt, nous savons que le rapport d'engrenage est l'inverse du rapport des rayons. Ceci nous permet d'utiliser le rapport d'engrenage pour calculer l'augmentation du couple d'un engrenage donné. Voyons l'exemple ci-dessous :

$$\begin{aligned}
 \text{Rapport d'engrenage} &= r2 : r1 \\
 &= r2 / r1 \\
 &= 5 / 3 \\
 t2 &= t1 \times r2 / r1 \\
 &= t1 \times \text{Rapport d'engrenage} \\
 &= t1 \times 5 / 3
 \end{aligned}$$

Le moteur électrique Technic disponible dans le kit RIS génère un couple de 9N.cm¹² environ avec des piles neuves. En reprenant l'exemple ci-dessus, combien de couple sera disponible sur l'axe de la roue 40t si on fixe le moteur directement à l'axe du pignon 24t ?

$$t2 = t1 \times 5 / 3$$

¹² NDT : en raison des pertes dans le RCX, le couple disponible est plus proche de 6N.cm

$$= 9 \text{ N.cm} \times 5 / 3$$

$$= 15 \text{ N.cm}$$

2.1.4 La vitesse

Dans tout mécanisme, vous n'avez jamais rien sans rien. Dans l'exemple précédent, nous utilisons un engrenage pour augmenter le couple. En échange, ce que nous avons perdu, c'est de la vitesse. L'arbre de sortie tourne avec plus de couple, mais il tourne aussi moins vite.

Si nous mesurons les angles en radians ($1 \text{ radian} = 180^\circ/\text{Pi} = 1 \text{ tour}/(2 \times \text{Pi})$), la vitesse radiale d'une roue (v) est égale à la vitesse angulaire (ω) par le rayon (r). Il y a une relation de proportionnalité entre la vitesse radiale et le rayon d'une roue. Pour une vitesse angulaire donnée, la vitesse radiale d'une grande roue est plus grande que la vitesse radiale d'une roue plus petite.

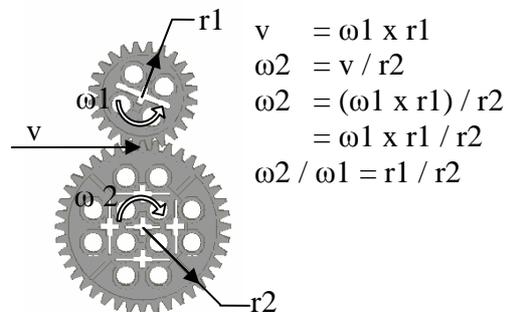


Illustration 2-11. Le rapport des vitesses angulaires est égal à l'inverse du rapport des rayons.

Quand deux roues dentées sont engrenées, la vitesse radiale de chacune d'elle est identique. Dans l'exemple ci-dessus, quelle sera la vitesse angulaire de la roue 40t si le pignon 24t tourne à 180 tours par minutes ?

$$r_1 = 1.5 \text{ tenons} = 12 \text{ mm}$$

$$r_2 = 2.5 \text{ tenons} = 20 \text{ mm}$$

$$\omega_1 = 180 \text{ tours/min}$$

$$= 180 \text{ tours/ minute} \times 1 \text{ minute} / 60 \text{ secondes}$$

$$= 3 \text{ tours / seconde}$$

$$= 3 \text{ tours / seconde} \times 2 \text{ Pi radians / tour}$$

$$= 6 \text{ Pi radians / seconde}$$

$$= 18.85 \text{ radians / seconde}$$

$$v = \omega_1 \times r_1$$

$$= 18.85 \text{ radians / seconde} \times 12 \text{ mm / radian}$$

$$= 226.19 \text{ mm / seconde}$$

$$\omega_2 = v / r_2$$

$$= (226.19 \text{ mm /seconde}) / (20 \text{ mm / radian})$$

$$= 11.31 \text{ radians / seconde}$$

$$= 1.8 \text{ tours / seconde}$$

$$= 108 \text{ tours/min}$$

La plus grande des roues dentées tourne plus lentement que la plus petite. Le rapport de vitesses angulaires est égal à l'inverse du rapport des rayons. Sachant cela on peut calculer les vitesses angulaires directement à partir du rapport des rayons.

$$\begin{aligned} \omega_2 &= \omega_1 \times r_1 / r_2 \\ &= 180 \text{ tours/min} \times 1.5 \text{ tenons} / 2.5 \text{ tenons} \\ &= 108 \text{ tours/min} \end{aligned}$$

Tout comme avec le couple, le rapport d'engrenage peut être utilisé à la place du rapport des rayons.

$$\begin{aligned} \text{Rapport d'engrenage} &= r_2 : r_1 \\ &= r_2 / r_1 \\ &= 5 / 3 \\ \omega_2 &= \omega_1 \times r_1 / r_2 \\ &= \omega_1 \times (1 / \text{rapport d'engrenage}) \\ &= \omega_1 / \text{rapport d'engrenage} \\ &= 180 \text{ tours/min} / (5 / 3) \\ &= 180 \text{ tours/min} \times 3 / 5 \\ &= 108 \text{ tours/minute} \end{aligned}$$

Liens : « How stuff Works » est un des meilleurs sites du web, propose un merveilleux article sur les roues dentées, les rapports d'engrenage, le couple et la vitesse. Consultez le à cette adresse <http://www.howstuffworks.lycozone.com>.

2.1.5 Les trains d'engrenages

Si plusieurs engrenages s'enchaînent en cascade, un train d'engrenage est formé. En utilisant des roues 40t et 8t, il est ainsi possible de créer un rapport d'engrenage de 625:1.

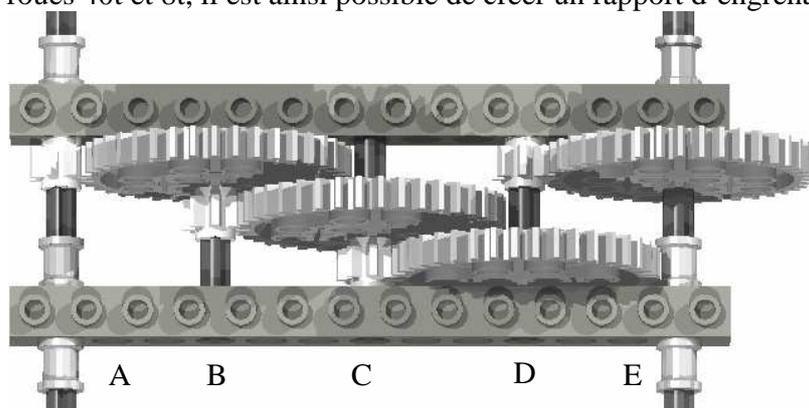


Illustration 2-12. Train d'engrenage à plusieurs étages

Le train d'engrenage ci-dessus se compose de 4 étages, chacun ayant un rapport d'engrenage de 5 :1. Pour calculer la réduction totale, en partant de A et B, nous multiplions le rapport de B et C, ainsi de suite jusqu'à E.

$$\begin{aligned}
 \mathbf{A \rightarrow B} &= \mathbf{5:1} \\
 \mathbf{B \rightarrow C} &= \mathbf{5:1} \\
 \mathbf{C \rightarrow D} &= \mathbf{5:1} \\
 \mathbf{D \rightarrow E} &= \mathbf{5:1} \\
 \mathbf{A \rightarrow E} &= \mathbf{A \rightarrow B \times B \rightarrow C \times C \rightarrow D \times D \rightarrow E} \\
 &= \mathbf{5:1 \times 5:1 \times 5:1 \times 5:1} \\
 &= \mathbf{5 \times 5 \times 5 \times 5:1 \times 1 \times 1 \times 1} \\
 &= \mathbf{625:1}
 \end{aligned}$$

Le moteur Technic 9V génère un couple d'environ 6 N.cm avec des piles neuves. Si on le relie à l'axe A pour le faire tourner, l'amplification du couple fournira un couple de 3750 N.cm à la sortie de l'axe E. C'est suffisant pour serrer les écrous des roues de ma voiture. A cause des frottements dans le train d'engrenage, le couple réellement disponible est bien inférieur à 3750 N.cm, mais il reste suffisant pour tordre les axes et casser des dents sur les roues. Faites-y attention quand vous créez d'importantes réductions d'engrenages.

Comme indiqué auparavant, toute augmentation de la valeur du couple s'accompagne d'une réduction de la vitesse de rotation. Si l'on prend notre moteur, relié à l'axe A, qui tourne à 200 tours/min, l'axe E tournera à 0.32 tour/min, soit environ un tour toutes les 3 minutes. Si au contraire on fixe le moteur à l'axe E, alors l'axe A tournera à 125.000 tours/min. Ceci correspondrait à une vitesse radiale sur la roue 40t de 942 km/h ! Heureusement, les frottements importants évitent au faible moteur de 9V d'atteindre de telles vitesses qui seraient dangereuses. Quand la démultiplication augmente la vitesse, les couples que cela nécessite augmentent les frottements des étapes ultimes. Avec un rapport d'engrenage de 625 :1, il est improbable que le moteur soit assez puissant pour faire tourner le mécanisme.

Question : En reprenant l'exemple précédent, quel serait le rapport d'engrenage si on remplaçait les roues 8t par des roues 24t ?

2.1.5.1 Les roues folles

La roue 24t sur l'illustration 2.13 est une roue folle. Une roue folle n'affecte pas le rapport d'engrenage. Le rapport de A → C serait le même si la roue 24t était absente. Les roues folles sont assez courantes dans les machines ou elles permettent de relier deux axes éloignés. Elles servent aussi à changer la direction de rotation de l'arbre de sortie.

$$\begin{aligned}
 \mathbf{A \rightarrow B} &= \mathbf{3:1} \\
 \mathbf{B \rightarrow C} &= \mathbf{1:3} \\
 \mathbf{A \rightarrow C} &= \mathbf{A \rightarrow B \times B \rightarrow C} \\
 &= \mathbf{3:1 \times 1:3} \\
 &= \mathbf{3 \times 1:1 \times 3}
 \end{aligned}$$

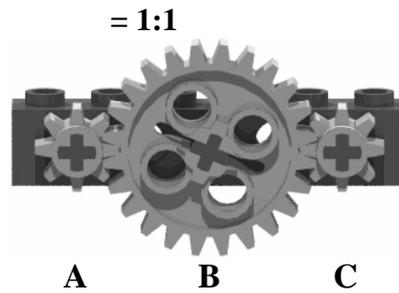


Illustration 2-13. Une roue folle

2.1.6 Roue à embrayage

La curieuse roue 24t blanche avec des inscriptions sur le flanc est la roue à embrayage. Elle a ceci de particulier que les dents ne sont pas obligatoirement solidaires de l'axe. Un mécanisme interne permet aux dents de tourner par rapport à l'axe quand le couple maximum est dépassé. La roue à embrayage est utilisée pour limiter le couple d'un rouage, protégeant les moteurs et évitant à votre robot de se démanteler.

La roue à embrayage est marquée de la mention 2.5 x 5.0 N.cm. C'est la limite de couple de la roue. N.cm est l'abrégié de Newton.centimètre, l'unité de couple (le couple est le produit d'une force par une distance, le centimètre est une unité de distance, et le Newton est une unité de force). La roue permet de transmettre un couple maximum de 2.5 à 5 N.cm.

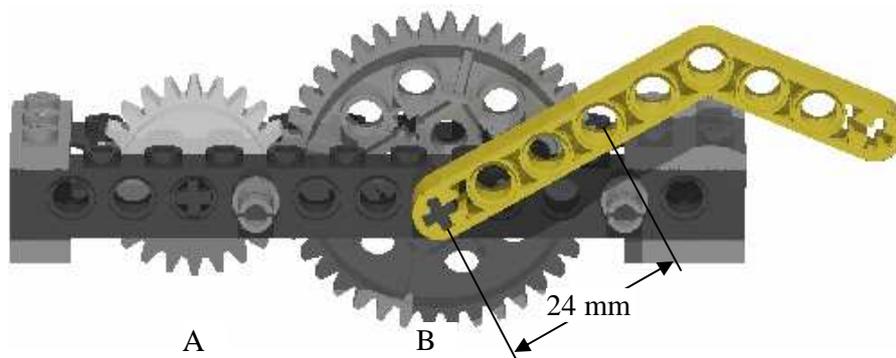


Illustration 2-14. Utilisation de la roue à embrayage pour limiter les efforts

Sur l'illustration 2.14, la roue à embrayage est utilisée pour limiter la force qui s'applique à la longrine qui vient en appui sur la cheville de butée. Sans la roue à embrayage, nous aurions le risque de bloquer le moteur ou de causer des dommages au montage. A partir des informations que nous possédons sur la roue à embrayage, sur les rapports d'engrenages, sur les distances, il est possible de calculer la force maximale qu'applique la longrine sur le connecteur de butée.

Couple maximum en A = 5 N.cm
Rapport d'engrenage A:B = 5:3
Couple maximum en B = Couple en A x Rapport d'engrenage

$$\begin{aligned}
 &= 5 \text{ N.cm} \times 5 / 3 \\
 &= 8.33 \text{ N.cm} \\
 \text{Distance de B à la cheville} &= 3 \text{ tenons} \\
 &= 24 \text{ mm or } 2.4 \text{ cm} \\
 \text{Force maxi à la cheville} &= \text{Couple en B} / \text{Distance} \\
 &= 8.33 \text{ N.cm} / 2.4 \text{ cm} \\
 &= 3.47 \text{ N}
 \end{aligned}$$

2.2 La couronne dentée

La couronne dentée a des dents proéminentes sur une de ses faces et arrondies sur l'autre. Cela lui donne l'aspect d'une couronne. Elle est employée lorsque deux axes se croisent suivant un angle – généralement à 90°. La couronne dentée est compatible avec les roues droites et la vis sans fin, mais elles s'engrènent mal entre elles. La couronne dentée peut aussi être utilisée de manière classique à la place d'une roue 24t.



Illustration 2-15. La couronne dentée

Pour le calcul des rapports de réduction, considérez la couronne dentée comme une roue 24t. Dans le montage ci-dessus, si le pignon 8t est lié à l'arbre d'entrée, et la roue 24t à l'arbre de sortie, le rapport d'engrenage est de :

$$\begin{aligned}
 \text{Rapport d'engrenage} &= 24:8 \times 24:24 \\
 &= 3:1 \times 1:1 \\
 &= 3:1
 \end{aligned}$$

2.3 Les roues dentées coniques

La roue conique a des dents qui présentent un biais vers une surface du disque. Elle est employée lorsque deux axes se croisent suivant un angle – généralement à 90°. Elle produit moins de frottements que la couronne dentée, mais elles ne peuvent s'engrener qu'entres-elles. La société LEGO® produit des roues coniques de 12, 14 et 20 dents. Malheureusement, seule celle de 12 dents est incluse dans le kit RIS.

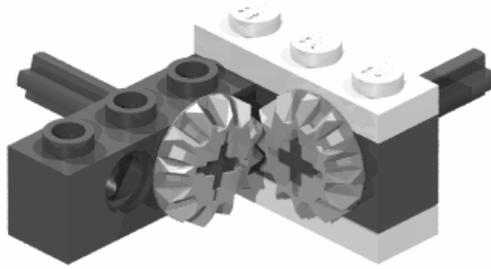


Illustration 2-16. Roue conique

Les vieilles roues coniques à 14 dents sont sujettes à des ruptures de dents. La roue conique à 12 dents est dotée d'une plaque circulaire qui renforce la roue et évite les ruptures de dents. Cette plaque circulaire donne à la roue dentée un profil circulaire qui permet son usage en tant que roulette.



Illustration 2-17. Roulette construite à l'aide d'une roue conique de 12 dents

Question : Une roulette construite à l'aide de roues dentées coniques n'a pas beaucoup d'adhérence. Quelles sont les applications qui peuvent en tirer avantage ?

2.4 La vis-sans-fin

Une vis-sans-fin est une vis qui habituellement s'engrène sur une roue droite. Le mouvement est transféré entre des axes placés à angle droit. Si vous souhaitez réaliser une très forte réduction, rien ne surpassera une vis-sans-fin. A chaque rotation, la roue n'avance que d'une dent. Si la roue droite est une roue 24t, vous réaliserez un rapport d'engrenage de 24:1 dans un espace très restreint¹³.

¹³ L'inconvénient des réductions à vis-sans-fin est qu'elles génèrent beaucoup de frottements. Leur usage est donc déconseillé si il faut fournir un couple important.

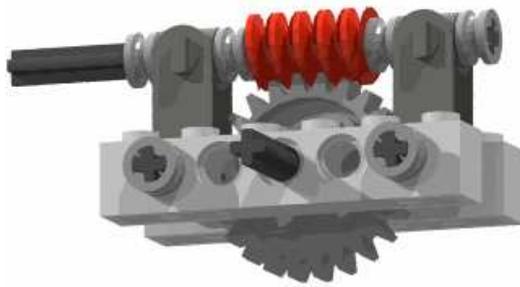


Illustration 2-18. Vis-sans-fin

L'efficacité d'un système vis-sans-fin est inférieure à celle d'un engrenage classique car la vis-sans-fin joue principalement par glissement, ce qui entraîne des frottements importants. Cela produit d'ailleurs un effet secondaire intéressant d'irréversibilité et autobloquant. On peut tourner l'arbre d'entrée pour entraîner l'arbre de sortie, mais on ne peut pas tourner l'arbre de sortie pour entraîner l'arbre d'entrée.

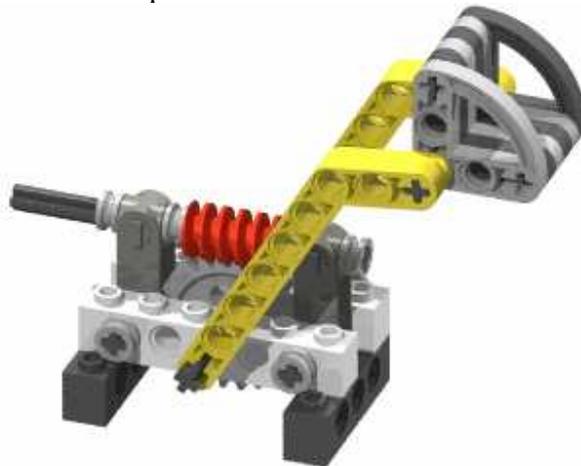


Illustration 2-19. Utilisation du système vis-sans-fin dans un mécanisme autobloquant.

Le mécanisme de l'illustration 2-19 emploie le système vis-sans-fin pour contrer le retour d'effort et maintient ainsi la nacelle en position haute. L'axe qui traverse la vis-sans-fin peut être tourné pour élever la nacelle. Une fois en place, aucun couple n'est nécessaire pour la maintenir en place.

La vis sans fin est utile aussi pour construire une tige coulissante. Elles permettent de convertir un mouvement de rotation en mouvement de translation. Elle se compose d'une tige filetée et d'un ergot. La rotation de la tige contraint l'ergot à coulisser le long de la tige. Ce type de montage est utile dans de nombreux mécanismes. L'un des plus connus est l'ouverture automatique des portes de garages.

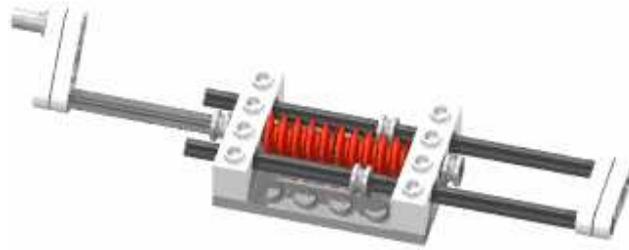


Illustration 2-20. Tige coulissante à vis-sans-fin LEGO

L'illustration 2-20 est un exemple de tige coulissante à vis-sans-fin en LEGO. La tige filetée est faite de plusieurs vis-sans-fin montées sur un axe. Les demi-manchons sur les axes extérieurs jouent le rôle d'ergots qui coulissent dans un sens ou l'autre en fonction de la rotation de l'axe central.

Note de Construction: Faites attention lorsque vous construisez une tige filetée à l'aide de vis-sans-fin. En effet, une vis-sans-fin peut être placée sur un axe de quatre façons différentes mais une seule permet de réaliser un filetage continu.



2.4.1 Transmission directionnelle

Une des utilisations de la vis-sans-fin la plus intelligente que j'aie vu est la transmission directionnelle. La transmission directionnelle vous permet, à partir d'un seul arbre d'entrée, de réaliser deux fonctions. Elle a un arbre d'entrée et deux arbres de sortie. Une vis-sans-fin coulisse le long de l'arbre d'entrée et engrène des pignons sur les axes de sortie. Lequel de ces deux pignons est engrené dépend du sens de rotation de l'arbre d'entrée.

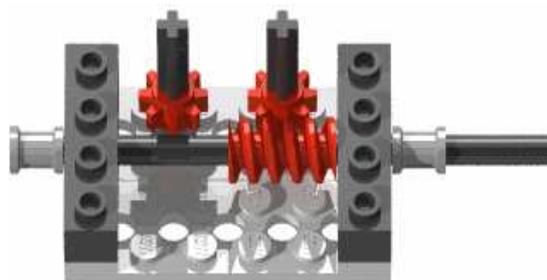


Illustration 2-21. Transmission directionnelle

La transmission directionnelle fonctionne grâce aux frottements. Quand l'arbre d'entrée est en rotation, la vis-sans-fin exerce une pression sur un des deux pignons. Le pignon résiste à cette pression à cause des frottements et renvoie l'effort. Si elle le peut, la vis-sans-fin coulisse le long de l'arbre d'entrée, et engrène alors l'autre pignon jusqu'à être calée par la barre du châssis. A ce moment, la force nécessaire pour faire glisser la vis-sans-fin dépasse celle nécessaire à faire tourner le pignon, celui-ci tourne. Si l'on inverse

le sens de rotation de l'arbre d'entrée, tout le processus recommence mais dans la direction opposée.

2.5 Le Différentiel

Un différentiel est un mécanisme qui récupère au niveau de sa cage un couple qui lui est fourni et qui le distribue de manière égale à deux arbres de sortie, leur permettant de tourner à des vitesses différentes. On trouve des différentiels dans toutes les automobiles modernes et les camions. Les voitures toutes roues motrices telle l'Audi Quattro peuvent avoir trois différentiels, un entre les roues avant, un entre les roues arrières et un entre les différentiels avant et arrière. La société LEGO procure un différentiel dans le kit RIS.

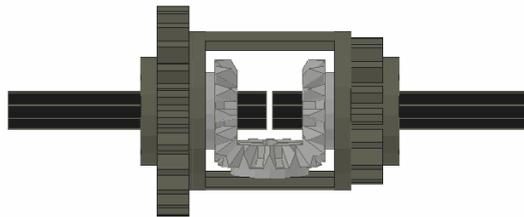


Illustration 2-22. Différentiel LEGO

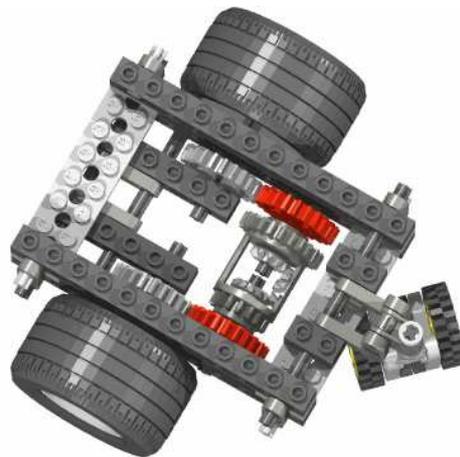
Quand une voiture tourne, les roues tournent à des vitesses différentes. Chacune des roues parcourt une distance différente dans le virage, la roue intérieure parcourant moins de distance que la roue extérieure. Puisque **vitesse = distance / temps**, les roues parcourant la plus petite distance sont aussi les plus lentes.

Ceci n'est pas un problème si les roues sont indépendantes. Mais dans la plupart des véhicules, les roues sont reliées de manière à ce qu'elles puissent être entraînées par un seul et même moteur. Sans différentiel, les roues seraient liées entre elles, ce qui les contraindrait à tourner à la même vitesse. Cela rendrait les virages difficiles. Pour que la voiture tourne, une des roues devrait déraiper, de qui demande de la force.



Illustration 2-23. Différence de parcours des roues dans un virage

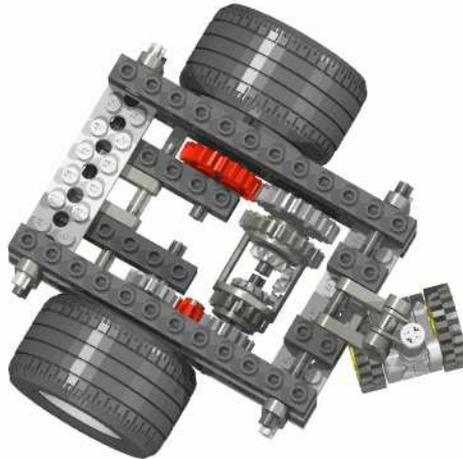
Le différentiel est un calculateur mécanique. Il calcule la moyenne de la vitesse de rotation des deux arbres d'entrées et fait tourner sa cage à cette vitesse. Cette propriété intéressante qui peut être mise à profit de différentes façons. Sur l'illustration 2-24, le différentiel est utilisé pour calculer la moyenne des vitesses de rotation des deux roues. Si on fixe à la cage du différentiel un détecteur de rotation on obtiendra une mesure précise de la distance parcourue.



Roue 1	Roue 2	Cage
100 tr/min	100 tr/min	$(100 + 100) / 2 = 100$ tr/min
70 tr/min	50 tr/min	$(70 + 50) / 2 = 60$ tr/min
80 tr/min	-80 tr/min	$(80 - 80) / 2 = 0$ tr/min

Illustration 2-24. Utilisation d'un différentiel pour calculer la moyenne des rotations

Le châssis ci-dessous utilise le différentiel pour mesurer la différence de rotation entre deux axes. Remarquez bien le pignon supplémentaire entre le différentiel et la roue sur la partie à droite. Il inverse le sens de rotation sur l'arbre droit du différentiel. Un détecteur de rotation pourrait être placé ici pour mesurer le virage.



Roue 1	Roue 2	Cage
100 tr/min	100 tr/min	$(100 - 100) / 2 = 0$ tr/min
70 tr/min	50 tr/min	$(70 - 50) / 2 = 10$ tr/min
80 tr/min	-80 tr/min	$(80 + 80) / 2 = 80$ tr/min

Illustration 2-25. Utilisation d'un différentiel pour calculer la différence des rotations

2.5.1 Le cliquet

Un usage intéressant du différentiel est de l'intégrer dans un séparateur à cliquet. Celui-ci vous permet de contrôler deux fonctions avec seulement un moteur, tout comme avec la transmission directionnelle. Mais au lieu d'utiliser les frottements pour changer de pignons, ce mécanisme utilise un cliquet qui empêche un axe de tourner dans un des sens.

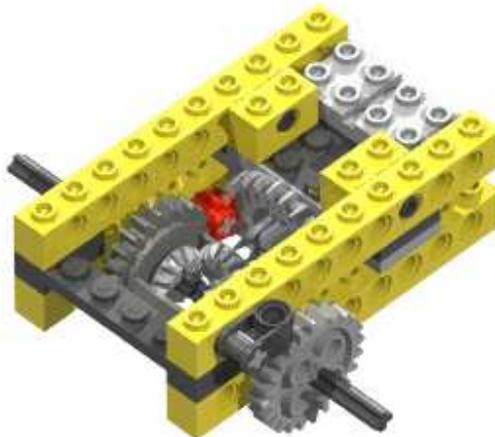


Illustration 2-26. Séparateur à cliquet

Le montage de Illustration 2-26 fait partie d'un différentiel de direction d'un véhicule que j'ai construit pour n'utiliser qu'un moteur qui procure à la fois une motorisation pour la

locomotion et la direction. Le connecteur d'axe perpendiculaire et la roue 24t constituent un ensemble cliquet et roue à rochet qui empêche l'axe droit de tourner dans le sens trigonométrique. Quand le moteur tourne dans le sens des aiguilles d'une montre, les axes de droite et de gauche tournent dans le même sens et propulsent le véhicule vers l'avant. Quand le moteur tourne dans l'autre sens, le cliquet bloque la roue droite, le véhicule tourne à droite.

Question: Que se passerait-il si un second cliquet était ajouté qui empêcherait l'axe de gauche de tourner dans le sens des aiguilles d'une montre ?

2.6 La crémaillère

La crémaillère ressemble à une roue dentée qui aurait été déroulée, comme aplatie. Elle est généralement associée à une roue droite (à laquelle on donne alors le nom de pignon). L'ensemble crémaillère et pignon est utilisé pour convertir un mouvement de rotation en mouvement de translation. Ce système est utilisé dans la direction de nombreuses voitures. Le volant entraîne en rotation un pignon qui engrène la crémaillère. Alors que le pignon tourne, il fait coulisser la crémaillère soit à droite soit à gauche en fonction du sens de rotation du volant. Le mouvement est transmis via des biellettes aux roues avant afin qu'elles pivotent.



Illustration 2-27. Crémaillère et pignon LEGO

Un des problèmes que l'on rencontre quand on souhaite utiliser une crémaillère est de créer une surface lisse sur laquelle elle pourra glisser. La plupart des maquettes de voiture LEGO résolvent ce problème avec des plaques lisses, qui sont des plaques sans tenons sur le dessus. L'illustration 2-27 utilise deux longrines 1 x 5 pour créer cette surface lisse. Une autre solution habituelle est d'utiliser une barre Technic placée à l'envers

2.7 Les poulies

Une poulie est une roue avec une rainure en périphérie. On place dans cette rainure, qu'on appelle gorge, une courroie qui permet de relier une poulie à une autre. Lorsque la poulie tourne, les frottements placent la courroie en tension. La courroie transmet alors à l'autre poulie cette force, l'amenant ainsi à tourner.

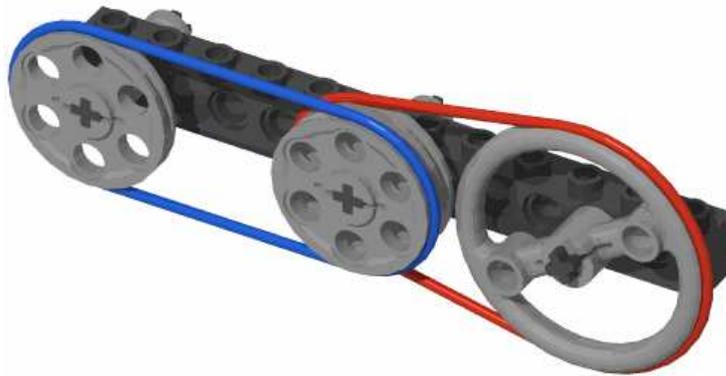


Illustration 2-28. Poulies et courroies

La société LEGO a placé 4 tailles de poulies dans le kit RIS – le demi-manchon, la petite poulie, la poulie-roue et la grande poulie. Les poulies sont reliées par les courroies placées dans les gorges des poulies. Les courroies LEGO possèdent un code de couleur : la petite (blanche), la moyenne (bleue) et la grande (jaune). Les élastiques noirs peuvent être utilisés comme courroies mais ils sont plus déformables et leur section carrée s'accorde mal avec la gorge des poulies.

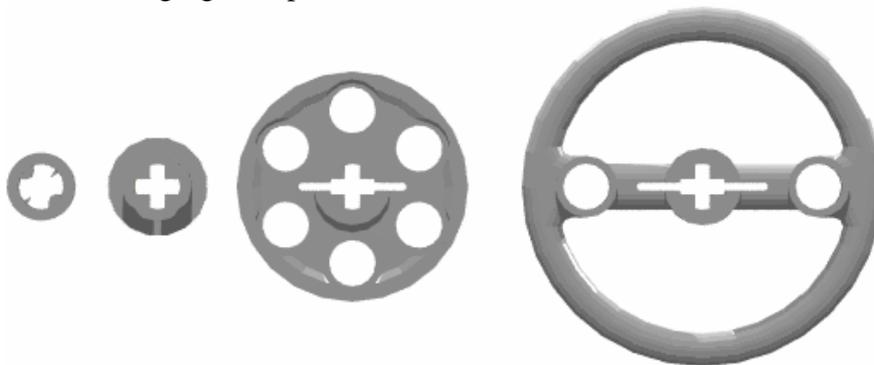


Illustration 2-29. Les poulies LEGO

Avec quatre dimensions de poulies, il est possible de faire des réductions ou des démultiplications. Le rapport de réduction avec les poulies est calculé par le rapport entre leur diamètre. L'astuce est de savoir où exactement mesurer le diamètre. Le Tableau 2-4 donne la valeur des diamètres des poulies mesurés en fond de gorge. Les rapports de réductions correspondants sont proches de ceux déterminés de manière expérimentale rassemblée dans le Tableau 2-5.

Tableau 2-4. Diamètres mesurés des poulies

	Demi manchon	Petite poulie	Poulie moyenne	Grande poulie
Diamètre				
Millimètres	5.7	8.7	22	34.5
Tenons	0.71	1.09	2.75	4.3

Tableau 2-5. Rapports de poulie

	Demi manchon	Petite poulie	Poulie moyenne	Grande poulie
Demi manchon	1:1	3:2	7:2	6:1
Petite poulie	2:3	1:1	7:3	4:1
Poulie moyenne	2:7	3:7	1:1	5:3
Grande poulie	1:6	1:4	3:5	1:1

2.7.1 Le couple

Les poulies peuvent remplacer les roues dentées dans de nombreux cas. Comme elles ne nécessitent pas un contact direct, leur placement est moins problématique. Mais comme elles n'ont pas de dents, elles ne peuvent pas transmettre des couples élevés. La courroie patinera avant. Déterminer quand et de combien une courroie patine est difficile. Cela dépend de nombreux facteurs tels que la taille des poulies, la tension de la courroie et l'adhérence entre la poulie et la courroie.

Vous pouvez augmenter le couple transmis par un système de poulie en augmentant le rapport de réduction ou en augmentant l'adhérence du couple poulie/courroie. Augmenter le rapport de réduction n'est peut être pas souhaitable car il a pour conséquence de réduire les vitesses. L'adhérence peut être augmentée soit en utilisant une courroie plus petite soit en augmentant la surface de contact entre les poulies et la courroie.

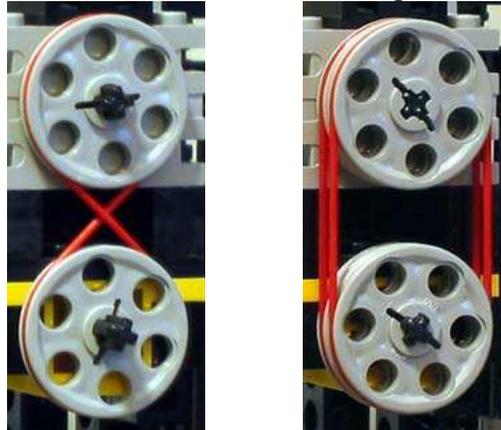


Illustration 2-30. Deux manières d'augmenter la capacité à transmettre du couple

Question: Comment pouvons nous augmenter l'adhérence autrement entre les poulies et la courroie ?

Quelques créateurs audacieux de robots utilisent le patinage des courroies pour limiter la transmission d'efforts trop importants, comme avec la roue à embrayage. Comme ce patinage est difficile à prévoir, il faut expérimenter plusieurs combinaisons de poulies et courroies pour trouver celle qui patinera pour la valeur de couple souhaitée.



Illustration 2-31. Utilisation de poulies pour limiter le couple

Notes de montage : Les chenilles caoutchouc et les roues crantées associées peuvent être utilisées à la place d'un système poulies/courroie. Comme les chenilles caoutchouc possèdent une denture, les dents empêcheront le patinage si un couple important est appliqué aux roues.

2.8 Améliorer les trains d'engrenages.

Dans votre robot, ce sont les éléments des trains d'engrenages qui encaisseront les plus gros efforts. Le moteur calera et les roues patineront avant que les efforts deviennent hors de contrôle. Mais de fortes réductions permettent d'atteindre aisément des valeurs de couples qui démantèleront vos montages.

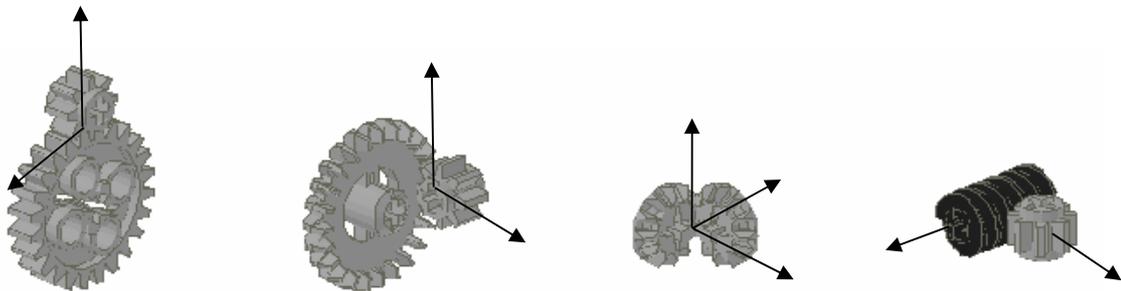


Illustration 2-32. Les forces dans les engrenages

Pour chaque type de d'engrenages il faut adapter le support. Les roues droites subissent des forces perpendiculaires aux axes. A moins que ceux-ci soient correctement fixés, ils se déboîteront lorsque des couples importants seront appliqués. Sur des châssis horizontaux ce n'est pas un problème, mais en vertical ou en diagonal, cela peut nécessiter un entretoisement.

La couronne dentée et les roues coniques subissent des efforts aussi bien perpendiculairement que parallèlement à leur axe. Comme pour les roues droites, les barres qui leurs servent de support doivent être rigidifiées à l'aide d'entretoises. C'est plus problématique car ces barres sont perpendiculaires entre-elles. De plus, couronnes dentées et roues coniques doivent être fixées de manière à ne pas glisser sur leur axe.

Le plus dur avec la vis-sans-fin, c'est de le fixer sur son axe. Ce problème est amplifié par sa taille hors norme de 15.5mm (il faudrait qu'elle mesure 16mm pour que tout aille pour le mieux). Quand elle est employée avec une roue droite, l'axe de celle-ci doit être fermement fixé.

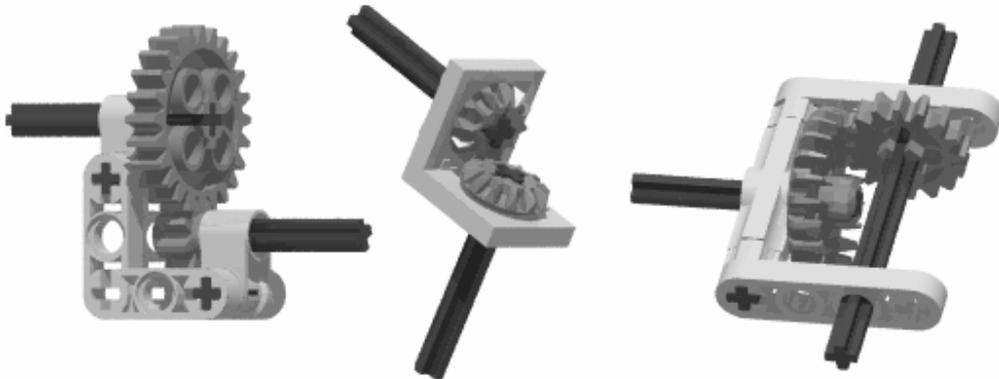


Illustration 2-33. Les boîtes d'engrenages n'ont pas besoin d'être grosses pour être solide

2.9 Le jeu

Le jeu d'un train d'engrenage est la rotation que peut effectuer l'arbre d'entrée sans faire tourner l'arbre de sortie. Le jeu est causé par les imperfections d'engrènement de chaque roue (voir Illustration 2-34). Dans cet exemple, quand la roue A change de sens de rotation, la dent de la roue B, en contact sur sa gauche, n'est plus en contact sur sa droite. A cause de l'espace entre les dents, A pourra tourner un petit peu avant que B ne tourne.

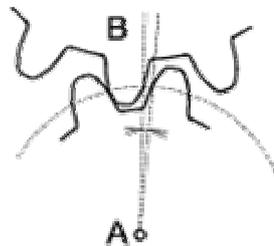


Illustration 2-34. Le jeu est causé par un défaut d'engrènement

Le jeu est source de discontinuité, d'incertitudes et d'à-coups dans les mécanismes. Tout cela cause un manque de contrôle. La précision de placement est aussi compromise à cause des jeux. Un robot qui possède trop de jeu semblera bancal et mal conçu (alors même que vous voudriez plutôt qu'il fasse bonne figure face aux juges).

Dans l'industrie, le jeu est réduit grâce à des roues dentées appairées conçues pour s'engrener parfaitement. Les roues dentées LEGO sont conçues pour fonctionner avec une large gamme de roues dentées de formes et de tailles différentes. Ceci limite leur faculté à s'engrener parfaitement. Heureusement, il existe d'autres manières de minimiser les jeux et leurs effets.

Pour réduire le jeu :

1. Placez les détecteurs de rotation au plus près de l'arbre de sortie. Cela minimise les effets que le jeu a sur la lecture du détecteur. Malheureusement, cela limite aussi la possibilité d'augmenter la résolution de mesure du détecteur en utilisant une démultiplication.
2. Utilisez des grandes roues dentées. Les jeux sont moins prépondérants avec les roues dentées les plus grandes.
3. Diminuez le nombre de roues dentées que vous utilisez dans un train d'engrenage. Plus il y a d'engrenages, plus le jeu est important.
4. Le jeu augmente avec les démultiplications, il diminue avec les réductions.
5. Quand vous enchaînez les roues dentées en diagonale, essayez de rester au plus proche des valeurs d'espacement idéales. Le jeu augmente si les roues dentées sont trop éloignées.
6. Faites attention avec la vis-sans-fin. Sa taille curieuse (1.94 **tenon** de long) rend sa mise en œuvre délicate. Des demi-manchons peuvent être employés pour la maintenir à sa place dans les applications les moins exigeantes.

Une alternative intéressante est de prévenir les jeux. Vous pouvez éliminer le jeu en appliquant un couple à l'arbre de sortie, échangeant ainsi un peu de couple contre de la précision. Si le couple de contrainte est suffisant, il prévient l'apparition de jeu lors des changements de direction. Sur l'illustration 2-35, c'est un élastique qui applique une précontrainte sur le train d'engrenages.

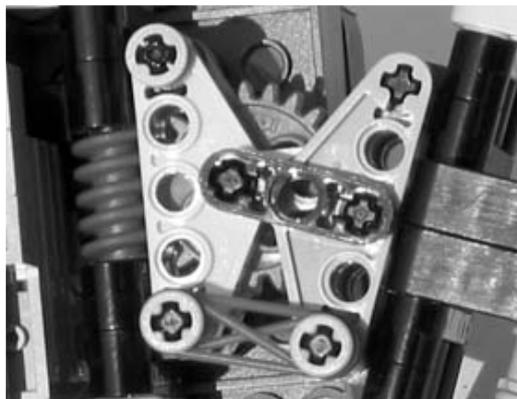


Illustration 2-35. Précontrainte d'un train d'engrenage à l'aide d'un élastique

Certaines machines de précision utilisent des engrenages à rattrapage de jeu. Un engrenage à rattrapage de jeu ressemble à une roue qui aurait été fendue dans son épaisseur. Des ressorts sont placés entre les deux parties. Les ressorts exercent un effort qui tend à décaler les demi-roues dentées de manière radiale. Quand elles sont engrenées avec une autre roue dentée, le ressort est comprimé, créant une précontrainte.



Illustration 2-36. Engrenage à rattrapage de jeu à partir de pièces LEGO

L'illustration 2-36 montre un engrenage à rattrapage de jeu fait à partir de pièces LEGO. Ce montage se sert d'axes à la place de ressort pour créer la précontrainte. Lors de l'assemblage, une des roues 40t est tournée de la valeur d'une dent avant d'être engrenée avec le pignon 8t.

3 Les roues

Les défis de la First LEGO League impliquent souvent de se déplacer puis de saisir des objets, ou de se déplacer puis de déclencher des mécanismes. Tous ces mouvements requièrent le support d'une plate-forme mobile, la plupart d'entre elles utilisant des roues.

Les roues supportent le poids du robot et transmettent la puissance des moteurs au sol. C'est du choix des roues dont dépendra la vitesse du robot, sa puissance, sa précision et sa capacité à surmonter les difficultés du terrain. Le choix des roues aura un impact primordial sur le succès ou l'échec de votre robot.

3.1 Tailles

Le kit RIS contient une grande variété de roues et de pneus. Il y a trois tailles de pneus en caoutchouc plein qui tous se montent sur la même roue plastique, et trois tailles de pneus ballons adaptés à trois jantes différentes. Les dimensions en millimètre sont indiquées sur le flanc des pneus ballons. Les dimensions des pneus pleins ne sont pas indiquées mais l'illustration ci-dessous reprend des valeurs approximatives.

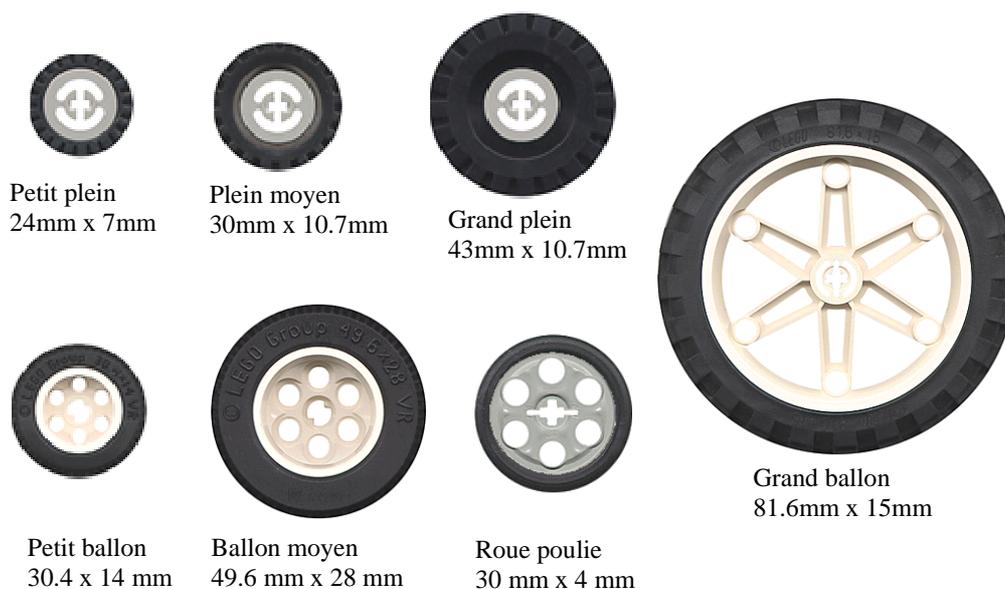


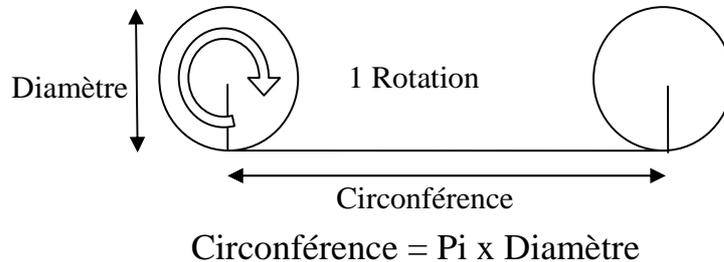
Illustration 3-1. Roues et pneus LEGO

Le diamètre des roues déterminera pour une bonne part la vitesse et la puissance de votre robot. Les grandes roues rendront votre robot plus rapide mais diminueront ses capacités de remorquage. De petites roues vous donneront plus de puissance mais avec une vitesse correspondante moindre.

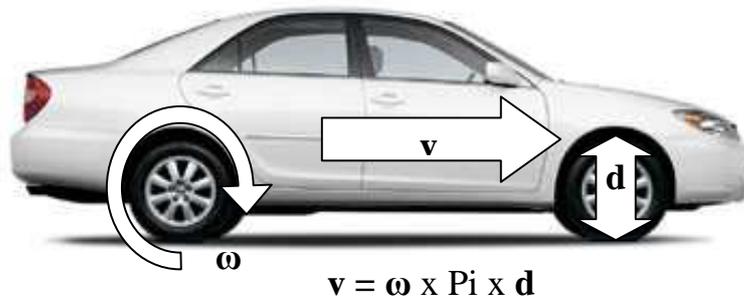
3.1.1 Vitesse

Quand vous êtes sur la route, la vitesse de votre voiture dépend de la vitesse de rotation du moteur, du rapport d'engrenage de votre boîte de vitesse et du diamètre des roues. La

vitesse du moteur et le rapport de boîte définissent la vitesse de rotation des roues (leur vitesse angulaire). La vitesse angulaire est convertie en vitesse linéaire en utilisant l'équation permettant de déterminer la circonférence d'un cercle (son périmètre).



Je suis sur une voie rapide dans mon vaillant carrosse dont le compteur de vitesse est hors d'usage lorsque je vois les gyrophares de la police. Un rapide coup d'œil au tableau de bord m'indique que le moteur tourne à 800 tr/min et je suis en troisième. Vais-je recevoir une contravention pour excès de vitesse ?



Je sais (car j'ai lu le manuel de mon auto avec soin) que le rapport de boîte est de 1 :1 en troisième. Je sais aussi que mes pneus font 62 cm de diamètre. Alors, quelle était ma vitesse?

$$\begin{aligned}
 \omega &= \text{Régime moteur} \times \text{Rapport de boîte} \\
 &= 800 \text{ tr/min} \times 1:1 \\
 &= 800 \text{ tr/min} \\
 v &= \omega \times \text{Pi} \times d \\
 &= 800 \text{ tr/min} \times 3.14 \times 62 \text{ cm} \\
 &= 155744 \text{ cm/min} \\
 &= 94.5 \text{ km/h} \quad \leftarrow \text{Je pense que je suis bon}
 \end{aligned}$$

Ce sont ces mêmes équations qui vous permettront de calculer les vitesses de déplacement de vos robots. Prenons pour exemple le robot de l'illustration 3-2 avec son moteur 9V et une démultiplication de 3:1 (une roue couronne 24t menant un pignon 8t). Il est chaussé de grands pneus ballons 81.6 x 15 qui le font rouler très vite. Le moteur va atteindre les 300 tr/min car la structure est légère. Quelle vitesse pouvons nous attendre ?

$$\begin{aligned}
 \omega &= \text{Vitesse moteur} \times \text{Rapport d'engrenage} \\
 &= 300 \text{ tr/min} \times 3:1
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 &= 900 \text{ tr/min} \\
 v &= \omega \times \text{Pi} \times d \\
 &= 900 \text{ tr/min} \times 3.14 \times 81.6\text{mm} \\
 &= 230601 \text{ mm/min ou } 13.8 \text{ km/h} \leftarrow \text{Ouah!!!}
 \end{aligned}$$



Illustration 3-2. Un tracteur très rapide

Question: Dans l'exemple ci-dessus, quelle serait la vitesse si nous modifiions le rapport d'engrenage en plaçant le pignon de 8 dents sur le moteur et la roue couronne de 24 dents sur l'axe ?

3.1.2 Force

Dans notre discussion sur les roues dentées, nous avons vu qu'il existe une relation entre la force, le couple et le rayon—elle reste vraie pour les roues. Quand vous utilisez de grandes roues pour augmenter la vitesse, vous perdez quelque chose en échange, ce quelque chose c'est la force. Un robot avec de grandes roues ne peut tirer autant qu'un robot avec de petites roues.

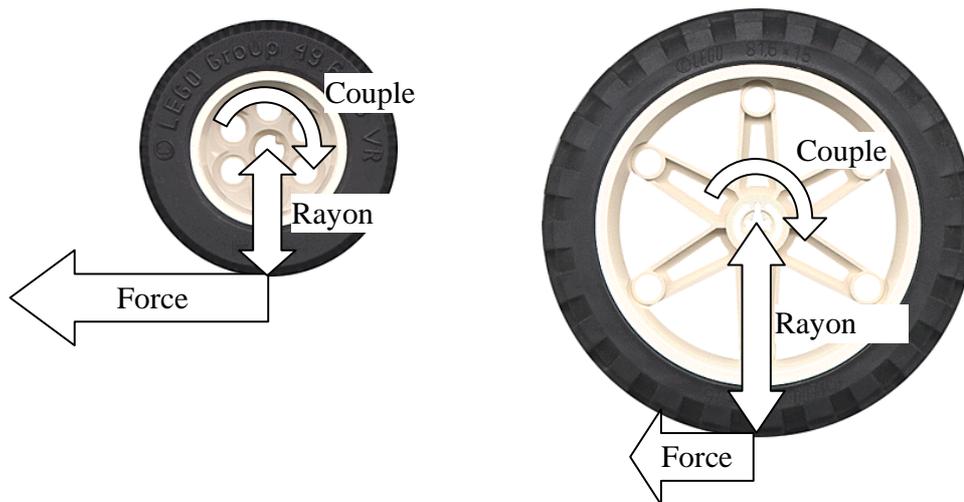


Illustration 3-3. Force = Couple / Rayon

La relation entre force, distance et couple joue contre nous dans le cas des roues. Les grandes roues ont un rayon supérieur (taille du levier) et fourniront moins de force pour un couple donné que des petites roues. Moins de force signifie moins d'accélération. Le véhicule ira plus vite mais mettra plus de temps à atteindre cette vitesse. Si l'on évalue à 9 N.cm la valeur du couple que le moteur délivre, calculons la force appliquée par les roues du véhicule de l'illustration 3-2.

$$\begin{aligned}
 \text{Couple} &= \text{Couple moteur} \times \text{Rapport d'engrenage} \\
 &= 9 \text{ N.cm} \times 1:3 \\
 &= 3 \text{ N.cm} \\
 \text{Rayon} &= \text{Diamètre} / 2 \\
 &= 81.6 \text{ mm} / 2 \\
 &= 40.8 \text{ mm ou } 4.08 \text{ cm} \\
 \text{Force} &= \text{Couple de la roue} / \text{Rayon} \\
 &= 3 \text{ N.cm} / 4.08 \text{ cm} \\
 &= 0.735 \text{ N} \\
 &= 73.5 \text{ g} \leftarrow \text{Faible!!!}
 \end{aligned}$$

En comparaison, si nous utilisons les petites roues pleines (24 mm), le tracteur se déplacerait à 4 km/h avec des roues générant une force de 255 g. En permutant le rapport d'engrenage de 3:1 à 1:3, le tracteur irait seulement à 0.4 km/h, mais il délivrerait une force impressionnante de 2 kg. Il est improbable que les pneus puissent transmettre cette force au sol, et il est certain qu'il en résulterait un patinage.

Question: Si les grandes roues sont peu efficaces pour le remorquage, pourquoi les tracteurs ont-ils de grandes roues ?

3.2 Chenilles

Les robots à chenilles sont très populaires dans les compétitions FLL. Ils sont faciles à construire et les enfants les trouvent « cools ». Le kit RIS contient deux chenilles de tank et quatre roues crantées. Les roues crantées sont pourvues d'un trou d'axe qui leur permet de tourner librement. Les rendre motrices nécessite un montage particulier pour les solidariser à leur axe. Ceci est habituellement réalisé à l'aide d'une roue droite de 16 dents.



Illustration 3-4. Robot à chenille

Les chenilles ont une bonne motricité sur les terrains tortueux et si elles sont bien conçues, peuvent traverser de petits ravins qui arrêteraient un véhicule sur roues. Les robots chenillés sont souvent large et bas, ce qui leur donne une grande stabilité. Ils sont aussi maniables. Un robot chenillé peut faire demi-tour sur place en faisant tourner ses chenilles en sens opposé l'une de l'autre.

Malheureusement, les chenilles ont de nombreux inconvénients. Elles sont peu adhérentes sur des surfaces lisses. Le patinage des chenilles rend difficile la navigation en aveugle. Il y a aussi énormément de perte de puissance à cause de la déformation permanente de la bande de la chenille lorsqu'elle s'enroule autour des roues crantées.



Illustration 3-5. Le Johnny 5 de Mario Ferrari¹⁴

¹⁴ <http://www.marioferrari.org/lego.html>

Le kit RIS ne contient qu'une taille de chenille. Pour que la chenille ne patine pas sur les roues crantées, il faut un écartement entre elles qui permette de maintenir une légère tension (environ 12 **tenons**). La base peut être raccourcie si l'on utilise des roues crantées supplémentaires pour modifier la forme de la chenille. Dans l'exemple ci-dessus, deux poulies servent de roue supplémentaire pour donner à Johnny 5 ce train roulant si reconnaissable.

3.3 Répartition des masses

Dans la conception d'un robot, la répartition des masses est très importante. Pour prévoir et pouvoir répéter les déplacements de votre robot, il est important que les roues restent en contact avec le sol en permanence, et que le poids sur chaque roue soit conséquent. Une mauvaise répartition des masses et votre robot risque de se renverser ou de basculer lors des accélérations ou des virages.

La répartition de masses dépend de deux facteurs : la projection au sol et le centre de gravité. Le centre de gravité (CG) est le point de votre robot où il y a autant de poids au-dessus qu'au-dessous, à droite qu'à gauche, devant que derrière. Pour calculer la stabilité, on considère que tout le poids de votre robot se situe en ce point. La projection au sol est l'aire définie en reliant les points de contact de votre robot avec le sol.



Illustration 3-6. Projections au sol

Pour avoir une bonne répartition des masses, le CG doit se situer bien à l'intérieur de la projection au sol. S'il se situe en dehors, le robot se renversera. Plus le CG est proche du centre de la projection au sol et plus le robot sera stable.

3.3.1 Trouver le centre de gravité

Déterminer la position du centre de gravité de votre robot est une activité à la fois utile et instructive. On peut y parvenir de plusieurs façons, de la plus mécanique et ennuyeuse (faire la somme des moments d'inertie de chaque pièce et diviser par la masse totale du robot) à la plus effrayante (pendre le robot à un fil). Une méthode plutôt simple et sans risque pour trouver le CG est la méthode de l'équilibriste.

Pour déterminer la position du CG par la méthode de l'équilibriste, vous allez déterminer le point d'équilibre suivant les axes latéral, longitudinal et vertical. Chaque point d'équilibre définit un plan dans lequel se situe le CG. Le CG est situé à l'intersection de ces trois plans.



Illustration 3-7. Trouver le CG par la méthode de l'équilibriste

Pour trouver les points d'équilibre, il vous faut un point d'appui qui soutienne le poids de votre robot tout en lui permettant de basculer. Une brique 2x4 arrondie est le point d'appui choisi sur l'exemple ci-dessus. Placez le robot sur le point d'appui de telle manière qu'il soit parallèle au plan d'équilibre que vous recherchez. Doucement, ajustez la position du point d'appui jusqu'à ce que le robot soit en équilibre. C'est le point d'équilibre. Répétez cette opération pour les deux autres axes pour trouver le CG.

Trouver la composante verticale du CG peut s'effectuer de la même manière mais parfois la conception de votre robot ne vous permettra pas de procéder ainsi. Si je ne peux placer en équilibre mon robot sur l'avant, l'arrière ou sur les côtés, je modifie la méthode de l'équilibriste pour utiliser une partie du robot en tant que point d'appui. Avec précautions, basculez progressivement votre robot jusqu'à ce qu'il se trouve en équilibre. Utilisez alors une équerre (un livre ou une boîte de mouchoirs feront l'affaire) pour matérialiser la verticale au point d'appui. Le CG se situe à l'endroit où cette verticale croise l'intersection des plans d'équilibre latéral et longitudinal.

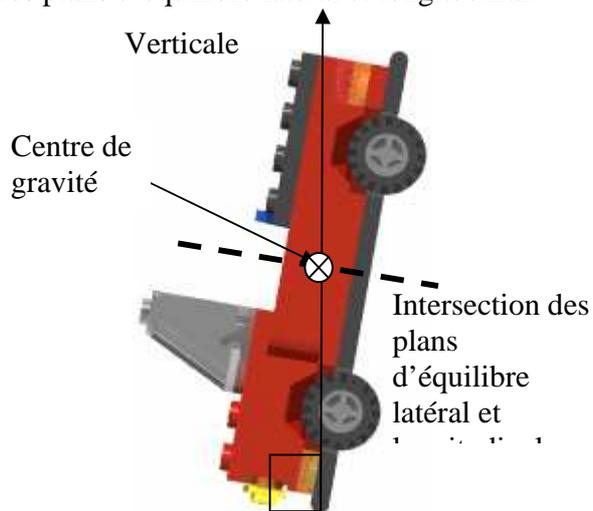


Illustration 3-8. Méthode de l'équilibriste modifiée

3.3.2 L'inertie

Déterminer la composante verticale du centre de gravité est souvent plus difficile que de trouver les composantes avant/arrière et gauche/droite. Alors pourquoi s'en soucier ? Après tout, si vous savez que le CG se situe près du centre de la projection au sol, vous êtes sûr que votre robot est stable, non ? En fait, pas toujours. L'Illustration 3-9 montre comment sur un plan incliné, la projection au sol du CG se déplace. Le robot avec un CG bas est stable, alors que le robot avec un CG haut se renversera en arrière lorsqu'il entamera son ascension du plan incliné.

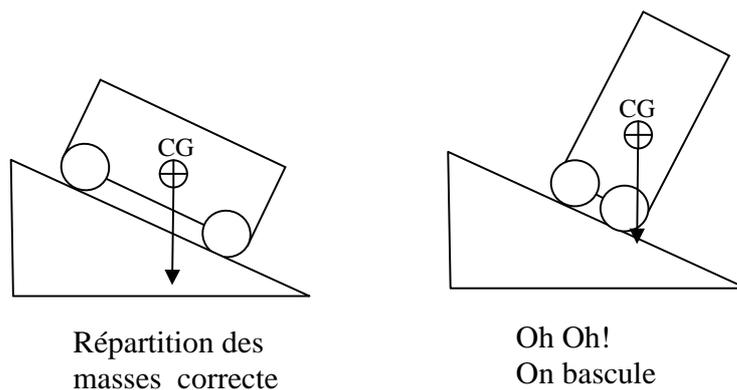


Illustration 3-9. Un plan incliné modifie la projection au sol du CG

Une raison encore plus importante de connaître la composante verticale du CG, c'est d'être en mesure de prévoir les effets d'une accélération de votre robot. Ce problème est bien connu sur certaines petites voitures avec des centres de gravité élevés qui sont instables lors des freinages ou dans les virages. L'Illustration 3-9 montre comment ça se passe dans une côte, mais comment cela se déroule-t-il sur le plat dans un virage ?

Dans son livre '*Principia*', Isaac Newton fut un des premiers à étudier une propriété commune à tous les objets connus sous le nom d'inertie. Il posa le principe qu'un objet immobile reste immobile et qu'un objet en mouvement reste en mouvement suivant la même direction et la même vitesse. Pour déplacer un objet ou modifier le déplacement d'un objet, il est nécessaire d'y appliquer une force externe. Ceci est résumé en une élégante équation Force = masse x accélération, ou $\mathbf{F} = m\mathbf{a}$.

Quand vous roulez et que vous tournez le volant, la direction de votre voiture change. La route pousse sur les pneus de votre voiture, créant une accélération latérale. Le principe d'inertie implique que votre voiture et tout ce qu'elle contient résistent à cette accélération par une force égale à la masse multipliée par l'accélération. La force d'inertie s'applique au CG de la voiture dans le sens opposé à l'accélération. Comme le CG se situe plus haut que la route où la force des roues s'applique, la force d'inertie crée un couple (on parle aussi de moment d'inertie) qui tend à faire basculer la voiture.

Heureusement, le poids de la voiture génère un moment opposé qui empêche le basculement. Tout va bien tant que la gravité est plus forte que le moment d'inertie. Les voitures larges avec un centre de gravité bas sont donc plus sûres car les forces d'inertie

qui engendreraient un basculement sont plus grandes. Les pneus ne peuvent supporter de telles forces et en conséquences les voitures dérapent au lieu de se renverser.

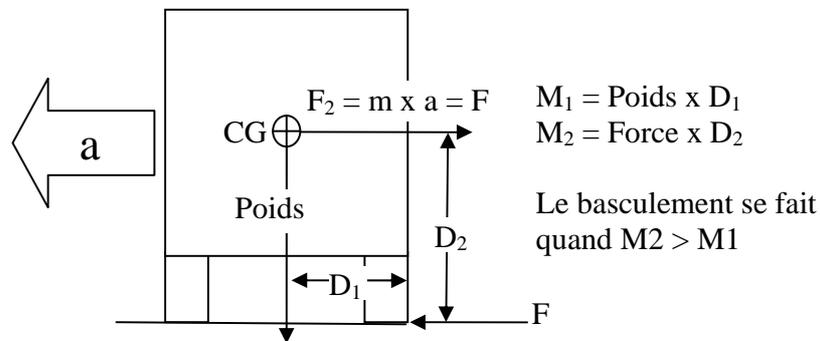


Illustration 3-10. Les virages engendrent des forces et des moments

Les forces d'inertie conduisent aussi les robots à se cabrer, chose à laquelle semblent coutumiers les robots de la FLL. Quand votre robot est à l'arrêt, et que vous démarrez les moteurs, ils fournissent leur couple maximum au départ. Si l'accélération qui en résulte est assez grande, le robot bascule, soulevant les roues avant du sol. Par chance, le couple en sortie de moteur chute sensiblement dès que les roues se mettent à tourner, stoppant immédiatement le robot dans sa cabriole.



Illustration 3-11. Le Robot "Cheesy Poofs" de la FIRST Team 254 fait une cabriole de victoire

Les cabrioles de ce type doivent être évitées car elles rendent vite le déplacement d'un robot imprévisible si toutes ses roues ne restent pas au sol. Comme nous l'avons vu auparavant à propos des virages, la propension à verser est prévenue par un centre de gravité bas ou une projection au sol plus grande. C'est vrai aussi pour les cabrioles qui n'auront pas lieu si le centre de gravité est bas et éloigné des roues motrices. Vous pouvez déplacer le CG soit en déplaçant certains composants du robot, soit en ajoutant du

poids mort. Vous pouvez obtenir un effet similaire en déplaçant les roues motrices vers l'arrière.

Question: Comment prévenir les cabrioles autrement qu'en déplaçant le CG ou la position des roues?

3.4 Charge sur essieu et frottement

Le poids d'un RCX avec ses piles, de trois moteurs, d'un détecteur de lumière et de rotation est proche de 500 g. Ajoutez à cela le châssis, les supports de moteurs, les roues dentées et une pince de préhension et vous voyez qu'un robot FLL typique (si cela existe) pèse de 0.8 à 1 kg sur ses roues. En fonction de la position des roues et de la géométrie globale de la structure du robot, la force sur les axes peut être largement supérieure. Ces forces élevées peuvent causer des pertes de puissance dans les frottements qu'elles génèrent. Qu'est-ce qui engendre ces forces et comment peut-on les réduire ?

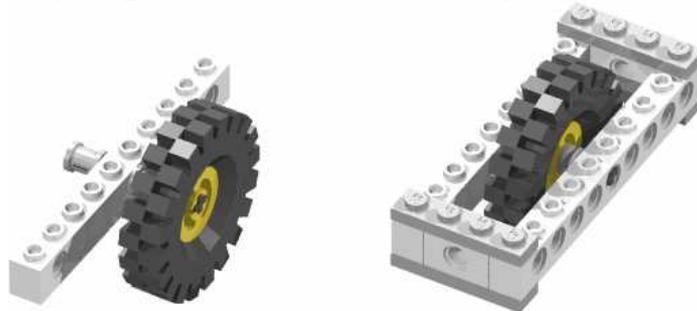


Illustration 3-12. Roues en porte-à-faux et sur palier double

La plupart des véhicules utilisent des montages variés en porte-à-faux pour fixer les roues. Fixé d'un seul côté, l'axe agit comme un levier, engendrant un moment qui à son tour crée une force opposée au niveau du support. Un moment est le produit d'une force (le poids supporté par la roue) par la distance à l'axe (le point où l'axe est en contact avec le support). Plus la roue est éloignée du châssis, plus grand est le moment.

La manière dont le châssis réagit au moment est liée aux forces de frottements. L'axe n'entre pas en contact sur toute la surface de son support, mais il est courbé et ne trouve appui qu'en deux points. Plus ces points sont éloignés et plus les forces en jeu sont réduites.

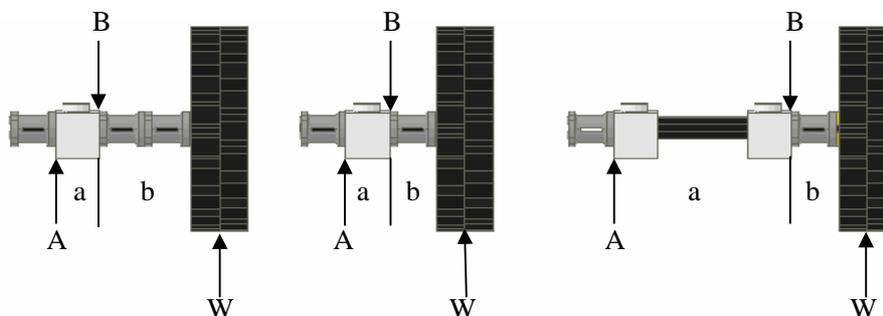


Illustration 3-13. Charge sur essieu

Distance a	Distance b	Force A	Force B	Forces de frottement
1 tenons	2.5 tenons	2.5 W	-3.5 W	6 W
1 tenons	1.5 tenons	1.5 W	-2.5 W	4 W
4 tenons	1.5 tenons	0.375 W	-1.375 W	1.75 W

L'illustration 3-13 et le tableau correspondant montre la relation entre les charges et le positionnement des roues. "W" est le poids du robot supporté par la roue. "A" et "B" sont les forces exercées sur l'axe par le châssis. "a" est la distance entre les deux points de contact sur le châssis. "b" est la distance du châssis à la roue.

Pour calculer la valeur des forces A et B, penchons-nous auparavant sur les forces et les moments. D'après l'équation de Newton, $\mathbf{F} = m\mathbf{a}$, nous savons qu'un corps accélère sous l'effet d'une force. Comme la roue n'est pas accélérée vers le haut ou le bas, on peut déduire que les forces A, B, et W s'annulent, leur somme est égale à zéro. Par convention, nous dirons que les forces dirigées vers le haut sont positives, celles dirigées vers le bas, négatives.

$$\mathbf{A} - \mathbf{B} + \mathbf{W} = \mathbf{0}$$

$$\mathbf{B} = \mathbf{A} + \mathbf{W}$$

Un moment est simplement le produit de la force par la distance, et il suit les mêmes règles que les forces. Un corps soumis à un moment subira une accélération angulaire. Si l'accélération angulaire du corps est nulle, la somme des moments en n'importe quel point de ce corps doit être nulle. Pour rendre les équations faciles à lire, je vais choisir le point B comme point d'application des moments. Par convention, un moment qui tend à provoquer une rotation dans le sens des aiguilles d'une montre est compté positivement, dans le sens contraire négativement.

$$\mathbf{A} \times \mathbf{a} + \mathbf{B} \times \mathbf{0} - \mathbf{W} \times \mathbf{b} = \mathbf{0}$$

$$\mathbf{A} \times \mathbf{a} = \mathbf{W} \times \mathbf{b}$$

$$\mathbf{A} = \mathbf{b}/\mathbf{a} \times \mathbf{W}$$

Maintenant nous pouvons passer au cas pratique et manipuler des nombres. Les valeurs ci-dessous sont celle de l'exemple de gauche de l'illustration 3-13.

$$\mathbf{a} = 1 \text{ tenon}$$

$$\mathbf{b} = 2.5 \text{ tenons}$$

$$\mathbf{A} = \mathbf{b}/\mathbf{a} \times \mathbf{W}$$

$$= 2.5 \times \mathbf{W}$$

$$\mathbf{B} = \mathbf{A} + \mathbf{W}$$

$$= 2.5 \times \mathbf{W} + \mathbf{W}$$

$$= 3.5 \times \mathbf{W}$$

Ce qu'il faut retenir de ces calculs c'est que pour réduire les frottements il faut :

1. Placer les roues près du châssis

2. Ecarter les supports de l'axe de la roue pour réduire les forces qui contrecarrent les moments agissant sur la roue.

Question: Quelles seraient les valeurs du tableau dans le cas de la roue sur palier double de l'illustration 3-12?

4 L'électronique LEGO

4.1 La brique RCX

Le RCX est le cerveau de votre robot, un petit ordinateur en forme de brique LEGO. Au cœur du RCX il y a un microcontrôleur Hitachi H8 de technologie 8 bits, avec une fréquence de 16 MHz et 32Ko de RAM. Cela peut sembler anémique si on le compare aux ordinateurs de bureau modernes avec des microprocesseurs 32 bits à 2GHz et 512 Mo de mémoire, mais c'est aussi puissant que l'Apple II sur lequel j'ai appris à programmer et significativement plus puissant que les ordinateurs qui ont envoyé l'homme sur la lune.

Le microcontrôleur est employé dans la gestion des trois sorties moteurs, des trois entrées détecteurs et du port de communication infrarouge. Les câbles électriques sont utilisés pour relier le RCX aux moteurs, lampes, détecteur de contact, de lumière, de rotation, etc. Le port de communication est utilisé pour charger les programmes en provenance du PC et peut servir à la communication entre deux RCX.

Le RCX est alimenté par 6 piles AA. Les versions plus anciennes possédaient aussi une prise 9V pour y brancher un transformateur adaptateur électrique optionnel. Si vous avez ce type de RCX, le transformateur est vite amorti par l'économie de piles qu'il permet de faire¹⁵. Un bon réflexe est d'avoir toujours un jeu de piles rechargeables d'avance. Les piles alcalines rechargeables fonctionnent bien avec le RCX¹⁶.

Note de montage : En construisant votre robot, rappelez-vous que vous devrez parfois changer les piles. Tenez-en compte dans sa conception.



Illustration 4-1. La brique programmable RCX

¹⁵ NDT : cette version du RCX est toujours disponible dans la gamme éducation de LEGO.

¹⁶ Les accumulateurs NiMH fonctionnent également, mais la puissance disponible sur les moteurs est limitée par la tension plus faible.

4.1.1 Le microprogramme

Le RCX possède une mémoire RAM de 32Ko. La majorité de cette mémoire est utilisée par le microprogramme¹⁷ que vous devez charger avant de pouvoir exécuter un programme. La mémoire restante (environ 6Ko) est réservée aux téléchargements de 5 programmes au maximum. Ceci peut sembler faible, mais en réalité la plupart des programmes RCX ne dépassent pas les quelques centaines d'octets. Le reste de la mémoire sert au déroulement des programmes.

Quand on écrit un programme pour le RCX, il n'est pas constitué de code machine. Il s'agit de codes formant un langage intermédiaire qui va être interprété par le microprogramme. C'est similaire à ce qu'il se passe avec les programmes en Java sur le web qui sont interprétés par la machine virtuelle Java qui fonctionne à travers votre navigateur. L'utilisation d'un langage intermédiaire permet au RCX d'avoir un environnement fiable pour l'exécution des programmes. Votre programme ne correspondra peut-être pas à votre attente mais au moins il ne plantera pas le RCX.

Comme le microprogramme est implanté en RAM, il s'efface si le RCX est privé de ses piles plus de quelques instants. Un condensateur dans le RCX augmente ce délai afin que vous ayez le temps de changer les piles (15 à 30 secondes)¹⁸. Si après avoir changé les piles votre RCX ne fonctionne pas normalement, il se peut que vous le microprogramme ait été effacé. Vous pouvez le vérifier en examinant l'affichage du RCX. Si vous voyez seulement le numéro de programme et la silhouette de la minifig (immobile ou marchant comme sur l'illustration 4-1), alors le microprogramme n'est pas chargé. C'est d'ailleurs ainsi que vous trouverez votre RCX quand vous recevrez votre kit RIS.

Note de montage : A partir du moment où le RCX est allumé, le RCX reçoit tous les messages parvenant à son port de communication infrarouge. Il y a beaucoup d'animation lors d'un concours et il est possible qu'une autre équipe puisse par mégarde effacer les programmes sauvegardés dans votre propre RCX. Vous devez faire attention à abriter le port infrarouge quand vous ne l'utilisez pas.

4.1.2 La programmation

Le RCX est programmé grâce à un logiciel spécifique que vous avez préalablement installé sur votre PC. Le programme est traduit en code pour la transmission passage par le port infrarouge (à l'aide de la tour IR). Cette méthode de programmation – écrire le code sur un type d'ordinateur pour le faire tourner sur un autre type d'ordinateur – s'appelle du développement croisé. Un ordinateur sans clavier ni écran, comme le RCX, s'appelle un système embarqué. Cela signifie que tous les participants à la FLL sont des

¹⁷ NDT : Le microprogramme (firmware en anglais) assure plusieurs fonctions : interprétation du langage intermédiaire du RCX, pilotage des moteurs et détecteurs, gestion de l'afficheur et des boutons, téléchargement des programmes par le port infrarouge.

¹⁸ NDT : faites attention lors du changement de piles de ne pas appuyer sur le bouton On/Off du RCX, ce serait l'effacement assuré.

développeurs de systèmes embarqués, familier d'outils de développement croisé. C'est quelque chose d'impressionnant à mettre sur votre CV !

Les programmes peuvent être écrits en utilisant soit le langage RCX soit ROBOLAB¹⁹. Le langage RCX est un outil de programmation graphique fourni par LEGO avec le kit RIS. Il est conçu pour les gens qui n'ont pas d'expérience en programmation. Le programme est écrit en choisissant des blocs d'instructions et en les accolant, un peu comme de vraies briques LEGO. La version initiale du langage RCX (v1.0 et 1.5) était très limitée. De nombreuses instructions pourtant interprétables par le microprogramme étaient absentes et la gestion des variables était minimale. Si vous souhaitez utiliser le langage RCX, assurez-vous d'avoir la version 2.0. Le langage RCX est disponible uniquement pour PC.



Illustration 4-2. Copie d'écran du langage RCX.

ROBOLAB est un produit LEGO DACTA, la branche éducation de LEGO. Il est basé sur LabVIEW, un environnement de programmation graphique qui est utilisé par des ingénieurs et scientifiques pour des opérations de mesure et de contrôle. Les ingénieurs de la NASA ont utilisé LabVIEW pour piloter le rover Sojourner sur Mars ! Tout comme le langage RCX, ROBOLAB utilise des métaphores graphiques pour écrire les programmes. Les icônes des commandes sont choisies dans une liste et placées sur l'espace de programmation. Les commandes sont alors reliées ensemble, indiquant le déroulement du programme.

¹⁹ Le code RCX et Robolab sont les seuls langages de programmation admis par la FLL, mais beaucoup d'autres sont disponibles (NQC, BrickOS, LeJOS, pbForth...). Voir <http://bricxcc.sourceforge.net/>



Illustration 4-3. Copie d'écran de ROBOLAB

ROBOLAB est un outil plus puissant que le langage RCX, mais toutes ses capacités ne sont pas tournées vers la programmation de robots. Une large partie de sa fonction consiste à piloter le RCX en tant qu'instrument de mesure de laboratoire. Vous pouvez écrire un programme qui tourne sur le PC mais qui collecte les valeurs des détecteurs reliés au RCX. D'autres outils ROBOLAB sont disponibles pour recueillir et analyser les données. Il y a même des outils pour publier les mesures ou les convertir en page web. Il vous faudra beaucoup de temps pour exploiter toutes les possibilités de ROBOLAB. Heureusement, tout ce dont vous aurez besoin pour la FLL est rassemblé dans une section qui s'appelle Inventor. ROBOLAB est aussi accompagné d'une documentation complète ainsi que d'un manuel en ligne disponible ici :

<http://www.ceeo.tufts.edu/robolabatceeo/documentation.htm> .

Programmer avec le langage RCX ou ROBOLAB est sensiblement la même chose. Le programmeur utilise la souris pour sélectionner une commande dans une liste d'icônes qui représentent les instructions du programme. L'icône choisie est placée dans l'espace de travail. Une sorte de connexion graphique métaphorique est utilisée pour définir le déroulement du programme (que ce soit l'empilement pour le langage RCX ou des câbles pour ROBOLAB). Quand le programmeur en a terminé avec les instructions, il ou elle utilise le menu ou la barre d'outils pour compiler le programme et le télécharger dans le RCX.

Si vous utilisez un Mac, vous utiliserez forcément ROBOLAB. Sinon le choix est surtout question de goût. Une analyse attentive des résultats des compétitions FLL qui se sont déroulées dans le Minnesota ne montre aucune corrélation entre les équipes gagnantes et le langage de programmation choisi.

4.2 Moteurs

Le moteur qui est utilisé dans le kit défi est un moteur 9 volt avec réducteur. Il possède un train d'engrenage réducteur interne de rapport 12:1. Il convertit une rotation de 4200

tr/min en une vitesse plus facilement exploitable de 350 tr/min²⁰ sur l'arbre de sortie. Le réducteur interne augmente aussi le couple à 8.9 N.cm²¹.

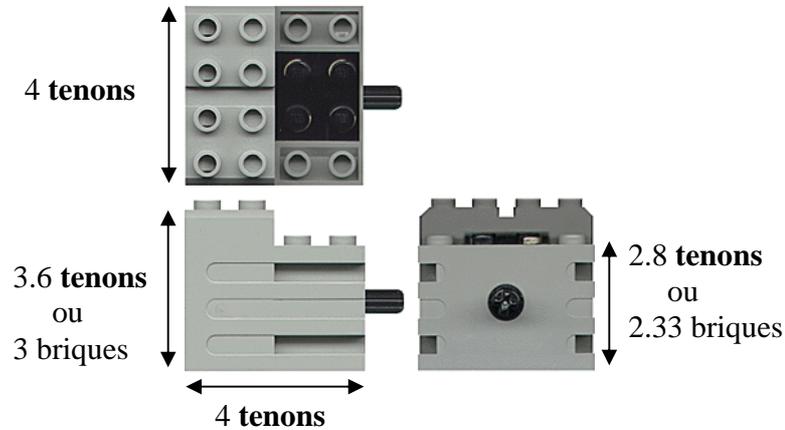


Illustration 4-4. Moto-réducteur 9 Volt

Le moteur sans charge consomme normalement environ 10 milliampères (mA). Cela peut rapidement atteindre 200 mA ou plus s'il est très sollicité. Ajoutez les détecteurs qui consomment de l'électricité (détecteur de lumière et rotation), l'affichage LCD, le microcontrôleur, et vous voyez qu'un robot FLL typique consomme 600 – 700 milliampères. En s'appuyant sur des piles de bonne qualité de 2500 milliampère.heure (mAh), vous pouvez vous attendre à devoir les changer après 3-4 heures de marche.

4.2.1 Les modes

Le RCX possède trois modes de contrôle des moteurs—Arrêt, Marche et Flottant. En mode Flottant, le moteur n'est pas entraîné et peut tourner librement. Il se comporte simplement comme s'il était déconnecté.

En mode Arrêt, le RCX court-circuite en interne le connecteur de sortie. Cela donne un effet de freinage au moteur qui lui est connecté, le forçant rapidement à s'arrêter de tourner.

En mode Marche, le RCX envoie au moteur une tension +9V ou -9V pour le faire tourner dans le sens des aiguilles d'une montre ou en sens inverse. Une modulation de largeur d'impulsions (PWM) permet de fournir 8 niveaux d'alimentation.

²⁰ La vitesse typique sous charge est plus proche de 200 tr/min

²¹ D'après le Random Hall Lego Robotics Seminar (web.min.edu/sp.742/www/motor.html)

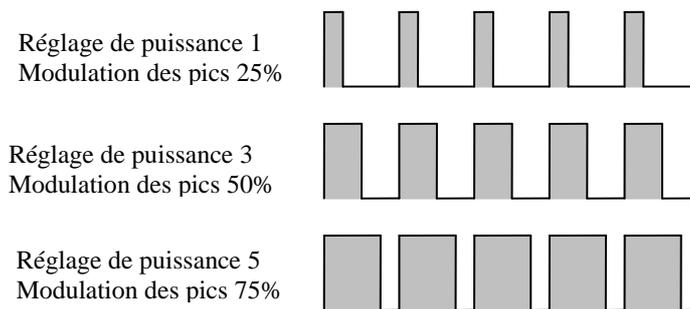


Illustration 4-5. Pulsations modulées

La modulation de largeur d'impulsions est une manière peu onéreuse de contrôler la puissance en sortie. Au lieu de modifier le niveau de la tension de sortie (les régulateurs de tension sont chers²²), le RXC envoie des pics de courant vers le moteur. Les différents niveaux de puissance sont obtenus en modulant la durée de ces pics (variation du rapport cyclique²³). Sur le RCX, le réglage de puissance minimale est zéro correspondant à une modulation des pics de 12,5% (la puissance est envoyée 12,5% du temps). Au niveau 7, la puissance est fournie de manière continue (100%).

Le moteur avec réducteur est équipé d'un petit volant d'inertie qui maintient la vitesse de rotation entre les impulsions. Vous pouvez le constater en faisant tourner à la main l'axe d'un moteur libre. L'axe fait plusieurs tours avant de ralentir doucement jusqu'à s'arrêter. Si vous continuez à le faire tourner toutes les secondes, il tournera à une vitesse relativement constante. C'est un peu une modulation de largeur d'impulsions à la mode mécanique.

Une fois que le moteur tourne, il ne faut pas beaucoup d'énergie pour maintenir sa rotation. Cela peut représenter un problème si vous utilisez des réglages de puissance faibles pour faire tourner votre moteur doucement. Si le moteur n'est pas en charge, il tourne aussi vite quel que soit le réglage de puissance. Chaque impulsion de courant fournit assez d'énergie pour palier aux pertes par frottements qui ont lieu durant le reste du cycle. L'énergie supplémentaire est emmagasinée dans le volant d'inertie. A chaque pulsation, un peu plus d'énergie s'accumule dans le volant d'inertie, augmentant la vitesse de rotation jusqu'à ce qu'un point d'équilibre soit atteint où le couple moteur commence à baisser.

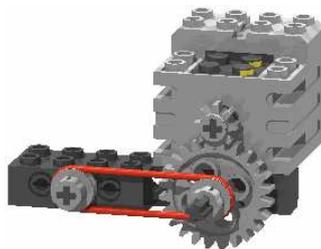


Illustration 4-6. Utilisation d'une poulie pour créer de la charge

²² ...ou énergétiquement inefficaces (NDT)

²³ NDT: Rapport cyclique : rapport entre la durée de la phase active et la durée totale du cycle.

Le contrôle de la vitesse du moteur peut être obtenu en créant une charge par frottement. Après avoir fait attention à limiter les frottements tout au long de la conception de votre robot, il est temps de s’amuser un peu. Prenons la liste des bonnes pratiques de construction et violons–les les unes après les autres. Serrez les manchons contre les barres. Utilisez trois ou quatre roues dentées au lieu d’une seule. Soyez créatif mais soyez aussi sûr que les juges connaissent les raisons qui vous ont amené à faire ces modifications. Vous ne voulez pas qu’on vous pénalise pour une mauvaise conception mécanique !

4.2.2 Les branchements

On branche les moteurs sur l’une des trois sorties du RCX par l’intermédiaire d’un câble électrique équipé d’une connexion à tenons à chacune de ses extrémités. Vous pouvez inverser le sens de rotation du moteur en modifiant l’orientation de la connexion. Si vous avez besoin de débrancher et rebrancher un moteur durant une compétition, assurez-vous de faire les branchements toujours de la même manière. En guise de détrompeur, vous pouvez utiliser des plaques 1x2 de couleur pour marquer les connecteurs et les ports des moteurs.

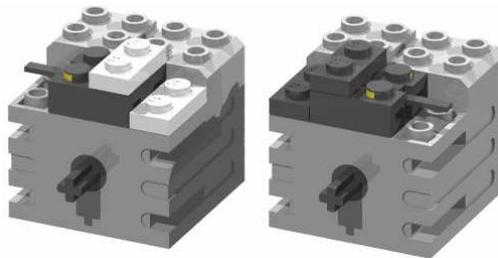


Illustration 4-7. Utilisation d'un code de couleur pour repérer l'orientation des branchements

Les moteurs engendrent des forces relativement grandes qui peuvent les amener à bouger s'ils sont montés uniquement par emboîtement. Un maintien supplémentaire est nécessaire. On peut faire cela en utilisant la technique de l'entretoisement comme vu précédemment pour les châssis.

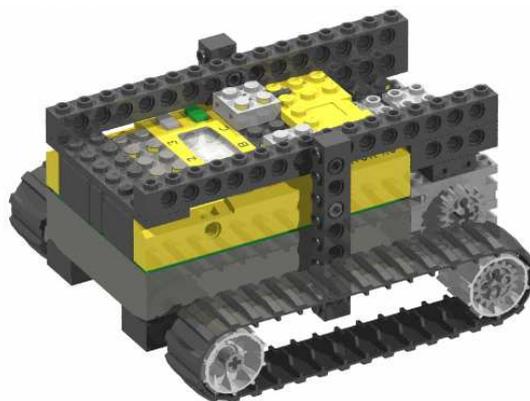


Illustration 4-8. Amélioration du montage de moteurs par entretoisement

Le kit RIS vous procure des plaques 1 x 2 avec des rails qu'on peut utiliser en guise de cornières d'assemblage pour les moteurs. Elles procurent une possibilité de montage compact et solide des moteurs sur des barres. Les rails permettent aussi de faire un

assemblage des moteurs qui permet un démontage très rapide. Le moteur sur l'illustration 4-9 est facilement enlevé après avoir ôté la plaque 2x6 du dessous qui le maintenait en place. Cela est fort utile si la conception de votre robot nécessite que vous déplaciez un moteur durant une compétition.

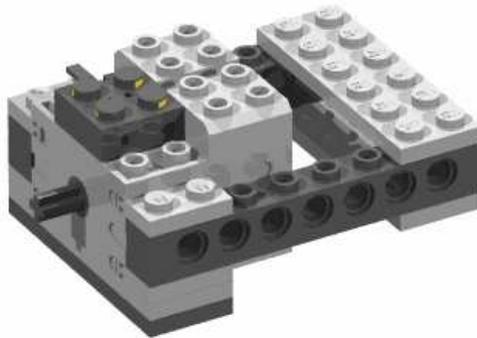
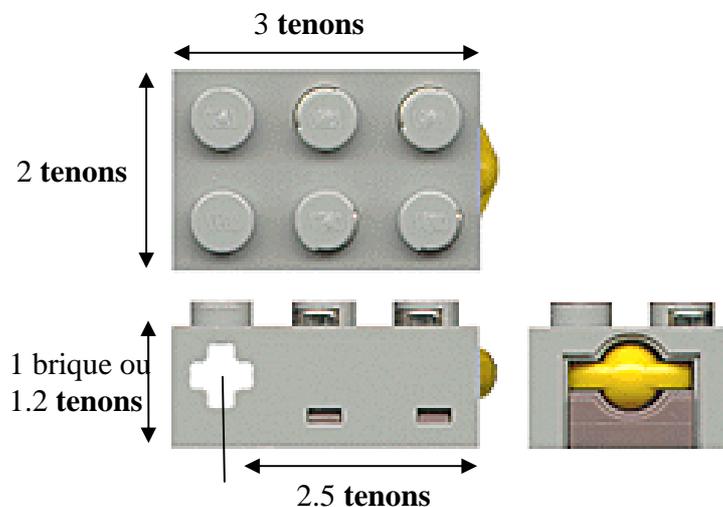


Illustration 4-9. Montage de moteur avec utilisation des rails

4.3 Détecteur de contact

De tous les détecteurs LEGO, le détecteur de contact est le plus simple d'emploi. Il se présente sous la forme d'une brique 2 x 3 équipé d'un bouton poussoir. Le bouton fait varier la résistance du détecteur quand on appuie dessus. Le logiciel du RCX transforme ce retour du capteur en un signal binaire : 0 quand le bouton est relâché, 1 quand il est pressé.



Ce détecteur est spécial en cela qu'il n'a pas de câble relié à lui directement, contrairement aux capteurs de rotation ou de lumière. En lieu et place, il faut le relier avec un câble électrique comme on le ferait pour un moteur. Les quatre tenons proche du bouton poussoir sont des contacts que l'on doit brancher au câble électrique. L'orientation n'a pas d'importance si le câble est relié aux quatre tenons. Vous pouvez aussi brancher le câble à deux tenons seulement mais dans ce cas vous devez le brancher comme indiqué ci-dessous.

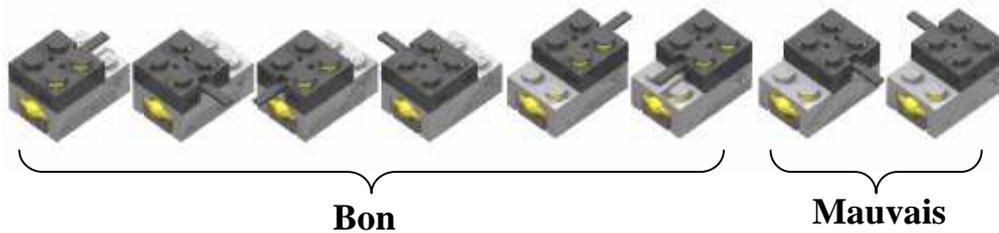


Illustration 4-10. Connecter le détecteur de contact

4.3.1 Les pare-chocs

Un pare-chocs est un mécanisme qui indique au robot qu'il a percuté un obstacle. Quand un pare-chocs est frappé, il bouge et vient presser ou relâcher le détecteur de contact, indiquant le choc au robot. Les pare-chocs sont l'utilisation principale des détecteurs de contact dans la FLL. Peut être parce que c'est le rôle premier des capteurs de contact dans la Constructopedia, ou parce que les pare-chocs sont très utiles

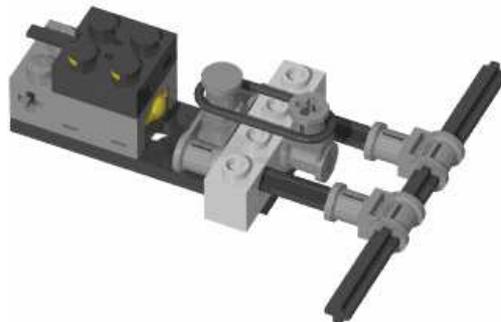


Illustration 4-11. Un simple pare-chocs

L'assemblage d'un pare-chocs se compose généralement de quatre parties : le pare-chocs, un détecteur, un mécanisme de retour et une structure de soutien. Le pare-chocs est la partie qui reçoit le choc et qui le convertit en déplacement qui peut être « ressenti » par le capteur. Le déplacement est souvent un glissement (Illustration 4-11) ou un pivotement (Illustration 4-12), même si j'ai déjà vu des pare-chocs intéressants faits de pièces flexibles qui se courbent. Le détecteur est d'habitude un capteur de contact mais on peut utiliser un détecteur de rotation ou de lumière.

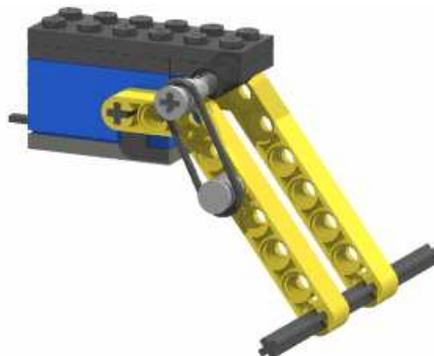


Illustration 4-12. Un pare-chocs qui utilise un détecteur de rotation

Le mécanisme de retour amène le pare-chocs à retrouver sa position initiale après le choc, quand l'obstacle n'est plus là. Le plus commun de ces mécanismes est le ruban élastique qui maintient le pare-chocs contre une butée. La conception de certains pare-chocs utilise la gravité dans ce rôle. Le pare-chocs simplissime de l'illustration 4-11 utilise le ressort du bouton presseur du détecteur de contact comme mécanisme de retour. Cette conception peu fiable, génère occasionnellement un signal de collision alors qu'aucune n'a eu lieu. L'ajout d'un ruban élastique règle ce problème.



Illustration 4-13. Un pare-chocs de conception « contact normalement fermé »

La plupart des pare-chocs peuvent être classés dans deux catégories en fonction de la façon dont il gère le contrôle des chocs. Le pare-chocs de l'illustration 4-11 est une conception dite "Contact normalement ouvert". Quand un choc a lieu, le pare-chocs presse sur le bouton et il ferme les contacts électriques. Dans une conception "Contact normalement fermé", le mécanisme de retour maintient le pare-chocs contre le bouton presseur. Un choc éloigne le pare-chocs du bouton, ouvrant les contacts électriques.

Quand un pare-chocs « contact normalement ouvert » comme celui de l'illustration 4-11 percute un obstacle, l'impact de la collision est transmis à travers le pare-chocs au détecteur de contact. Ceci affaiblit la fixation du détecteur et après quelques chocs, le détecteur peut tomber. On peut renforcer le montage, mais cela ne ferait que transmettre le choc au reste de la structure du robot.

Dans une conception « contact normalement fermé » comme sur l'illustration 4-13, la puissance du choc est absorbée par les rubans élastiques. De plus ce pare-chocs est à longue distance. La distance est grande entre le premier contact du pare-chocs et le contact dur direct du robot avec l'obstacle. Cette distance donne du temps au robot pour s'arrêter avant un choc réel lors d'une détection d'obstacle.



Illustration 4-14. Pare-chocs « contact normalement ouvert » amélioré

Les pare-chocs « contact normalement fermé » sont efficaces dans la détection d'obstacles évitant les chocs. Mais les détecteurs en « contact normalement fermé » posent problème dans le multiplexage des détecteurs (plusieurs détecteurs sur un seul port). Un détecteur « contact normalement fermé » maintient le port à 1 (dans l'hypothèse où il est configuré en tant que port détecteur de contact) ou 100 (dans l'hypothèse où il est configuré en tant que port détecteur de lumière). Le pare-chocs amélioré ci-dessus a tous les avantages d'un « contact normalement fermé » avec une configuration « contact normalement ouvert »

4.3.2 Contacteur de butée et de position

Les capteurs de contact ont d'autres applications que celle de pare-chocs. Les contacteurs de butée et de position vous permettent de savoir quelle est la position d'un des composants de votre robot. Ce sont des détecteurs discrets (par opposition aux détecteurs continus) en cela qu'il fournissent une information de positionnement seulement en certains points. Vous connaîtrez votre position seulement quand le détecteur est pressé. Quand il ne l'est pas, vous savez seulement où vous n'êtes pas.



Illustration 4-15. Contacteur de position et de butée

Les contacteurs de butée et de position ne se différencient que dans leur utilisation. Les contacteurs de butée sont des garde-fous qui vérifient que rien ne se trouve là où il ne devrait pas. Ce sont des mécanismes de protection qui sont utilisés quand un dommage peut survenir si un dispositif se déplace en dehors de sa zone de travail. Au contraire, un contacteur de position vous signale quand un dispositif est à l'endroit où il doit se trouver.

Le chercheur de lumière de l'illustration 4-15 a deux contacteurs de butée et un de position, tous n'employant qu'un seul détecteur de contact ! Les deux cames inférieures font office de contacteurs de butée. Elles empêchent le poursuiveur de pivoter au-delà de +/-90 degrés. La came supérieure est le contacteur de position qui indique au RCX que le détecteur de lumière est de face. Pour pouvoir interpréter correctement les indications du détecteur de contact, le programme doit soigneusement garder trace de la position du chercheur ainsi que du sens de rotation.

4.3.3 Détecteur de rotation

Le manque d'un second détecteur de rotation est peut-être la plainte que j'ai le plus souvent entendue de la part des équipes FLL. En avoir deux semble fondé ; un pour la gauche et un autre pour la droite ou bien un pour la distance et un pour la direction. D'autres équipes ont vu ce manque comme un défi et certains trouvèrent des solutions ingénieuses.

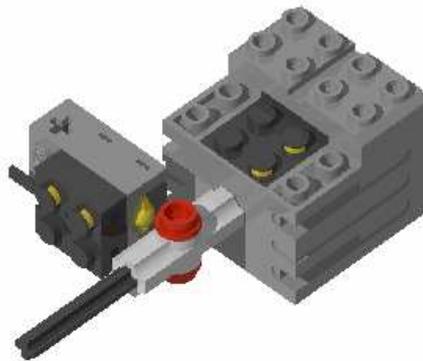


Illustration 4-16. Un détecteur de rotation par contact

Tout comme un détecteur de rotation peut être utilisé pour créer un détecteur de contact dans un pare-chocs, un détecteur de contact peut être employé pour mesurer une rotation. Dans un détecteur de rotation, les opto-interrupteurs utilisent la lumière pour contrôler la position des ailettes montées sur rotor. Sur l'illustration 4-16, le détecteur de contact est employé pour contrôler la position du connecteur d'axe.

Question: Quelle est la résolution du détecteur de rotation de l'illustration 4-16?

4.4 Le détecteur de lumière

Le détecteur de lumière se présente sous la forme d'une brique LEGO 2 x 4 avec une LED (Diode Electroluminescente, DEL) rouge et d'un phototransistor. La LED rouge éclaire la zone se situant devant la brique et le phototransistor mesure l'intensité de la lumière réfléchi. Le détecteur de lumière renvoie une valeur entre 0 et 100%. La valeur la plus faible que je n'ai jamais mesuré est 20%, mesure que j'ai effectuée à minuit au milieu de mon sous-sol avec les lumières éteintes. Vous pouvez atteindre 100% en visant le soleil un jour clair ou en tenant le détecteur à quelques cm d'une ampoule de 100W. Dans des conditions plus classiques, les valeurs varient plutôt entre 30 et 60%.

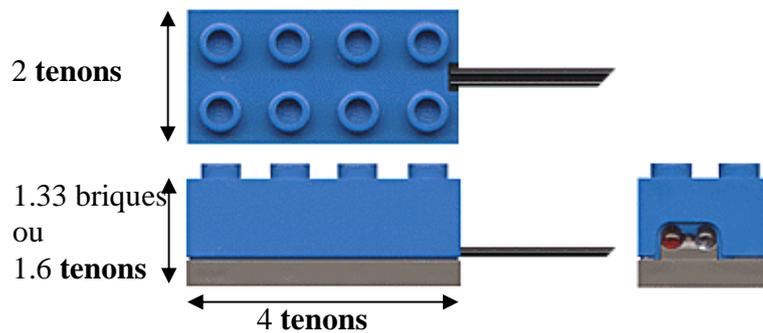


Illustration 4-17. Le détecteur de lumière

Une de mes plus anciennes expériences avec le détecteur de lumière c'est celle où je l'ai utilisé pour faire une machine à trier les bonbons. Je voulais tirer des M&Ms en fonction de leur couleur (les marrons sont mes préférés). L'idée est simple. Utiliser le détecteur de couleur puis déplacer le robot pour le positionner au-dessus du bon paquet.

J'ai fait un robot pivotant du type table tournante autour duquel je pouvais placer des bacs pour stocker les bonbons. La chenille caoutchouc faisait un joli tapis roulant et j'ai trouvé une idée pour faire ce que j'appelais une « pompe à bonbons » qui marchait plutôt bien pour délivrer un bonbon à la fois depuis la réserve. Toute la mécanique étant en place, il ne me restait plus qu'à rentrer les valeurs du détecteur de lumière pour chaque couleur dans le programme. Je me prenais à rêver de robots de combat mâchouillant des M&Ms marron...

Table 4-1. Valeur du détecteur de lumière pour les M&Ms

Distance au détecteur	Rouge	Orange	Jaune	Vert	Bleu	Marron
	½ tenon	48	48	51	38	40
1 tenon	45	46	48	37	35	35

Je n'ai jamais pu faire marcher très bien cette trieuse car les valeurs pour les différentes couleurs de M&Ms sont très proches. Après avoir cherché un peu et essayé deux trois trucs, j'ai pu trier en trois groupes : les jaunes dans un bol, les oranges et rouges dans un autre, les bleus, verts et marrons dans un troisième. Sans doute en ai-je eu assez de jouer avec ce robot, aussi l'ai-je démonté afin de récupérer les pièces. Je pense que c'est aussi ce qui arrive à de nombreuses équipes FLL quand elles essayent d'utiliser le détecteur de lumière pour leur robot. Ils songent à une idée vraiment bonne, la mettent en œuvre pour la tester. Durant les essais, le robot ne fonctionne pas très bien ou pas de façon fiable. L'équipe réfléchit un peu, n'arrive pas à faire mieux et renvoie le détecteur dans le vrac de pièces.

Le problème que j'ai eu avec la trieuse à bonbons n'est pas la faute du détecteur de lumière. Le projet était voué à l'échec dès le départ car j'ai choisi le détecteur de lumière alors qu'il n'était pas approprié pour cette application. J'avais besoin d'une meilleure compréhension du détecteur de lumière avant de l'utiliser dans d'autres projets et pour accroître mes connaissances j'ai donc décidé de réaliser une série d'expériences.

4.4.1 Expérience n°1

Grâce à ma tentative de réalisation d'une trieuse de bonbons, je savais que la valeur du détecteur de lumière dépend de la couleur de l'objet visé. Mais il apparaît aussi que cette valeur dépend aussi de la distance au détecteur de l'objet, des écarts de taille et de forme de l'objet et des conditions de lumière ambiante. Si je voulais apprendre quelque chose au sujet du détecteur de lumière, il fallait que je limite le nombre de variables. Pour ma première expérience, je décidais d'étudier la corrélation entre la valeur lue, la couleur et la distance.

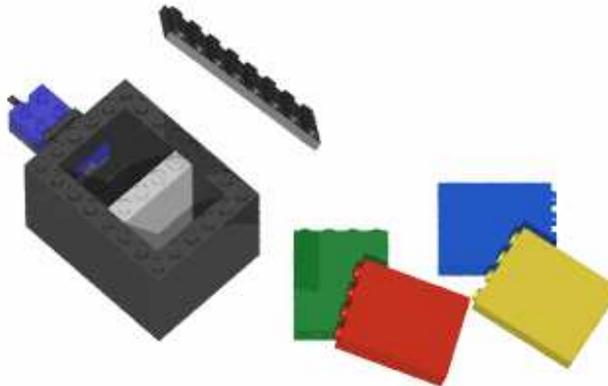


Illustration 4-18. Expérience à propos de la couleur

Pour cette expérience, je construisis une boîte faite de pièces LEGO, le détecteur de lumière placé au centre de l'une de ses extrémités. La boîte a des pourtours unis, un fond et un couvercle pour empêcher la lumière d'entrer et de fausser les résultats. Ensuite, je fis différentes « cibles » colorées que je pouvais placer à différentes distances du détecteur. J'ai utilisé des briques 1 x 4 pour faire les cibles car j'en disposais dans de nombreuses couleurs différentes et qu'elles permettent à d'autres de reproduire mon expérience. Pour chaque couleur différente, j'ai pris des mesures à des distances de 1, 2, 3, 4, et 5 **tenons**. Les résultats sont regroupés dans le tableau suivant :

Table 4-2. Valeurs de l'expérience sur les couleurs

	Distance (tenons)				
	1	2	3	4	5
Noir	43	38	35	33	27
Blanc	54	48	43	40	37
Gris	49	43	39	35	32
Gris foncé	45	40	35	31	29
Jaune	53	48	43	39	36
Rouge	50	45	41	37	35
Bleu	44	38	34	32	31
Vert	42	37	32	29	28

4.4.1.1 Couleur

Alors que je faisais mon expérience sur les couleurs, il m'a paru évident que le détecteur de lumière ne percevait pas les couleurs comme moi. Pour moi, les briques vertes

semblaient plus brillantes que les briques rouges, alors que les valeurs du détecteur étaient toujours plus faibles pour les briques vertes. En fait, les mesures pour les briques vertes, les bleues, les gris foncé et noires étaient sensiblement identiques.

La lumière est faite d'ondes électromagnétiques - vibrations de champs électrique et magnétique à travers l'espace. Il y a plusieurs sortes d'ondes électromagnétiques : certaines peuvent être ressenties (la chaleur), d'autres peuvent être vues (lumière), et certaines nous sont utiles (télévision et radio). Nos yeux perçoivent les ondes de longueurs d'ondes de 400nm (violet) à 700nm (rouge). Nous appelons cette petite partie du spectre électromagnétique la lumière visible. Notre œil perçoit chacune des longueurs d'onde du spectre lumineux comme une couleur différente. La lumière de longueur d'onde de 700nm est le rouge; la lumière bleue a une longueur d'onde d'environ 460nm.

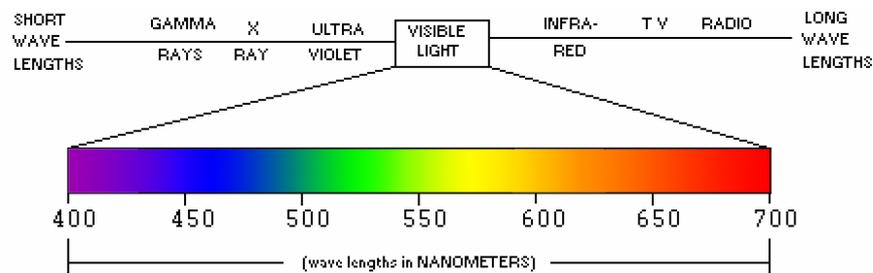


Illustration 4-19. Spectre de la lumière visible

Le détecteur de lumière LEGO utilise un phototransistor silicium comme élément sensible. D'après Michael Gasperi²⁴, ce phototransistor est particulièrement sensible aux rouges et infrarouges, avec un pic de sensibilité autour de 800nm. Le type de LED rouge bon marché utilisé dans le détecteur de lumière émet un spectre relativement large, mais son pic d'intensité se trouve quelque part entre 650 et 750nm. Cela correspond relativement bien au phototransistor. Nos yeux sont eux plus sensible du bleu-vert au jaune (500nm – 600nm). Ceci explique pourquoi la brique verte me paraît si lumineuse alors que c'est la brique rouge qui est brillante pour le détecteur de lumière. Mais je ne savais toujours pas expliquer correctement pourquoi les valeurs sont si fortes pour le jaune alors qu'elles sont si faibles pour le vert.

²⁴ "Extreme Mindstorms An Advanced Guide to Lego Mindstorms", Dave Baum, Michael Gasperi, Ralph Hempel and Louis Villa

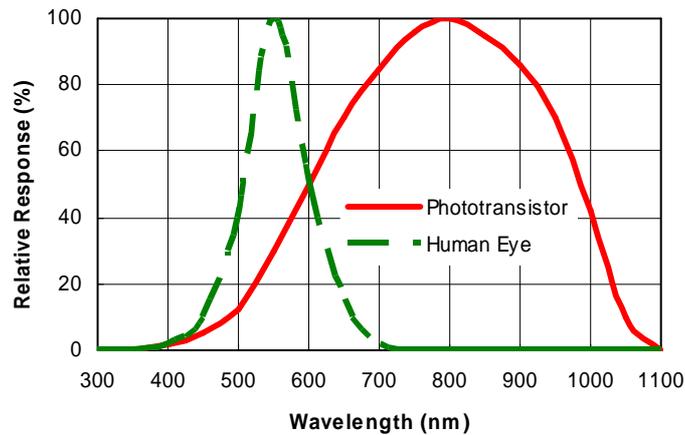


Illustration 4-20. Le détecteur de lumière ne voit pas comme nos yeux

Il y a deux façons d'observer des couleurs. La première consiste à émettre de la lumière dans une longueur d'onde correspondante. La LED rouge du détecteur émet de la lumière à une longueur d'onde d'environ 660nm, ce qui explique qu'elle est rouge. L'écran de votre ordinateur ou de votre télévision émet de la lumière rouge, verte et bleue. Les autres couleurs sont recréées par mélange de ces couleurs primaires. La seconde façon consiste à réfléchir la lumière dans la longueur d'onde qu'on souhaite observer et d'absorber toutes les autres longueurs d'ondes. La brique LEGO rouge réfléchit la lumière rouge mais elle absorbe la lumière bleue et verte.

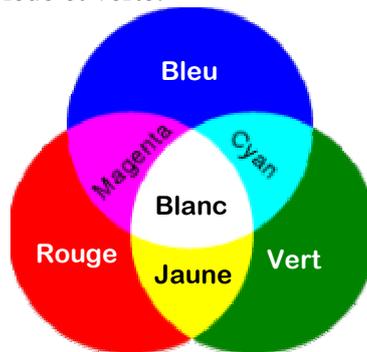


Illustration 4-21. Additivité des couleurs primaires

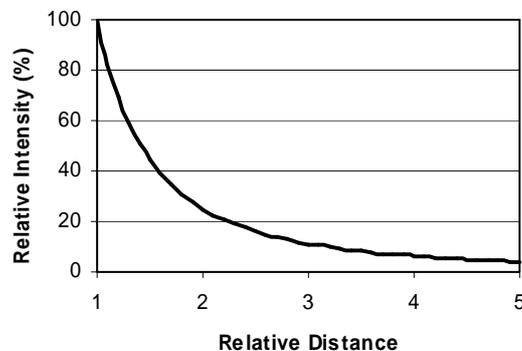
Les valeurs de mesures du détecteur de lumière de la Table 4-2 prennent du sens si vous pensez les couleurs en termes de couleur émises, réfléchies et absorbées. Avec le couvercle en place sur mon boîtier d'essai, la seule couleur émise sur la brique colorée cible est la lumière rouge émise par la LED. Les briques LEGO rouges réfléchissent bien la lumière rouge c'est pourquoi elles apparaissent lumineuses au détecteur et rouges à nos yeux. Les briques vertes et bleues ne réfléchissent pas la lumière rouge et les mesures laissent croire qu'elles sont noires. Les briques jaunes et blanches donnent des valeurs élevées car elles réfléchissent non seulement le rouge mais aussi d'autres longueurs d'ondes que la LED émet.

Question: Dans une pièce sombre, quelle est la couleur que vous voyez quand vous éclairez une brique jaune avec la LED rouge du détecteur de lumière ?

4.4.1.2 Distance

La loi de l'inverse du carré est une brillante formule mathématique que l'on rencontre dans de nombreux domaines de la physique. Elle définit une relation entre la valeur d'une grandeur physique comme la force de gravité ou la puissance d'un son et la distance à laquelle vous vous situez de la source à l'origine de cette grandeur. La loi de l'inverse du carré pour l'intensité lumineuse signifie que l'intensité lumineuse d'une source de lumière constante décroît comme le carré de la distance à la source lumineuse. On l'exprime généralement par le rapport des intensités lumineuses I_1 et I_2 aux carrés des distances d_1 et d_2 .

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{d_2^2}{d_1^2}$$



Cela signifie que si vous doublez la distance à une source de lumière, l'intensité observée décroît de $(1/2)^2$ ou $1/4$ de sa valeur initiale. A 3, 4, et 5 fois la distance, l'intensité décroît de $1/9$, $1/16$, et $1/25$ de la valeur initiale. En pratique, l'intensité chute dès que vous vous éloignez de la source. Puis, plus vous vous éloignez, moins le changement devient sensible.

On comprend sans surprise que les valeurs mesurées via le détecteur de lumière décroissent rapidement alors que la distance à la cible augmente. Je ne suis pas certain de savoir pourquoi les valeurs ne décroissent pas aussi rapidement que le prévoit la loi de l'inverse des carrés, mais je suppose que c'est à cause de la proximité de la LED au phototransistor (une bonne part de la lumière mesurée provient directement du voisinage de la LED). A regarder les mesures du tableau, je comprends pourquoi je n'ai jamais pu faire marcher correctement ma trieuse de bonbons. Une modification de la distance aussi faible qu' $1/2$ **tenon** est suffisant pour que le détecteur confonde rouge et jaune ou bleu et vert, et si une brique rouge est placée deux **tenons** plus loin qu'une verte, le détecteur ne peut pas les différencier.

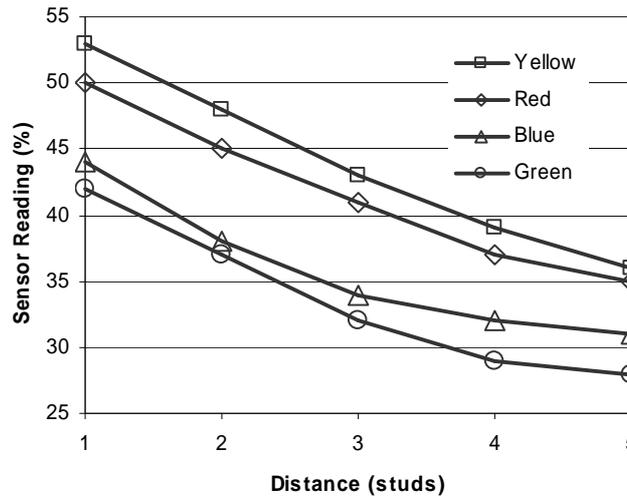


Illustration 4-22. Valeurs mesurées de l'expérience sur les couleurs

4.4.1.3 Conclusions

De cette expérience, j'ai dressé quelques conclusions à propos du détecteur de lumière. Le plus important est que vous pouvez utiliser le détecteur pour mesurer une distance si vous connaissez la couleur de la surface réfléchissante ou que vous pouvez dire la couleur si vous connaissez la distance de la surface, mais que vous ne pouvez pas faire les deux en même temps. Pour de meilleurs résultats, le détecteur doit être employé dans des conditions contrôlées avec précautions. Une attention particulière doit être apportée à la limitation du nombre de variables.

Le détecteur ne voit pas la lumière comme les être humains. La sensibilité du détecteur ne correspond pas à la vision humaine. Ce qui vous apparaît brillant peut paraître sombre au détecteur et la lumière qui se situe en dehors du visible peut facilement conduire le détecteur à des valeurs de 100%. Il est toujours de bon aloi de faire et d'analyser des mesures avec un détecteur avant de développer une stratégie d'exploitation de celui-ci.

J'ai aussi appris que le détecteur de lumière est très sensible à la distance entre lui et la surface réfléchissante. Quand on utilise le détecteur pour mesure des différences il doit être placé à une distance fixe de la surface réfléchissante. Même de petites variations de distances peuvent rendre les mesures inexploitable. Souvenez-vous de ça quand vous planifiez l'utilisation d'un détecteur de lumière sur votre robot.

4.4.2 Expérience n°2, lumière ambiante

Dans ma première expérience, j'ai étudié la relation entre couleur, distance et valeur de luminosité mesurée. D'après les données recueillies, j'ai déduit que le détecteur est sensible non seulement à la couleur des objets observés mais aussi à la longueur d'onde de la lumière éclairant l'objet. Lors d'un usage normal, le détecteur et la cible ne se trouvent pas dans un boîtier fermé. Des lumières extérieures et la lumière ambiante auront des effets sur les mesures fournies par le détecteur. Pour mieux comprendre les effets de la lumière ambiante j'ai réalisé une seconde expérience.

Pour cette expérience, j'ai construit en guise de cible un mur composé de différentes couleurs et un support réglable pour poser le détecteur à des distances connues des briques. Le support est conçu de manière à minimiser son ombre portée. J'ai alors mesuré les valeurs pour chaque couleur de briques pour différentes distances sous différentes conditions d'éclairages. D'abord, en guise d'étalonnage, j'ai pris les mesures dans une pièce non éclairée de mon sous-sol (mesure à 22%). J'ai refait cette expérience dans les conditions d'éclairage d'un sous-sol « normales » (mesure à 46%) puis dans des conditions « lumineuses » que l'on rencontre en compétition (mesure à 65%). Toutes les mesures sont réunies dans la Table 4-3.

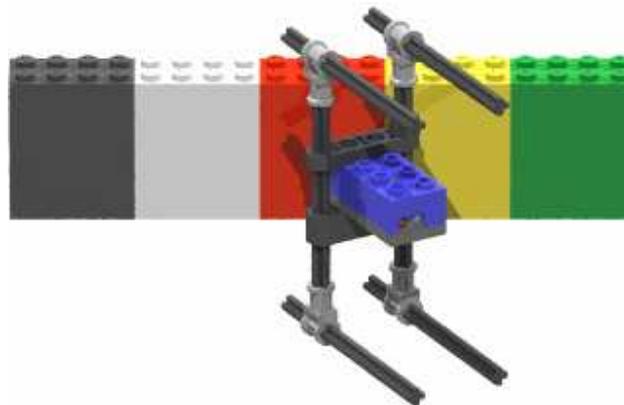


Illustration 4-23. Expérience sur l'influence de la lumière ambiante

La première chose que j'ai remarquée en voyant les données c'est que ce sont surtout les valeurs des cibles vertes et bleues qui sont affectées par la présence de la lumière ambiante. Les lampes à incandescences utilisées pour créer les éclairages émettent dans tout le spectre visible. Cela donne aux briques bleues et vertes de quoi réfléchir, si bien qu'elles apparaissent bien plus lumineuses au détecteur que dans l'expérience précédente.

Question: Lors du défi FLL 2001 "Volcano Panic," une bande adhésive bleue figurait les bords d'un océan. Les intersections de la bande bleue avec les nombreuses autres lignes noires de la table constituaient de très utiles repères de navigation. Plusieurs équipes ont eu du mal à trouver la ligne bleue. Quelle était vraisemblablement la source de leur difficulté et comment aurait-ils pu y remédier ?

Table 4-3. Valeurs de l'expérience sur l'éclairage ambiant

	Sans éclairage				Eclairage faible				Eclairage fort			
	1 tenon	2 ten.	3 ten.	4 ten.	1 tenon	2 ten.	3 ten.	4 ten.	1 tenon	2 ten.	3 ten.	4 ten.
Noir	39	27	27	26	39	36	35	35	39	46	52	52
Gris Foncé	40	34	30	28	40	38	38	38	43	47	53	53
Gris	43	38	34	33	45	45	43	43	49	53	57	57

Blanc	50	44	40	37	52	50	50	50	58	60	62	63
Vert	36	32	28	27	40	42	42	42	49	55	58	58
Bleu	39	36	33	29	45	44	45	45	51	58	60	60
Rouge	47	43	39	36	51	49	48	49	56	60	62	62
Jaune	49	44	39	37	52	50	49	50	58	61	63	62

D'autre part, il est très intéressant et important de noter comment l'éclairage ambiant modifie la relation entre distance et valeur de la mesure. L'illustration 4-24 est un graphique concernant les mesures sur la brique grise suivant les trois conditions de lumière. Sans éclairage, les mesures sont semblables à celles mesurées dans le boîtier fermé de l'expérience n°1. Le graphique est quasiment plat dans des conditions d'éclairage « faible ». La lumière rouge de la LED est submergée par la lumière de la lampe 100W utilisé dans les conditions de fort éclairage. Dans les conditions d'éclairage fort, les valeurs croissent avec l'éloignement du détecteur à la cible. Aux distances plus faibles, le corps du détecteur et son support créent de l'ombre diffuse qui diminue la quantité de lumière qui vient effectivement éclairer la cible.

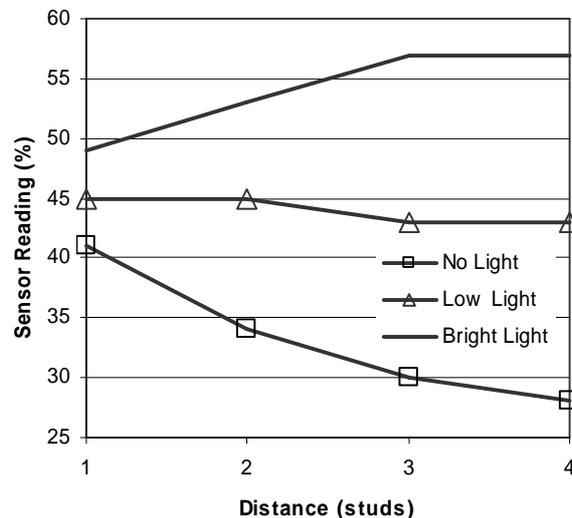


Illustration 4-24. Mesures sur une la brique LEGO grise

4.4.2.1 Conclusions

Nous concluons que le détecteur de lumière est très sensible à la lumière ambiante, ce qui est gênant car on a rarement le contrôle de ce facteur. Ce fait a paru flagrant lorsque j'ai fait une démonstration de mes robots lors d'une exposition en extérieur. Même si la démonstration avait lieu sous un parasol, j'ai passé beaucoup de temps à essayer de faire fonctionner correctement les robots avec détecteur de lumière. Et pourtant je pensais que j'avais bien protégé les détecteurs. J'aurais du tester mes robots dans les conditions de lumière prévues. Souvenez-vous de cela quand vous faites vos essais dans votre sous-sol. Il se pourrait que tout se passe très différemment lorsque vous vous trouvez sous les lumières d'une salle de tournoi.

4.5 Le détecteur de rotation

Le détecteur de rotation est utilisé pour connaître de combien a tourné un axe. Il a un manchon interne qui tourne librement et qui peut recevoir un axe. Lorsque le manchon tourne, un compteur dans le RCX s'incrémente ou se décrémente. Chaque rotation complète compte pour 16 unités, ce qui donne pour le détecteur de rotation une résolution de 22.5 degrés.

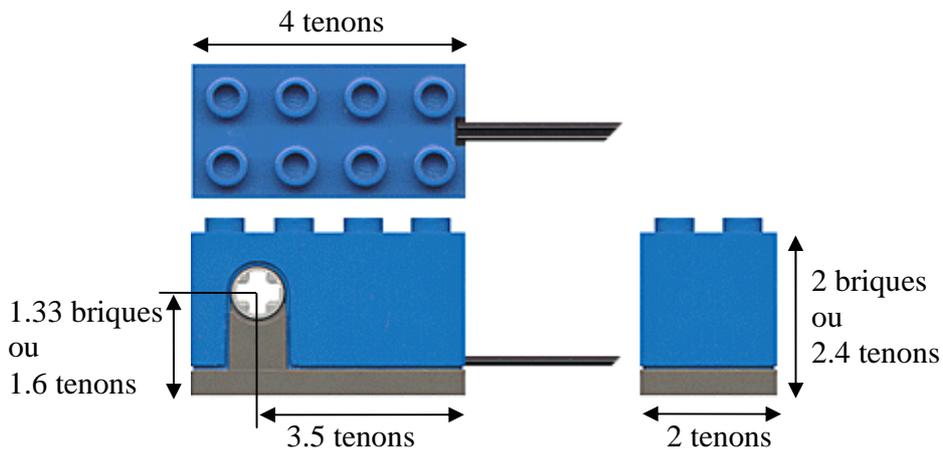


Illustration 4-25. Détecteur de rotation

Le détecteur de rotation peut mesurer 32767 unités dans chacune des directions. Si vous excédez cette valeur, le compteur bascule sur la valeur extrême opposée, passant de la valeur positive maximum à la valeur négative maximum (ou vice et versa). En pratique, cette limite est rarement problématique. Un robot avec le détecteur de rotation branché directement sur l'essieu d'une grande roue ballon de 81mm pourra parcourir plus de 500 mètres avant que le basculement ait lieu.

4.5.1 Résolution

La résolution du détecteur de rotation est habituellement bien adaptée à la mesure des distances. En utilisant la plus grande des roues LEGO (la roue ballon de 81.6 mm), 22,5° représentent un parcours de seulement 1,5 cm. Pour la petite roue ballon, le chiffre est de 6 mm. Mais cette précision peut s'avérer trop faible pour des rotations fines. Pour un robot à conduite différentielle de 10 **tenons** de large, un parcours de 6 mm correspond à 8 degrés d'angle.

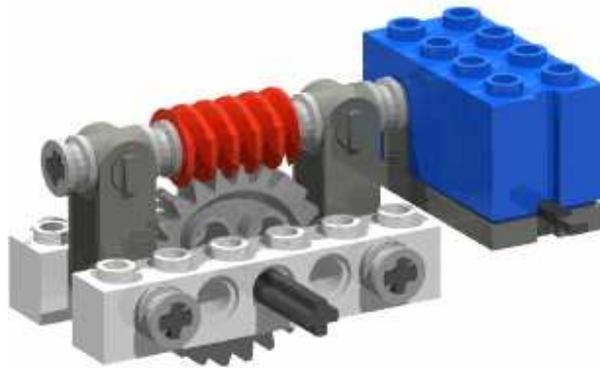


Illustration 4-26. Utilisation d'un réducteur pour augmenter la résolution

La résolution effective du détecteur peut être augmentée en utilisant un engrenage réducteur. Par exemple sur l'illustration 4-26, l'arbre d'entrée (celui avec la vis sans fin) tourne 24 fois pour chaque rotation de l'arbre de sortie (celui avec la roue droite). Le détecteur de rotation engendrera alors 384 unités pour chaque rotation de la roue 24t. C'est moins de 1 degré par unité. Malheureusement, cet assemblage a un jeu d'environ 2 degrés ce qui gaspille une partie de résolution.

4.5.2 Mécanique interne

Le détecteur de rotation est un intéressant petit objet. Si vous aviez la vision rayons X de Superman vous pourriez voir qu'il est constitué de deux petits opto-interrupteurs. Il s'agit d'une petite LED qui fait face à un photo-transistor. Le photo-transistor détecte la rotation par l'intermédiaire d'une obstruction de l'espace qui le sépare de la LED.



Illustration 4-27. L'intérieur du détecteur. A NE PAS REPRODUIRE!!!

Le manchon possède quatre petites ailettes qui s'interposent entre les opto-interrupteurs lorsqu'il tourne. L'état des opto-interrupteurs change à chaque fois qu'une ailette passe devant lui. Cela donne donc 8 transitions par rotation pour chaque interrupteur. En utilisant deux interrupteurs, on obtient le décompte de 16 unités par rotation ainsi que la détermination du sens de rotation.

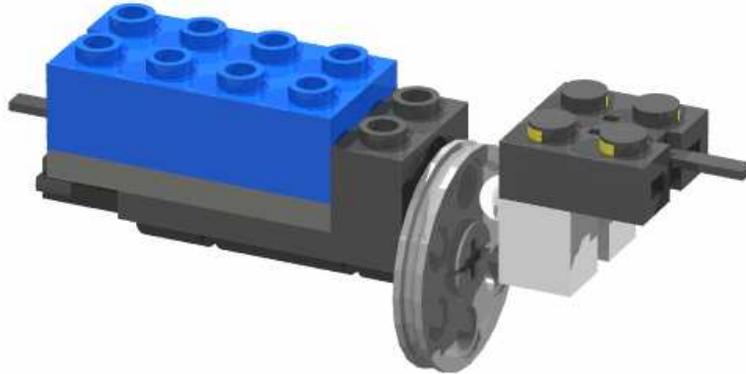


Illustration 4-28. Un détecteur de rotation à partir de pièces LEGO

Vous pouvez utiliser un détecteur de lumière, une lampe et une roue-poulie pour faire votre propre capteur de rotation. Le détecteur de lumière et la lampe font office d'opto-interrupteur. Lorsque l'axe tourne, la roue-poulie bloque ou libère alternativement la transmission de la lumière provenant de la lampe. Avec un seul détecteur, vous ne pouvez déterminer le sens de rotation mais celle-ci peut s'obtenir en regardant le branchement des commandes du moteur.

Question: Quelle est la résolution du détecteur de rotation fait à partir de pièces LEGO de l'illustration 4-28?

4.5.3 Erreur de décompte

Il y a eu des dizaines de messages sur LUGNET (LEGO Users Group Network) à propos d'un problème mystérieux concernant le détecteur de rotation. Il y a une croyance répandue que des erreurs de décompte se produisent si la vitesse de rotation est trop faible ou trop rapide. Les vitesses exactes sont mal définies, mais on parle de vitesses au minimum de 10 à 20 tr/min et au maximum de 1200 à 1400 tr/min. Les quantités importantes de données expérimentales disponibles sur le web semblent corroborer les faits que le détecteur de rotation est fiable dans la fourchette de vitesses comprises entre 60 et 1000 tr/min²⁵.

²⁵ NDT : Concernant les problèmes du capteur de rotation à faible vitesse, voir <http://philohome.com/sensors/legorot.htm>.



Illustration 4-29. Repère étalon pour remise à zéro du détecteur de rotation

L'emploi du détecteur de rotation peut poser quelques soucis, il ne faut donc pas imputer automatiquement un dysfonctionnement de votre robot à ces erreurs de décompte. Les problèmes de reproductibilité sont souvent causés par des erreurs de programmation (un oubli de remise à zéro, une mauvaise interprétation des valeurs de lecture du détecteur), des erreurs de conception (résolution du détecteur inadéquate ou jeu excessif), des problèmes de contrôle (accélération et virage trop rapide), ou à des modifications des conditions initiales (quelque chose n'a pas été remis en place correctement avant d'appuyer sur le bouton de démarrage). Mais si vous rencontrez encore des problèmes après avoir vérifié que tout fonctionnait correctement, vous pourriez avoir besoin d'un repère étalon pour caler le zéro.

Le repère étalon est un détecteur secondaire que l'on va utiliser pour vérifier ou caler la valeur par défaut du détecteur principal. Le chercheur de lumière de l'illustration 4-29 est épaulé par un détecteur de contact en guise de repère étalon. La came liée au détecteur de lumière pivotant presse le bouton poussoir quand le détecteur de lumière se présente de face. Le contact indique au RCX qu'il lui faut vérifier la valeur du détecteur de rotation et le remettre à zéro si toutefois elle était incorrecte (le compteur devrait être à zéro dans la position « de face »).

4.6 Le multiplexage de détecteurs

Le RCX a trois sorties moteurs et trois entrées pour les détecteurs, alors même que le « kit défi » inclut deux détecteurs de contact, deux capteurs de lumière et un détecteur de rotation. Que faire de ces détecteurs en surnombre? De nombreuses équipes FLL n'utilisent simplement pas ces détecteurs surnuméraires dans leur robot. Une équipe avait eu l'idée d'utiliser un détecteur de contact pour représenter un œil. L'œil était sympa mais pas d'une grande aide. La solution la plus utile est de multiplexer les détecteurs.

Multiplexer consiste à relier plusieurs détecteurs au même port d'entrée du RCX. Quand cela est fait correctement, le RCX est en mesure de lire la valeur en provenance de ce port et de déterminer duquel des détecteurs elle provient. Les détecteurs de contact sont les meilleurs candidats au multiplexage. Ils peuvent être multiplexés aussi bien avec un

détecteur de lumière qu'avec un autre détecteur de contact. En théorie, deux capteurs de lumière peuvent être multiplexés mais je ne saurais comment interpréter les valeurs mesurées. Les détecteurs de rotation ne peuvent pas être multiplexés à cause de la nature du signal qu'ils renvoient.

Table 4-4. Valeurs mesurées de deux détecteurs multiplexés.

	Contact ouvert	Contact fermé	Dét. de lumière
Contact ouvert	0	1	Int. Lumin.
Contact fermé	1	1	100
Dét. de lumière	Int. Lumin.	100	???

D'après la Table 4-4, nous voyons l'importance de prévoir le multiplexage dès les premières étapes de la construction du robot. Quand un détecteur de contact est fermé, aucune valeur sur un des autres détecteurs multiplexés ne peut être lue. Tous les pare-chocs ou contacteur de position ou de butée utilisant un détecteur de contact doivent être de conception « contact normalement ouvert » (à zéro).

5 La conduite d'un robot

La plupart des robots, en particulier ceux utilisés dans l'industrie, sont immobiles. Ils peuvent avoir des pinces pour prendre des choses et des bras pour déplacer ces choses d'un endroit à un autre, mais ils n'ont pas de jambe. A la place, ils dépendent d'autres machines spécialisées dans le convoyage pour leur apporter les pièces dont ils ont besoin ainsi que pour récupérer le fruit de leur labeur. Les robots de la FLL sont très différents en ce sens qu'ils ont besoin de se déplacer. Ils doivent se rendre à certains endroits et ils ont des scientifiques à sauver²⁶, tout cela sans interventions extérieures ou télécommande. On appelle ce type de robot des Véhicules Autonome Robotisés (ARV), et ils font partie des robots les plus complexes à construire et à programmer.

La partie d'un ARV qui lui permet de se déplacer est appelée la base mobile ou plate-forme mobile. Les bases mobiles les plus simples sont des plates-formes avec des roues qui ont pour but de déplacer le robot sur un sol plat de laboratoire. Quand les robots sortirent du laboratoire, des robots du style automobile ou tank devinrent populaires. De nos jours, les ARV roulent sur les autoroutes à 90km/h, plongent dans les plus profonds océans, explorent les cratères de volcans en activité, effectuent des vols de surveillance en territoire ennemi ou baguenaudent à la surface de la planète Mars.

Les bases mobiles des robots FLL ne sont pas encore exotiques à ce point. Leur environnement est plus proche de celui d'un sol de laboratoire que de celui du cratère d'un volcan en éruption. Les plates-formes sur roues sont les plus nombreuses, mais les chenillées sont populaires aussi. Certaines sont « toutes roues motorisées » pour leur permettre de grimper les côtes ou traverser des terrains irréguliers. Peu d'équipes ont tenté de construire des plates-formes de type automobile avec des roues avant directrices, et la plupart des robots utilisent une sorte de direction différentielle où les virages sont pris en faisant tourner les moteurs situés de chaque côté à des vitesses différentes.

Le succès de votre robot dépend principalement de la bonne adéquation de la plate-forme mobile à la stratégie globale que vous avez déterminée. Qu'est-ce qui est le plus important, la vitesse ou la précision? Se déplacer en ligne droite parfaite est-il réellement nécessaire? Souhaitez-vous pouvoir effectuer des manœuvres serrées? Les capacités de remorquage ou d'emport sont-elles cruciales? Y-a-t-il des obstacles, le terrain est-il irrégulier, présente-t-il des variations? On doit se poser de nombreuses questions avant de commencer à construire.

5.1 La conduite différentielle

Les bases mobiles à conduite différentielle furent très populaires pour équiper les premiers robots. Deux roues d'un même essieu sont motorisées et contrôlées séparément, fournissant motorisation et direction. Les changements de direction sont réalisés en modifiant la vitesse d'une roue par rapport à l'autre. Faire tourner la roue gauche plus vite fait tourner le robot à droite. Faire tourner la roue droite plus vite fait tourner le robot à gauche. Si les roues tournent en sens inverses, il est possible de tourner sur place, ce qui

²⁶ NDT : allusion à une des épreuves de la FLL 2000

est impossible pour une automobile. L'exemple de tous les jours sans doute le plus connu d'une plate-forme mobile à direction différentielle est la chaise roulante.

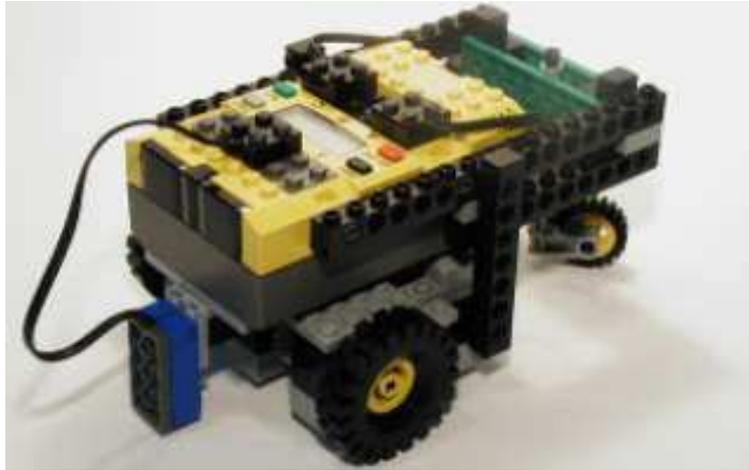


Illustration 5-1. Un robot à conduite différentielle

Les robots à conduite différentielle sont très appréciés dans la FLL. Je suis persuadé que c'est dû à leur présence dans la Constructopedia. De plus, c'est vraiment une bonne plate-forme pour les robots de compétitions. La conduite différentielle est facile à concevoir et à construire, ce qui en fait un choix remarquable pour les équipes composées d'enfants. Ils sont agiles et relativement compact, ce qui leur permet de manœuvrer dans des espaces réduits. Comme ils sont motorisés par deux moteurs, ils sont puissants et capables d'affronter des plans inclinés qui arrêteraient d'autres robots.

5.1.1 Roues-pivots

Parce qu'il est difficile de construire des véhicules stables sur deux roues uniquement, la plupart des robots à conduite différentielle possèdent une ou plusieurs roues non motorisées pour stabiliser l'ensemble. Ces roues, habituellement nommées roues-pivots, roues folles ou roues « jockey », ont pour fonction d'empêcher le robot de basculer tout en n'ayant aucun impact sur les capacités motrices ou directrices. Contrairement à l'axe des roues motrices qui sont fixes, les roues-pivots doivent être en mesure de se diriger dans tous les sens. Les roues-boules sont parfaitement adaptées à cela. L'utilisation de patins est aussi une bonne solution si le sol est lisse et glissant.

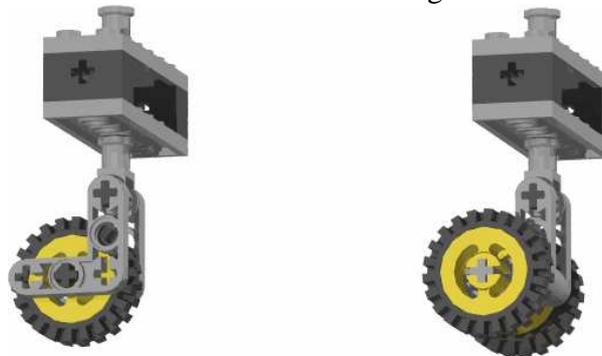


Illustration 5-2. Roues pivotantes

Mais LEGO ne produit pas de roues-boules et les patins sont rarement appropriés. Dès lors, les robots FLL à conduite différentielle utilisent des roues-pivot. Une roue-pivot se compose de une ou plusieurs roues reliées à un support pivotant. Le support est courbé afin de décaler l'axe de la roue par rapport à l'axe du pivot support. Ce décalage permet de produire un effet d'auto-alignement. Quand votre robot change de direction, la roue-pivot se replace automatiquement dans l'axe du déplacement.

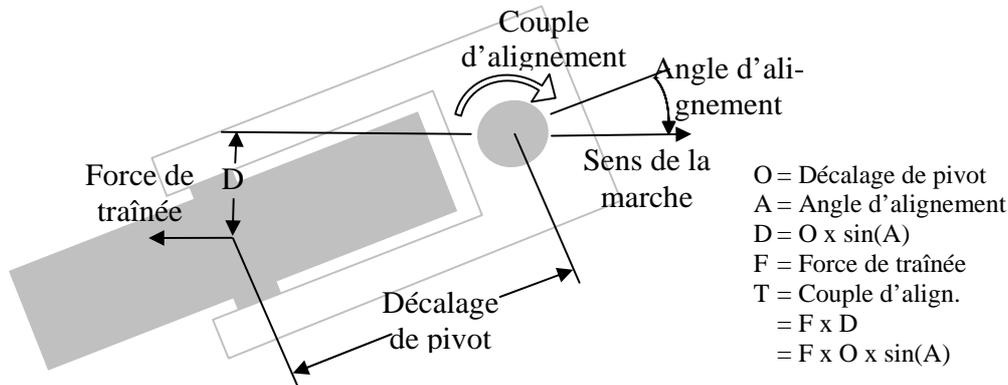


Illustration 5-3. Les roues-pivots s'auto-alignent

Lorsque le robot avance, le sol se dirige vers l'arrière sous la roue-pivot. Les frottements entre la roue et le sol engendrent une force qui tire la roue vers l'arrière. Si la roue-pivot est correctement placée, ceci entraîne la rotation de la roue autour de son axe. Si la roue-pivot n'est pas orientée dans le bon sens, cela engendre un couple d'alignement qui tend à faire pivoter la roue. La grandeur du couple d'alignement est proportionnelle au décalage de la roue-pivot. Les roues-pivots avec un décalage important possèdent un couple d'alignement plus élevé pour le même angle. Elles sont plus stables et suivent mieux le parcours que les roues-pivots avec un petit décalage.

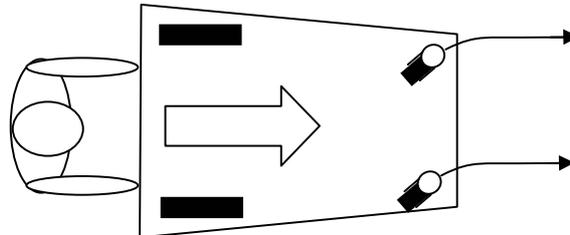


Illustration 5-4. Les roues-pivots engendrent une force de déviation de lorsqu'elles s'alignent

Toutefois, en augmentant le décalage de pivot, vous augmentez aussi la dérive, ce qui peut ne pas être souhaitable pour votre robot. La dérive est un phénomène qui vous est sans doute familier car vous l'avez expérimenté avec les chariots de supermarché. La dérive c'est la tendance lorsque vous effectuez un virage qu'ont les roues-pivots situées à l'avant du chariot de le dévier avant qu'elles ne s'alignent. C'est particulièrement flagrant si le chariot est lourdement chargé ou juste après un virage très serré ou un demi-tour. Si cela est peu ennuyeux avec un chariot de courses c'est plus gênant pour un robot. Une dérive excessive gêne le contrôle de votre robot et fausse les mesures de distance et d'orientation.

Quand la roue-pivot n'est pas alignée dans le sens de la marche, elle engendre une force de dérive, tout comme les roues directrices d'une automobile engendrent une force qui dévie la voiture lorsqu'on tourne. Si les frottements entre la roue et le sol sont trop importants pour qu'il y ait glissement, la force se répercute sur le chariot et celui-ci s'écarte de sa trajectoire. Au fur et à mesure que l'ensemble s'aligne, la dérive s'amenuise jusqu'à disparaître.

Question: En vous basant sur votre expérience de la conduite des chariots de supermarché, comment pouvez-vous réduire la déviation induite des roues-pivots?

5.1.2 Configuration de roues

Les premiers robots à conduite différentielle possédaient souvent une configuration de roues en diamant comme le montre l'illustration 5-5. Ces robots employaient des encodeurs (détecteurs de rotation) sur les deux roues motrices pour mesurer les distances parcourues ainsi que pour vérifier le sens de la marche. Mais cela impliquait un contact parfait des roues motrices avec le sol. Grâce aux roues-pivots à l'avant et à l'arrière, le centre de gravité était idéalement placé sur les roues motrices qui soutenaient alors presque intégralement le poids du robot. Cela maximisait la motricité et minimisait les forces d'auto-alignement des roues-pivots.

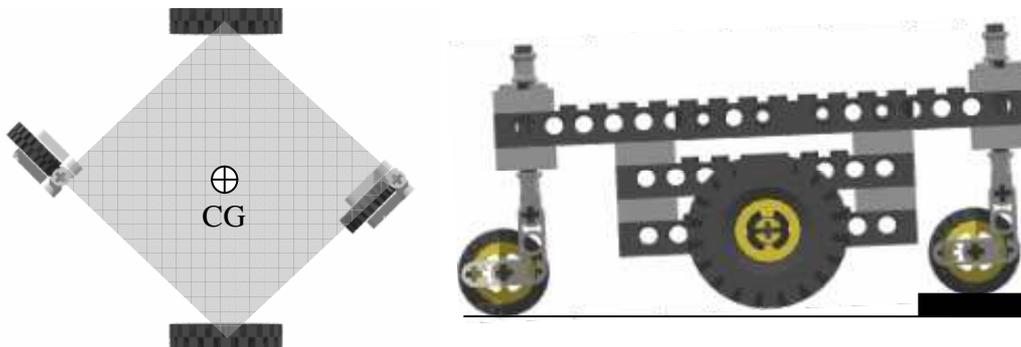


Illustration 5-5. Configuration en diamant des roues

La configuration en diamant marchait très bien au labo, se faulant sur les sols lisses et plats, mais beaucoup moins bien en dehors. Pour obtenir la stabilité à l'arrêt (le robot ne doit pas se renverser quand il ne bouge pas), un véhicule doit avoir au moins trois roues au sol, ne se situant pas sur un axe commun. Si le véhicule a plus de trois roues, il n'est pas garanti que ces roues touchent le sol à chaque instant. Un problème se pose donc avec la configuration en diamant. Lorsqu'une des roues-pivots monte sur un obstacle, une des roues motrices reste alors perchée dans les airs. Quand cela se produit, le robot tourne de manière incontrôlée. Après un moment la roue-pivot descend de son obstacle mais vous avez alors perdu des renseignements sur la position du robot et sur la distance qu'il a parcourue.

Une configuration des roues en triangle règle ce problème, mais il perd les avantages de la configuration diamant. Avec seulement trois roues, vous êtes sûr qu'elles resteront au

sol. Malheureusement, avec trois roues, vous ne pouvez plus placer le centre de gravité au-dessus des roues motrices de manière idéale. Et une partie du poids est soutenu par la roue-pivot. Pour compenser, les concepteurs de robots déplacent le CG le plus loin possible de la roue-pivot vers l'axe des roues motrices. On peut aussi éloigner la roue-pivot des roues motrices.

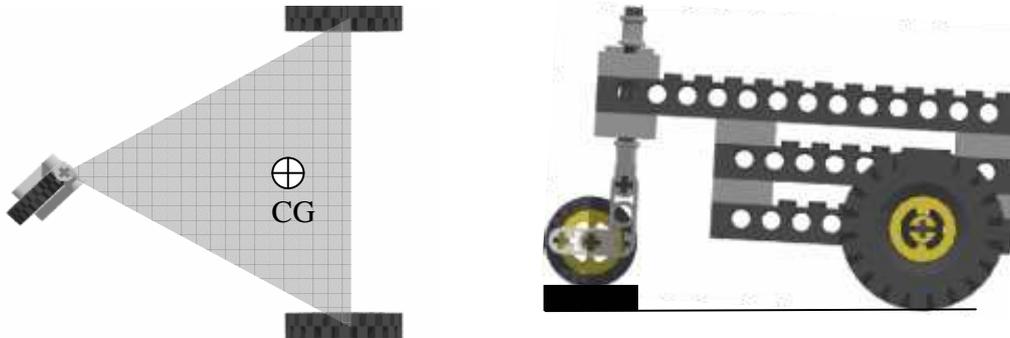


Illustration 5-6. Configuration triangle des roues

La roue-pivot peut être placée aussi bien devant que derrière les roues motrices. Un robot à conduite différentielle tourne autour d'un point situé au centre de l'axe des roues motrices. Placer la roue-pivot à l'avant rend le robot instable dans les virages. Si la roue-pivot est à l'arrière, il sera plus stable.

5.1.3 Les directions

Un robot à conduite différentielle tourne en modifiant les vitesses de rotations des roues motrices. Si la roue de gauche tourne plus vite, le robot tourne à droite, si elle tourne plus vite à droite, le robot tourne à gauche. Dans son article pour le Club de Robotique de Seattle, G. W. Lucas²⁷ montre que les roues d'un robot à conduite différentielle suivent des parcours circulaires et concentriques lors des virages. Ceci est décrit par le croquis ci-dessous.

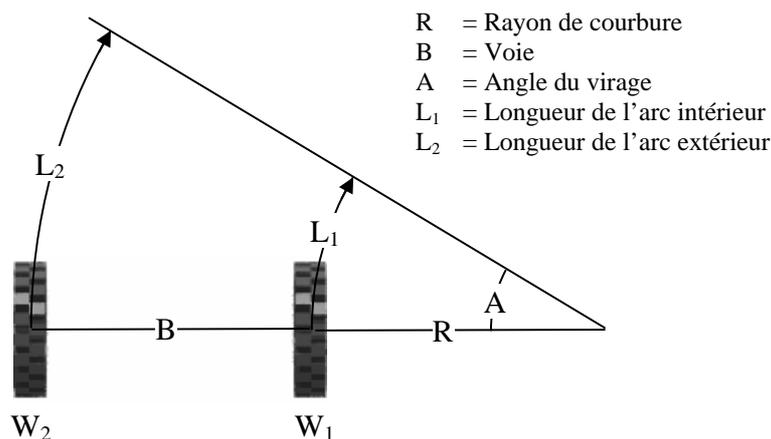


Illustration 5-7.

Le rayon de courbure est déterminé par la voie et les vitesses relatives de rotation des roues

²⁷ "Using a PID-based Technique For Competitive Odometry and Dead-Reckoning" par G. W. Lucas www.seattlerobotics.org/encoder/200108/using_a_pid.html

Si l'angle de virage (A) est mesuré en radians alors les longueurs d'arcs L_1 et L_2 peuvent être calculées selon :

$$\begin{aligned} L_1 &= A \times R \\ L_2 &= A \times (R + B) \end{aligned}$$

Avec un peu d'algèbre on peut définir le rayon de courbure (R) comme une fonction de la voie (B) et des longueurs d'arcs (L_1 et L_2).

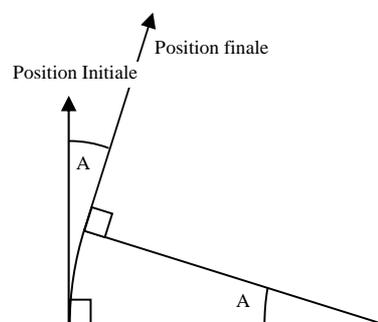
$$\begin{aligned} A &= L_2 / (R + B) = L_1 / R \\ R \times L_2 &= (R + B) \times L_1 \\ R \times (L_2 - L_1) &= B \times L_1 \\ R &= B \times L_1 / (L_2 - L_1) \end{aligned}$$

Si nous avons un robot à conduite différentielle avec une voie de 10 cm, quel est le rayon de courbure si la roue intérieure parcourt 45 cm par minute et si la roue extérieure à 60 cm/min? De combien est le déplacement du robot s'il maintient cette vitesse pendant 10 secondes?

Il y a plusieurs façons de résoudre ce problème, mais peut être le plus facile est-il de calculer la distance que parcourt chacune des roues durant ces 10 secondes et d'utiliser alors ces valeurs pour calculer le rayon de courbure.

$$\begin{aligned} L_1 &= V_1 \times \text{temps} \\ &= 45 \text{ cm/min} \times 10 \text{ secondes} \\ &= 45 \text{ cm/min} \times 10/60 \text{ minutes} \\ &= 7,5 \text{ cm} \\ L_2 &= 60 \text{ cm/min} \times 10/60 \text{ minutes} \\ &= 10 \text{ cm} \\ R &= B \times L_1 / (L_2 - L_1) \\ &= 10 \text{ cm} \times 7,5 \text{ cm} / 10 \text{ cm} \\ &= 7,5 \text{ cm} \end{aligned}$$

Maintenant que nous connaissons le rayon de courbure, il est facile de calculer l'angle de virage. L'angle de virage est égal à l'angle de parcours du robot.



Angle de parcours = Angle de virage

$$\begin{aligned}
&= L_1 / R \\
&= 7,5 \text{ cm} / (7,5 \text{ cm} / \text{radian}) \\
&= 1 \text{ radian} \\
&= 57.3 \text{ degrés}
\end{aligned}$$

Connaissant les distances parcourues par chaque roue, nous pouvons calculer la nouvelle position du robot. Des équations semblables peuvent être employées pour savoir de combien le robot a bougé dans les directions nord/sud et est/ouest. Si nous écrivions un programme qui calcule en continu l'orientation et la position du robot à partir de la vitesse de rotation des roues, nous ferions de l'odométrie. L'odométrie est une technique de navigation où les détecteurs de position des roues sont employés pour déterminer la position et l'orientation du robot. Presque tous les robots mobiles au sol utilisent l'odométrie comme système de navigation.

5.1.4 Une conduite plus facile

Les équations odométriques qui viennent d'être discutées nécessitent la connaissance de la position de chaque roue motrice. Cela rend difficile l'usage de l'odométrie pour votre robot FLL. Le détecteur de rotation est le meilleur dispositif pour connaître la position d'une roue or le kit défi n'en propose d'un seul. Une solution est d'utiliser un détecteur de rotation constitué d'un capteur de lumière ou de contact. Des équipes l'ont fait et cela marche assez bien (et ils ont gagné des points de créativité et de conception). Une autre solution est de repenser l'équation odométrique et de la faire fonctionner avec un seul détecteur de position.

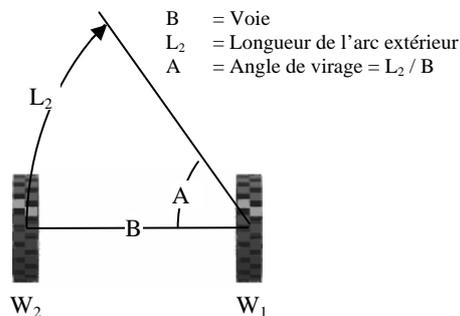


Illustration 5-8. Pivoter autour d'une roue

L'illustration 5-8 montre le mouvement pour un rayon de courbure nul. La roue intérieure est bloquée sur sa position et la roue extérieure tourne autour d'elle. Comme la roue intérieure ne tourne pas elle n'a pas besoin de détecteur de rotation. L'angle de virage est calculé en utilisant simplement les valeurs de la voie et de la vitesse de la roue.

5.1.5 La marche en ligne droite

Un problème que l'on rencontre couramment avec les robots à conduite différentielle, c'est qu'on a du mal à les faire marcher droit. Les robots à conduite différentielle sont extrêmement sensibles à la vitesse relative des deux roues motrices. Même une petite différence de vitesse conduit le robot à se déplacer suivant un arc de cercle. Cette tendance à dévier peut être réduite en suivant des bonnes pratiques de construction, en répartissant correctement les masses et en choisissant bien les moteurs. Mais une marche

parfaitement droite nécessite un mécanisme qu'on pourrait qualifier de correcteur, qu'il soit mécanique ou logiciel.

D'abord, il faut savoir si aller parfaitement droit est important ou pas. Si votre stratégie de compétition est de faire des virages parfaits et de suivre des lignes tracées au cordeau, alors votre équipe risque d'être déçue. Les équipes qui gagnent savent se contenter de robots qui vont « à peu près droit » et se reposent sur d'autres stratégies pour compenser les erreurs de navigation. Ces robots auto-correcteurs sont plus à même de gérer les inévitables erreurs de positionnement au départ ainsi que les chocs et les patinages imprévus qui se produisent durant les compétitions.

5.1.5.1.1 Solution logicielle

La plupart des robots à conduite différentielle utilisent des encodeurs (détecteurs de rotation) pour mesurer la position de chaque roue. Pour aller en ligne droite, le logiciel du robot contrôle en permanence les valeurs des encodeurs et ajuste la vitesse des moteurs gauche et droit pour conserver des valeurs égales. Cette méthode est difficile à mettre en place avec le seul détecteur de rotation disponible dans le kit défi de la FLL.

5.1.5.1.2 Solutions mécaniques

Dans le domaine de l'automobile, on souhaite souvent limiter les différences de rotations entre les roues gauches et droites. Un exemple classique est celui des voitures qui s'embourbent dans la neige. J'ai souvent vu des voitures coincées dans la neige, avec une roue qui patine sur la glace et l'autre roue qui reste immobile sur le sol sec. Le différentiel fourni le même couple moteur à chacune des roues, mais comme l'une d'elle peut tourner librement sur la glace, le couple maximum fourni à l'autre roue est très faible.

Beaucoup de voitures sous les climats nordiques sont équipées d'un mécanisme permettant de limiter le glissement du différentiel pour résoudre ce problème. Avec un réducteur de glissement, le différentiel fournit le couple à la roue qui tourne le moins vite. Ceci est souvent réalisé à l'aide d'une sorte d'embrayage qui convertit le glissement en couple.



Illustration 5-9. Limiteur de glissement simple en LEGO

La plate-forme de conduite différentielle de l'illustration 5-9 utilise un morceau de tuyau plastique annelé en guise d'embrayage pour limiter le glissement entre les deux roues motrices. Quand une des roues tourne plus vite que l'autre, les axes tournent dans le tuyau. Les frottements entre les axes et le tuyau transmettent du couple de la roue la plus rapide vers la moins rapide. Plus les axes sont enfoncés dans le tuyau et plus le couple transmis est important. Le robot n'ira pas parfaitement droit, mais la déviation sera grandement réduite.

Question: Quelles autres pièces LEGO pourraient être utilisées en guise d'embrayage pour limiter le glissement entre les roues motrices?

Parfois un limiteur de glissement ne suffit pas. Pour éliminer le glissement entre les deux roues motrices, certains véhicules 4x4 sont équipés d'un blocage de différentiel. Un blocage de différentiel possède un interrupteur qui lui permet de fonctionner comme un différentiel normal, ou de le contraindre de fonctionner comme un arbre simple.

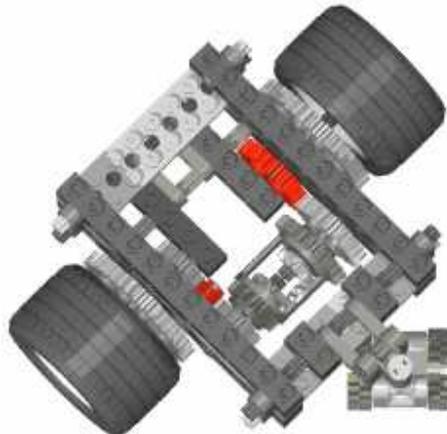


Illustration 5-10. Un blocage de différentiel

Le chapitre sur les engrenages nous a appris qu'un différentiel peut être utilisé pour déterminer la différence de vitesse entre deux roues en inversant le sens de rotation d'un des arbres d'entrées. C'est la base d'un blocage de différentiel LEGO. En empêchant le différentiel de tourner comme sur l'illustration 5-10 l'essieu moteur réagit comme si les deux roues étaient fixées à un seul et même axe. En débloquant le différentiel, les roues peuvent de nouveau tourner indépendamment.

Question: Certains véhicules disposent d'un bouton ou d'une manette dans la cabine de conduite pour bloquer ou débloquer le différentiel. Pouvez-vous imaginer un montage qui permettrait au RCX de bloquer ou débloquer lui-même le différentiel LEGO?

5.1.6 Conduite à patinage différentiel

La conduite à patinage différentiel, que l'on appelle « skid-steer », est une variante de la conduite différentielle. Elle est employée par les véhicules à chenilles (comme les tanks), mais parfois aussi par des plates-formes à 4 ou 6 roues (comme le Bobcat). Dans ce cas

on n'utilise pas de roue-pivot et toutes les roues sont motrices. Les roues gauches sont reliées à un moteur, celles de droites à un autre.

Cette configuration de conduite change de direction par patinage des roues. Une conséquence directe est que l'on ne peut pas effectuer de navigation par odométrie simple. Pour cette raison, la conduite par patinage différentiel est réservée aux opérations robotiques télécommandées. Des roues non motrices destinées aux mesures peuvent être ajoutées pour une navigation odométrique lors des opérations autonomes.

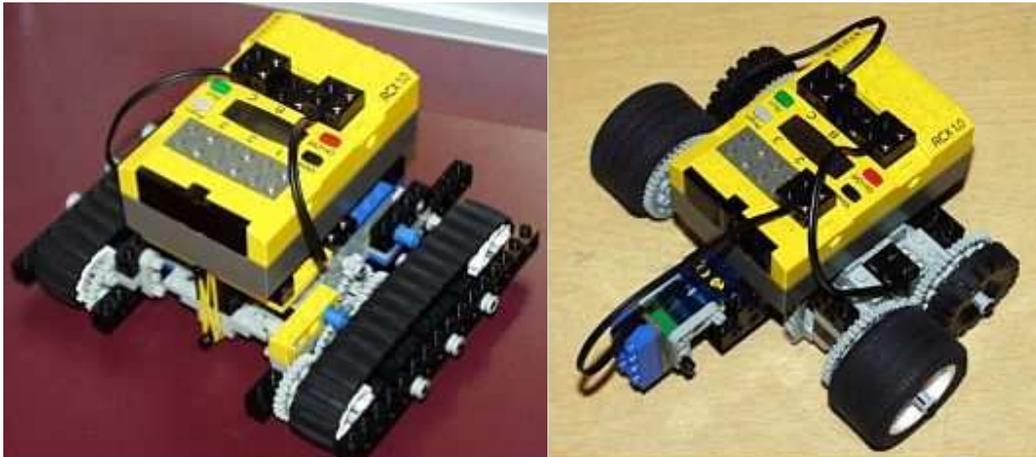


Illustration 5-11. Deux robots à conduite par patinage différentiel

Beaucoup de robots à conduite par patinage différentiel ont participé à la FLL ces dernières années et plusieurs ont plutôt bien fonctionné. Les équipes qui ont gagné avaient développé des stratégies pour maximiser les forces de leur robot et minimiser leurs faiblesses. Ces robots à conduite par patinage différentiel sont de bons grimpeurs et se comportent mieux que bien d'autres sur terrain accidenté. Ils sont aussi manœuvrables que les robots à conduite différentielle simple mais sont moins sujets à des déviations indésirables. Et l'impossibilité de navigation par odométrie n'est pas un souci si vous pouvez suivre une ligne au sol ou choisir une stratégie de navigation par des repérages du terrain.

5.2 La direction frontale

La direction frontale est le type de direction commune aux automobiles. Dans ce type de direction pour robot, il faut un moteur pour la propulsion et un pour la direction. Le fait de découpler la direction et la propulsion rend le contrôle plus facile que dans le cas d'une conduite différentielle où la vitesse de chaque roue doit être mesurée et contrôlée minutieusement. La direction frontale fournit une odométrie précise, tout en offrant la traction et la garde au sol nécessaires à la conduite tous terrains. Elle est donc communément choisie pour les véhicules autonomes d'extérieur.

De manière générale, la conception d'un robot à direction frontale est plus difficile que celle d'un robot à conduite différentielle. Tout d'abord il lui faut un différentiel pour transmettre la puissance du moteur aux roues. Il faut ensuite un train d'engrenage en guise de réducteur pour amplifier le couple de ce moteur unique. Enfin, le mécanisme de

direction est de conception complexe si l'on s'en tient aux pièces disponibles dans le kit RIS. Par chance, il y a de nombreux exemples de direction frontale sur le web. Une recherche rapide sur LUGNET mène à plus de 100 différents véhicules à direction frontale.

L'illustration 5-12 montre deux robots à direction frontale. Celui de gauche utilise des couronnes dentées et des roues dentées droites pour faire pivoter les roues avant. Celui de droite utilise un système à crémaillère avec un pignon tout comme la plupart des voitures qui roulent sur nos routes aujourd'hui. Il utilise une crémaillère spéciale qu'on trouve dans les boîtes Technic, mais un mécanisme semblable peut être réalisé avec les crémaillères 1x4 disponibles dans le kit RIS.

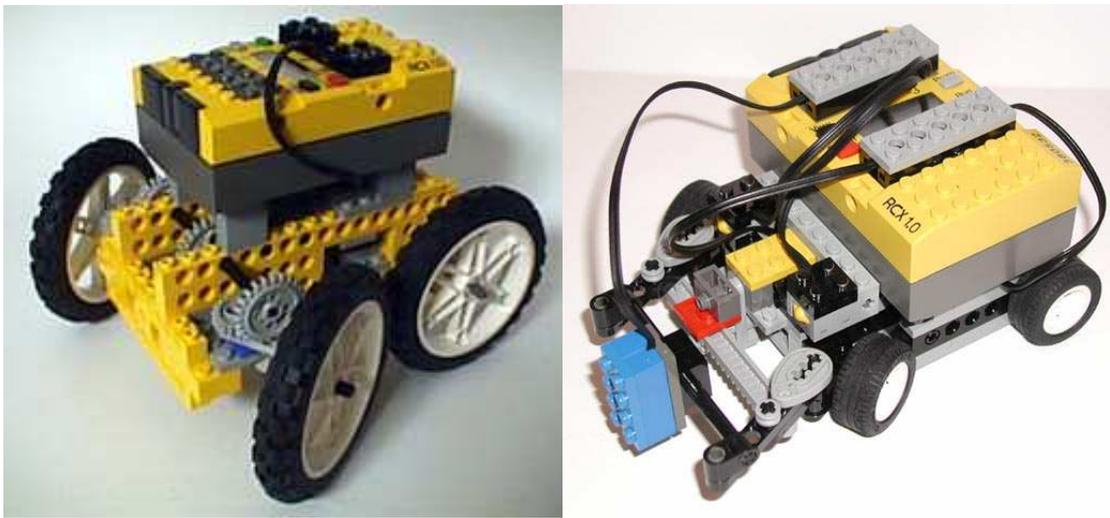


Illustration 5-12. Deux robots à direction frontale

5.2.1 Virages

Un robot à direction frontale possède un rayon, de braquage bien défini. Contrairement au robot à conduite différentiel, il doit se déplacer (avancer, reculer) pour tourner. De tels systèmes sont dits non-holonomiques. Dans un robot non-holonomique, un ou plusieurs des degrés de liberté (avancement, position) ne peut pas être contrôlé indépendamment. Cela rend la prévision des mouvements difficiles car chaque avancée s'accompagne d'une modification de la position latérale. Les véhicules non-holonomiques sont difficiles à manœuvrer dans des espaces réduits. Vous savez combien il est difficile de faire un créneau en voiture.

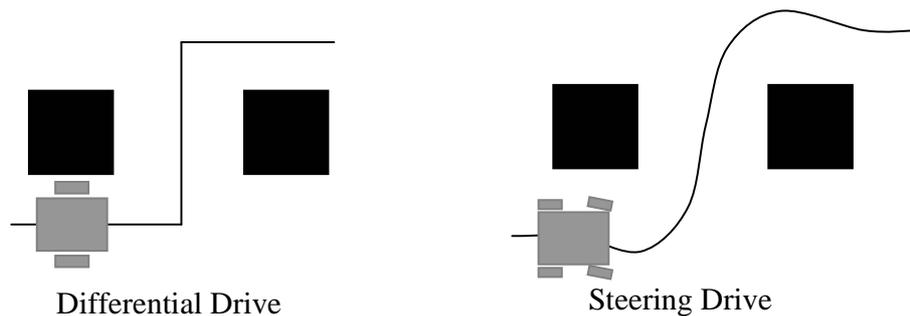


Figure 5-13. La prévision des déplacements est plus difficile pour les robots non-holonomiques

Les seules informations que j'ai pu trouver sur le web concernant l'odométrie appliquée aux véhicules à direction frontale concernent l'épure de Jeantaud²⁸. Utilisé dans la majorité des véhicules que vous voyez sur la route, l'épure de Jeantaud est une modification de la géométrie du train directeur qui limite le glissement dans les virages. Lors d'un virage, les quatre roues parcourent des arcs de cercle concentriques. Comme on le voit sur l'illustration 5-14, les roues avant d'un véhicule qui respecte l'épure de Jeantaud voient leur centre de braquage situé au centre commun de ces arcs. Cela demande à ce que la route extérieure braque selon un angle moindre que la roue intérieure.

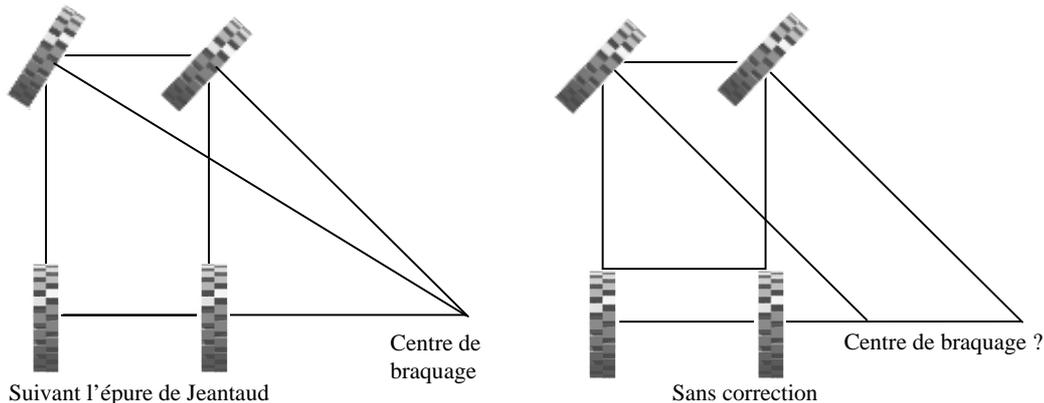


Illustration 5-14. L'épure de Jeantaud réduit le glissement

²⁸ Plus connu sous le nom de « correction d'Ackermann » chez les anglosaxons.

Sans l'épure de Jeantaud, les roues avant braqueraient d'un même angle. Cela les amènerait à se déplacer suivant des arcs de cercle dont le centre est différent. Dans les virages, cela forcerait une des roues à glisser latéralement, engendrant de fortes contraintes sur les éléments de direction et causant des dégâts aux pneumatiques. Le plus important pour des applications robotiques, c'est que vous ne pourriez pas faire de calcul d'odométrie faute de pouvoir déterminer avec précision le centre de braquage.

Bien que cela soit possible, il est difficile de construire un véhicule équipé de l'épure de Jeantaud en LEGO. Vous trouverez bien des pages Internet décrivant les composants et la géométrie sur le sujet ainsi que des livres. Malheureusement, les solutions adaptées demandent des pièces de tailles spécifiques qui ne correspondent pas à celles disponibles en LEGO.

Une solution plus simple consiste à utiliser une roue unique pour la direction. Les engins à trois roues dont une directrice sont confinés à des marchés restreints comme les voiturettes de golfs ou des engins de mesures de distances. Leur inconvénient majeur est leur tendance à basculer dans les virages à cause de la vitesse, ce qui n'est pas un souci dans les applications citées. Le design et l'odométrie plus simples d'une plate-forme à trois roues en font un bon choix pour un robot LEGO.

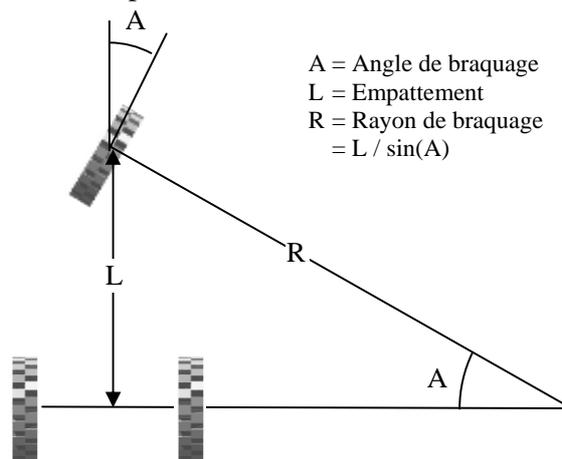


Illustration 5-15. Le rayon de braquage est déterminé par l'empattement et l'angle de braquage

Comme on le voit sur l'illustration 5-15, le rayon de braquage est déterminé par l'empattement et l'angle de braquage. C'est pourquoi les camions ont un grand rayon de braquage alors que les petites voitures ont un faible rayon de braquage.

Disons que l'empattement de votre robot soit de 15 cm et que l'angle maximum de braquage est de 30 degrés. Quel est le rayon de braquage minimum et quelle distance la roue avant aura-t-elle parcouru après un virage de 45 degrés ?

$$\begin{aligned}
 \text{Rayon de braquage} &= L / \sin(A) \\
 &= 15 \text{ cm} / \sin(30 \text{ degrés}) \\
 &= 30 \text{ cm}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\text{Distance parcourue} &= \text{Rayon} \times \text{Angle (en radians)} \\
&= 30 \text{ cm} \times 45 \text{ degrés} \times (\text{Pi radians} / 180 \text{ degrés}) \\
&= 30 \text{ cm} \times \text{Pi} / 4 \\
&= 23,5 \text{ cm}
\end{aligned}$$

5.2.2 Les tricycles

Un tricycle est une plate-forme avec une seule roue directrice et deux roues passives arrière (ou vice versa). Bien que cela puisse sembler similaire à la plate-forme mobile à trois roues qui précède, la direction d'un tricycle a des caractéristiques uniques qui la rendent incontournable pour les applications robotiques. La plus importante d'entre elles c'est sa capacité à tourner sur place.



Illustration 5-16. Un tricycle (à gauche) et une plate-forme à trois roues à direction frontale (à droite) se ressemblent

Comme nous l'avons vu dans les paragraphes précédents, le rayon de braquage minimum d'une direction frontale est déterminé par l'angle de braquage maximum et l'empattement, suivant la relation $R = L / \sin(A)$. Si l'angle de braquage maximum est de 90 degrés, alors le rayon de braquage est égal à l'empattement. Le robot pivote sur lui-même autour d'un point qui se trouve entre les deux roues arrière.

Malheureusement, un véhicule à direction frontale ne tournera pas si sa roue avant pivote à 90 degrés. Si le véhicule bouge quand même c'est parce que la (ou les) roue avant glisse au lieu de rouler. Cela parce que la force de propulsion des roues arrière est perpendiculaire au sens de parcours de la roue frontale. Toutes les forces concourent à pousser la roue par le côté et non pas à la pousser vers l'avant. Des glissements latéraux de la roue surviennent même pour des angles notablement inférieurs à 90 degrés. Le meilleur angle que vous puissiez espérer est celui qui correspond à un centre de braquage se situant à l'extérieur des roues motrices.

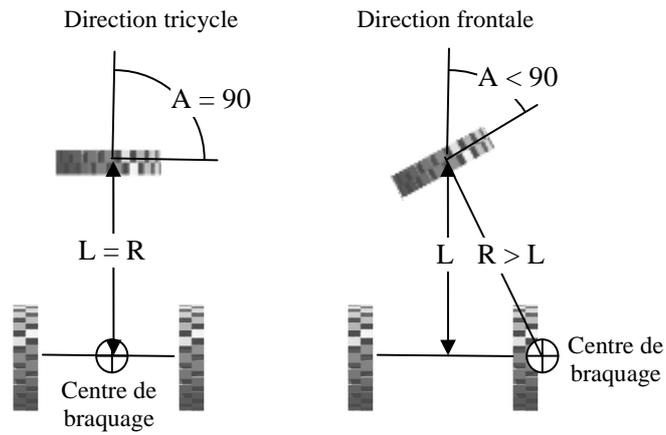


Illustration 5-17. Tous les angles de braquage sont possibles avec une direction tricycle

Pour sa part, un robot à direction tricycle voit la motorisation fixée à la roue directrice, permettant à celle-ci d'œuvrer pour tout angle de braquage. Cela offre une manœuvrabilité qui rivalise avec celle des robots à conduite différentielle ou à conduite par patinage différentiel.