

Filière Systèmes industriels

Orientation Power and Control

Diplôme 2007

Line Barras

*Démonstrateurs
électromécaniques*

Professeur

Pierre Poffet

Expert

Daho Taghezout

1. Résumé du projet

- **Objectif et résultats**

Le but de ce travail de diplôme consistait à réaliser un prototype de démonstration de type électromécanique.

Mon choix s'est porté sur les courants de Foucault, plus précisément les freins à courants de Foucault. Ce phénomène est visible sur les poids lourds, les bus ou encore certains trains.

Le résultat de ces trois mois de travail est deux prototypes roulants: un est surmonté d'un système de freinage à courants de Foucault, l'autre n'est pas freiné.

Les roues de freinage sont interchangeables et le circuit magnétique facilement amovible. Ces deux bolides sont lancés ensemble sur une pente pour évaluer l'efficacité du freinage.

- **Ziel und Ergebnisse**

Das Ziel meiner Diplomarbeit war ein Demonstrationprototyp um etwas in Electromechanik zu zeigen.

Ich habe Wirbelströme als Thema gewählt, und zwar die Wirbelstrombremse. Anwendungen von diesen Bremsen kann man auf Bussen und Lastwagen sehen.

Während diesen drei Arbeitsmonaten sind zwei Rollprototype geboren: einer ist mit Wirbelstrombremse ausgerüstet und der andere hat keine Bremse.

Die Räder, die gebremst sind, sind austauschbar und der Magnetischkreislauf kann einfach gewechselt werden.

Diese zwei Fahrzeuge werden zusammen in einer Steigung losgelassen um die Effizienz von den Bremsen zu testen.

1. Résumé du projet.....	1
• Objectif et résultats	1
• Ziel und Ergebnisse	1
• Cahier des charges	4
• Personnes concernées et contactées	5
2. Remerciements.....	6
3. Notions théorique	7
• Origine des courants de Foucault	7
• Lenz	7
• Laplace	8
• Lorentz	9
• Matériaux ferromagnétiques.....	10
• Matériaux amagnétiques	10
4. Application et utilisations des courants de Foucault.....	11
• Freinage rotatif.....	11
• Freinage linéaire.....	16
• Effets non désirés.....	18
• Récupération de la chaleur dégagée	19
5. Développement d'un prototype de démonstration	20
• Système roulant, deux prototypes.....	20
6. Solution étudiée	21
• Motivation des choix et réalisation	21
• Mesures de l'induction sur le prototype.....	29
• Montage des aimants.....	30
• Plaque de test	31
7. Changements effectués.....	33
• Induction variable	33

8. Analyses des résultats	35
• Forces de frottements	35
• Différences de géométrie et de matériaux	38
• Forces et couples de freinage	42
• Tensions et courants induits	50
• Puissance dissipée	52
• Rapport entre les vitesses par rapport aux montages	59
• Oscillations des courbes de vitesses	61
• Evolution de la vitesse et de la force de freinage suivant l'augmentation de la pente	64
9. Conclusions	67
10. Bibliographie	68
• Notions théoriques	68
• Application et utilisations des courants de Foucault	68
• Annexe 3 : Applications courants de Foucault	68
• Analyses des résultats	68
• Annexe 2 : Dimensionnement de la bobine	68

- ***Cahier des charges***

Le cahier des charges est établi dès le début du projet étant donné que le sujet et le but sont connus.

- **But**

Concevoir un prototype pour effectuer une démonstration lors de la présentation orale et des portes ouvertes du 30 novembre 2007

Avoir effectué les tests et les mesures suffisants pour évaluer le comportement d'un prototype freiné par les courants de Foucault.

- **Points à étudier**

- Réaliser un prototype roulant
- Les roues à freiner doivent être interchangeables (sans outils)
- Le circuit magnétique peut être facilement amovible (sans outils)
- Différentes géométries et différents matériaux peuvent être testés
- Trouver une carrosserie ou la réaliser si le temps le permet

Barras Line

Sion, le 3 septembre 2007

- ***Personnes concernées et contactées***

Chef de projet et premier expert (interne) :

M. Poffet Pierre



027/606.87.00

Coatch:

M. Costa Christian



027/606.87.21

Conception électronique:

Atelier électronique



027/606.87.30

Conception mécanique:

Atelier mécanique:



027/606.88.04

Deuxième expert (externe) :

Dr. Daho Taghezout



221/803.58.68

Réalisatrice du projet:

Barras Line
Etudiante 3^{ième} en Systèmes Industriels

2. Remerciements

Je remercie toutes les personnes qui m'ont entourées et soutenues tout au long de ce travail de diplôme.

Un tout grand merci aux personnes suivantes:

MM. Pierre Poffet et Christian Costa pour leur aide et leurs conseils durant le projet.

Toute l'équipe de l'atelier mécanique pour toute la réalisation des pièces mécaniques et plus particulièrement M. Eric Mabillard.

MM. Steve Gallay et Olivier Walpen de l'atelier électronique.

A tout mon entourage, ma famille, mon ami et surtout à mon père qui n'a cessé de me soutenir et de m'encourager dans mes études.

Et à toutes les personnes que j'ai oubliées de nommées ici mais qui m'ont, à un moment ou un autre, conseillées ou épaulées tout au long de ce travail.

MERCI

3. Notions théoriques

- **Origine des courants de Foucault**

Lorsqu'un conducteur ou un matériaux métallique se déplace dans un champ magnétique constant, une tension y est induite.

Cette tension est source de courants appelés « Courants de Foucault » dans le matériaux ou le conducteur. Ces courants, sous l'effet du champ magnétique, créent une force opposée au déplacement de l'objet dans le champ. La figure 1 présente ce phénomène où à l'inverse de la définition ci-dessus, c'est ici l'aimant qui se déplace dans une boucle métallique.

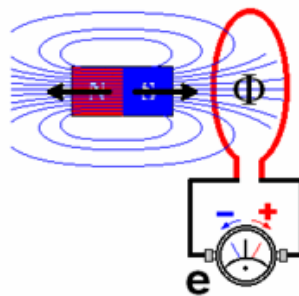


Figure 1 : Tension induite

- **Lenz**

Pour justifier le fait que la force résultante est opposée au déplacement de l'objet, la loi de Lenz peut être utilisée : *La polarité de la tension induite est telle que si le courant peut circuler, il génère un flux qui tend à s'opposer à la variation du flux inducteur.*

Cette loi ne définit que le signe de la tension induite qui est énoncé plus bas.

- **Laplace**

Cette force est celle de « Laplace » et permet donc l'application principale de ce phénomène des courants de Foucault au freinage.

L'équation de Laplace est la suivante :

$$\vec{F} = I \cdot \vec{\ell} \times \vec{B} \quad \text{Soit, scalairement : } F = I \cdot \ell \cdot B \cdot \sin(\alpha)$$

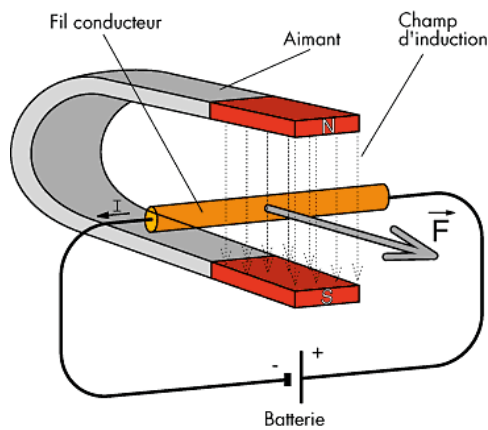


Figure 2 : Force de Laplace

Dans notre cas d'étude, le courant I correspond aux courants de Foucault et dépend de la tension induite.

Le champ magnétique est donné par un aimant permanent ou un électro-aimant.

Cette tension induite a pour équation :

$$U_i = -B \cdot l \cdot v$$

L'élément variant dans cette équation est donc la vitesse de déplacement v.

Plus le champ est grand et l'objet se déplace rapidement, plus la force est grande: plus précisément pour l'application désirée, il s'agit de la force de freinage.

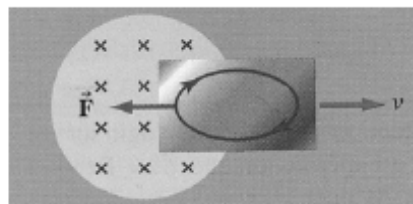


Figure 3: Courants de Foucault et force résultante

- **Lorentz**

La loi de Laplace est une loi dite macroscopique, c'est-à-dire faisant intervenir des grandeurs assez facilement mesurables comme le courant I , la longueur L et le champ magnétique B . Cette loi ne permet pas de prévoir le comportement d'un électron isolé placé dans un champ magnétique. Pourtant, une petite modification de celle-ci le permet. En effet, on a :

$$F = I \cdot L \times B$$

Or, par définition du courant électrique, on a aussi formellement (en réalité, il s'agit de variations) :

$$I = \frac{q}{t}$$

Ainsi, on peut écrire :

$$F = \frac{q}{t} * LXB = q \frac{L}{t} XB = q * vXB$$

Finalement, en parlant de variation de charge dans le temps au lieu de courant, une nouvelle loi peut s'écrire comme suit:

$$F = q \cdot v \times B$$

Cette nouvelle loi est celle de **Lorentz** et en comparant à la loi de Laplace, on peut la définir comme une loi microscopique.

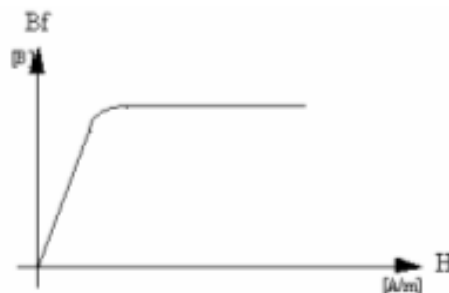
Ces deux équations sont donc intimement liées.

- **Matériaux ferromagnétiques**

Une catégorie de métaux est rassemblée sous le nom de matériaux ferromagnétiques. Ils sont capables de garder leur aimantation malgré la disparition du champ magnétique.

Ce genre de matériaux ne peut donc pas être utilisé pour la roue à freiner car sinon les aimants iraient se plaquer contre la roue et il n'y aurait aucun effet de freinage.

Ex. : fer, cobalt, nickel



Graphique 1 : Induction et champ pour un métal ferromagnétique

- **Matériaux amagnétiques**

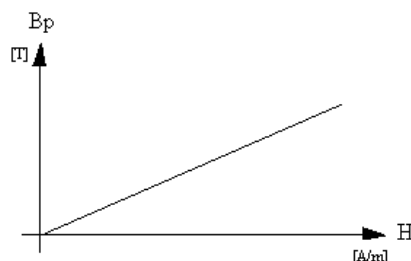
L'autre partie des métaux appartient à cette catégorie.

Sans la présence d'une source de champ magnétique, ils ne sont pas aimantés.

Il faut qu'ils soient proches d'un champ pour que leur aimantation apparaisse: elle est bien moins importante que celle présente dans les métaux ferromagnétiques.

Ex. aluminium, platine, manganèse, gneiss, cuivre, zinc, argent, eau, quartz, diamant, marbre, gypse, supraconducteurs, ...

C'est dans ce groupe de matériaux que sont choisies les matières pour la roue à freiner.



Graphique 2 : Induction et champ possible pour un métal amagnétique

4. Application et utilisations des courants de Foucault

La principale application des courants de Foucault reste celle du freinage de lourdes masses roulantes: camions, trains, autocars.
Quelques grands fabricants réalisent ce type de frein à monter sur les véhicules comme Telma.

- ***Freinage rotatif***

Ce principe de freinage comprend une masse métallique, généralement un disque, qui tourne dans un champ magnétique. Ce champ magnétique, en rouge sur la figure 2, est généré par un électroaimant alimenté, chez Telma par exemple, en 12VDC ou 24VDC.



Figure 2 : Principe de freinage

Le freinage des camions, cars ou autres véhicules s'effectue de la manière suivante : le flux magnétique généré par un courant dans des bobinages, voir figure 2, passe à travers un disque en cuivre monté solidaire de l'arbre de transmission. Des façons différentes de monter ces freins existent (voir p.16)

Etant donné leur dépendance directe avec la vitesse de rotation du disque (démontrée par les formules en p. 10) , ils sont seulement là pour une aide au freinage. Car lorsque la vitesse diminue, les courants de freinage suivent la même tendance. Ces "freins" sont plus communément appelés ralentisseurs.

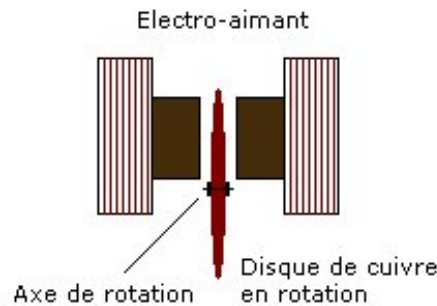


Figure 3 : Principe de montage des disques de freinage sur les camions

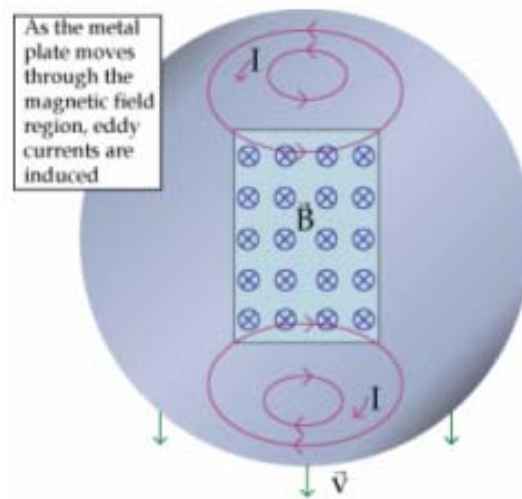
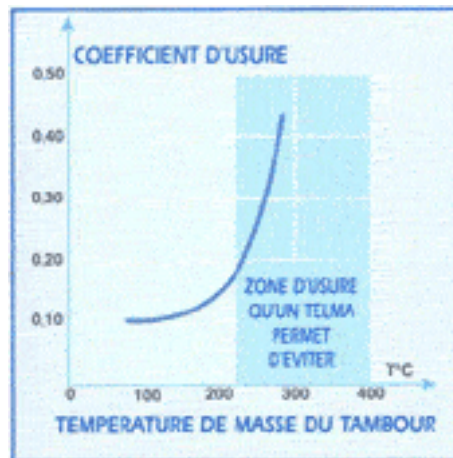


Figure 4 : Courants induits dans le disque de freinage

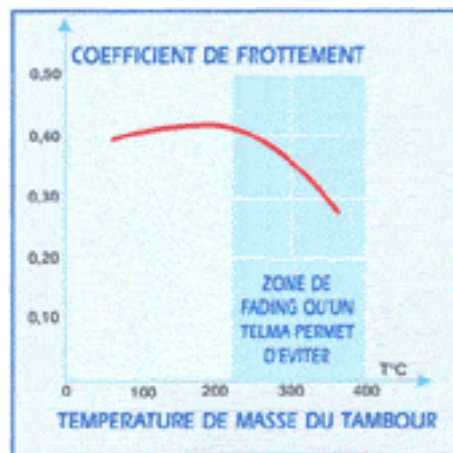
Sur la figure 3, il est évident qu'il n'y a aucun contact entre le générateur de champ et la roue en mouvement: l'usure mécanique n'existe donc pas. Un grand avantage de ces freins est l'absence de frottements, donc de bruit.

Lors d'un freinage classique, les plaquettes et disques de freins chauffent extrêmement vite, surtout sur les véhicules lourds: le coefficient de frottement diminue et l'efficacité également. Le ralentisseur à courant de Foucault permet donc d'éviter d'atteindre des températures critiques dans les plaquettes et les disques et garantit une durée de vie meilleure pour ces derniers, voir graphiques sur la page suivante.

La figure 4 démontre l'allure des courants induits dans le disque de freinage.



Graphique 3 : Zone d'usure évitée par la présence d'un ralentisseur



Graphique 4 : Zone de baisse du coefficient évitée par la présence d'un ralentisseur

Pour freiner sur un poids lourd ou un car, une manette est sous le volant, comme sur la photo 1 pour permettre au chauffeur de gérer plus ou moins la force de freinage suivant la pente ou les besoins.



Photo 1 : Utilisation d'un frein à courants de Foucault

Cette manette agit directement sur un boîtier relais qui alimente les électroaimants montés sur le stator du ralentisseur. Pour chaque position de la manette, un nouveau circuit d'excitation est mis sous tension. Cela permet un freinage progressif et ajustable. Sur la figure 5, les liaisons entre les parties d'un ralentisseur. La figure 6 et la photo 2 montrent un ralentisseur Telma schématisé et réel.

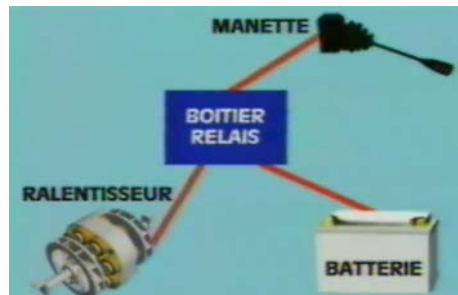


Figure 5 : Liaisons entre les différentes parties d'un ralentisseur Telma

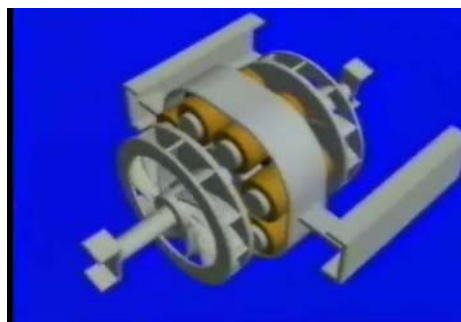


Figure 6 : Ralentisseur schématisé



Photo 2 : Ralentisseur réel

Les bancs d'essais pour moto, entre autre chez "Pichard-racing" possède un frein à courant de Foucault. Etant donné son montage direct sur l'arbre du rouleau, aucune masse ou volant d'inertie perturbe les fluctuations du moteur.
Il permet donc d'obtenir des tests plus proches de la réalité.

Certains vélos d'appartement sont également munis de ce type de freins. L'entraînement se fait donc sans bruit: plus de courroie plaquée sur la roue qui siffle quand on pédale.
La résistance d'avance est réglée en déplaçant les aimants permanents le long de la roue d'inertie.

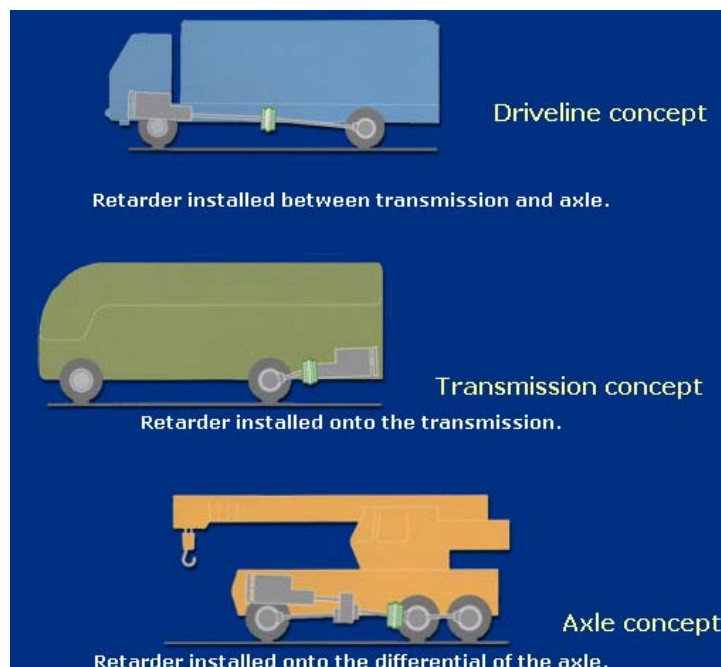


Figure 7 : Montages possibles d'un frein à courants de Foucault

La figure ci-dessus montre les différents types de montage des ralentisseurs suivants le genre de véhicule utilisé.

Il est clair que ce sont des formes et des genres différents de freins, mais l'approfondissement ne sera pas fait ici.

- ***Freinage linéaire***

Cette application est réservée au train à grande vitesse. Comme l'échauffement serait beaucoup trop grand sur des disques placés sur le train, tout se passe dans le rail.

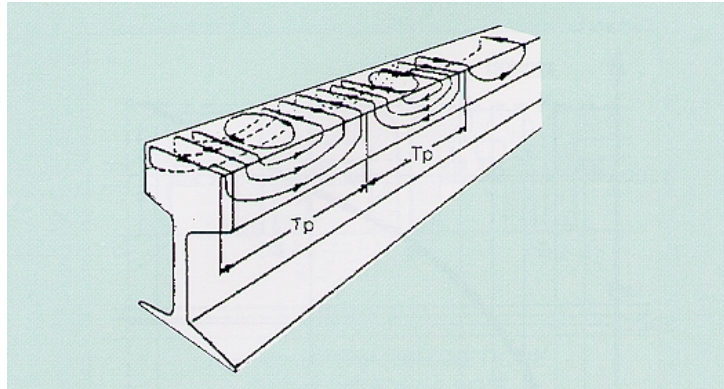


Figure 8 : Lignes de courant présentes dans les rails

Le principe est de générer dans les patins un champ magnétique, dont le mouvement sur les rails y produit des courants de Foucault, voir figure 8, qui engendrent un effort de freinage.

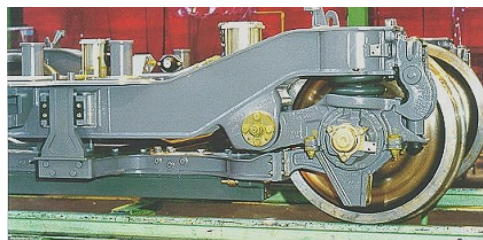


Photo 3 : Frein linéaire monté sur un TGV

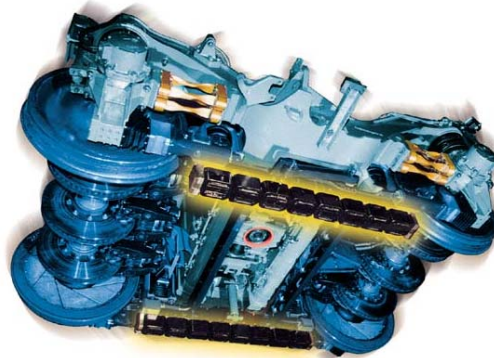


Photo 4 : Frein linéaire de chez Knorr-Bremse

Quand le système freine, les patins sont à une distance d'environ 8 à 10mm des rails. En pleine course, sans freinage, les patins sont relevés pour plus de sécurité. Des vérins pneumatiques assurent le déplacement de ceux-ci.

C'est le même principe de fonctionnement que le frein rotatif, la roue étant représentée ici par le rail.

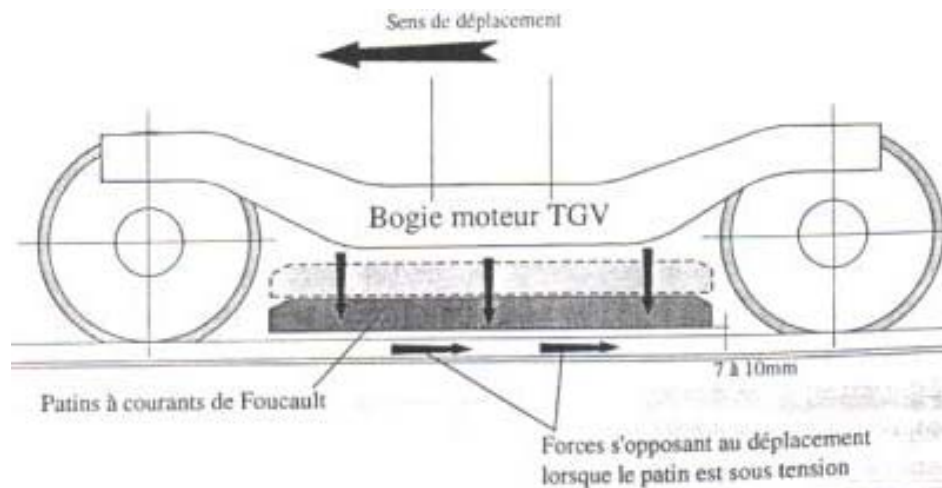


Figure 9 : Fonctionnement du frein linéaire

Sur la figure 9, le sens des forces et du déplacement des patins sont indiqués. Chaque élément de rail est soumis à une force dans le sens de la longueur: cette dernière est proportionnelle aux courants induits dans le rail et à l'induction délivrée par les patins. Le frein à courants de Foucault fonctionnera en conjugaison avec le frein électrique: lors d'une demande de freinage, le premier se met en action d'abord ; si son effort n'est pas suffisant pour respecter la demande, le complément sera assuré par le deuxième.

Ce type de ralentisseur est utilisé sur des attractions comme le *Goliath* à Walibi World au Nederland, photo ci-dessous.



Photo 5: Freins linéaires montés sur une attraction

- **Effets non désirés**

Les courants de Foucault présents dans les parties de machines ou transformateurs créent des pertes par effets Joules.

Des tôles empilées isolées entre elles permettent de réduire efficacement ces pertes, voir figure 10 et 11.

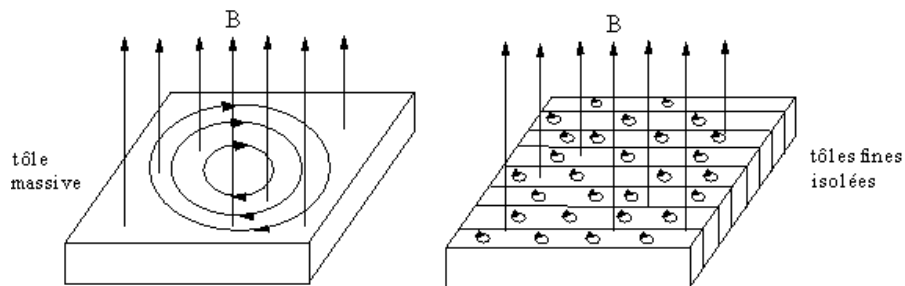


Figure 10 : Allures des courants de Foucault suivant le genre de montage

Les tôles rivetées entre elles permettent ainsi aux courants de ne pas se disperser de plaque en plaque.

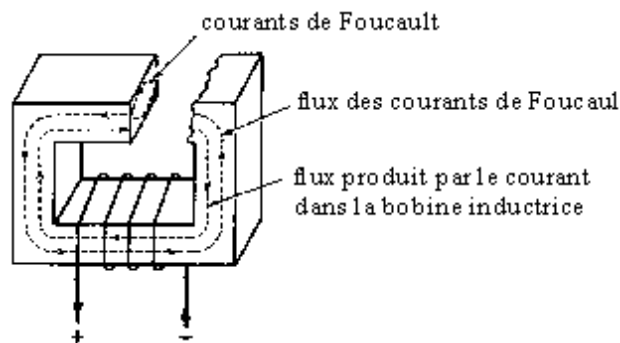


Figure 11 : Courants dans un transformateur

- **Récupération de la chaleur dégagée**

Les courants induits se transforment en chaleur. Mais il est possible de capter cette énergie avant qu'elle ne se change en chaleur. En posant un contact près de l'axe du disque freiné et un autre sur le pourtour. Ainsi les courants peuvent être réutilisés pour alimenter un appareillage électrique ou recharger une batterie.

Certaines lignes de métro réinjectent ce courant dans le réseau.

D'autres applications comme les capteurs ou cuisinière sont plus détaillés en Annexe 3 : Applications courants de Foucault.

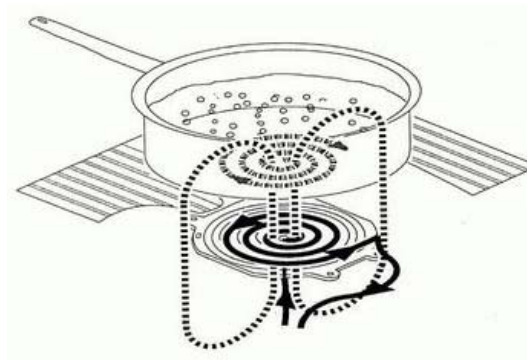


Figure 12 : Plaque à induction

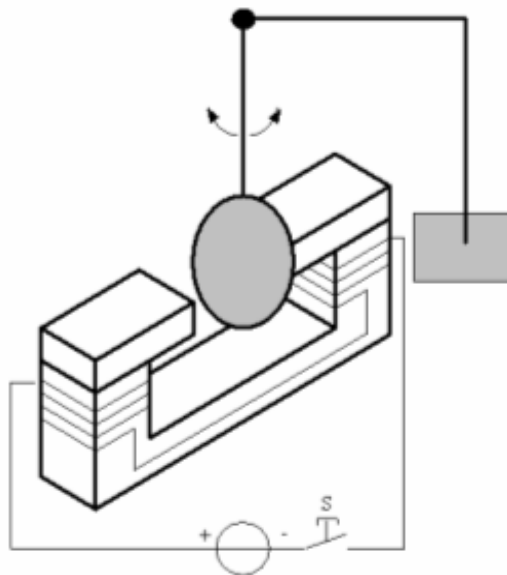


Figure 13 : Pendule de Foucault

5. Développement d'un prototype de démonstration

- **Système roulant, deux prototypes**

Afin d'expliquer et de démontrer ce principe, un prototype roulant serait un atout. Il est évident qu'un banc d'essais constitué d'un axe sur lequel est monté le système s'avère plus pratique.

Mais la partie didactique et attrayante me semble moins mise en avant.

De ce fait, 2 prototypes identiques seront réalisés.

Le premier possédant tout le système de freinage, le deuxième identique mais sans freinage.

Le principe utilisé sera celui monté sur les camions : freinage d'un disque par champ magnétique.

Les matériaux susceptibles d'être utilisés pour ce disque sont mentionnés plus bas.

- **Générateurs du champ magnétiques**

Le champ magnétique responsable du ralentissement de la roue en rotation peut être généré soit par un électro-aimant soit par un aimant permanent.

Dans le cas de l'aimant permanent et de son circuit magnétique, ils doivent être le plus optimale possible: le plus petit entrefer possible pour avoir le plus grand effet de freinage.

Pour l'utilisation d'un électro-aimant, le courant doit être variable dans la bobine. L'induction magnétique résultante doit se situer dans la plage de celle fournie par les aimants permanents.

Cela permet de comparer des mesures effectuées avec les deux façons de générer un flux magnétique.

- **Matériaux différents pour le système de freinage**

Différents matériaux peuvent être utilisés pour démontrer le phénomène du freinage par courant de Foucault: se sont des matériaux amagnétiques comme déjà mentionné auparavant.

La démonstration est plus spectaculaire si différents matériaux peuvent être étudiés. Ils n'auront pas le même comportement et cela permettra de mieux comprendre leur importance pour cette application.

6. Solution étudiée

- **Motivation des choix et réalisation**

- **Véhicules choisis**

Les prototypes seront des voitures à 4 roues. Les matériaux légers comme l'aluminium et le plastic seront utilisés pour la réalisation des véhicules.

Les roues seront en mousse dure, voir photo 6, pour accrocher un maximum au sol sans glisser.



Photo 6 : Roues en mousse dure choisies pour les véhicules

- **Dimensions de la roue à freiner**

En page 9, l'équation de Laplace démontre que, pour un champ magnétique constant, la force de freinage est directement liée à la vitesse de déplacement.

Le but est donc d'avoir la plus grande vitesse possible de la roue à freiner.

Les transmissions de couple se font à travers deux roues dentées plastiques dont les dimensions sont mentionnées ci-dessous.

Le rapport des deux diamètres de celles-ci doit être le plus grand possible pour garantir un freinage optimal (grande vitesse=grand freinage).

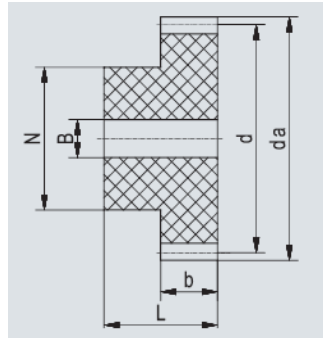


Figure 14 : Cotes pour les roues dentées

Modul 0,7

b = 5

Type No.	Zähne/dents	d	da	N	b	L	B-H8
DG 712 N	12	8.4	9.8	6	5	11	3
DG 713 N	13	9.1	10.5	7	5	11	3
DG 714 N	14	9.8	11.2	8	5	11	3
DG 715 N	15	10.5	11.9	8	5	11	3

Figure 15 : Dimensions choisies de la petite roue dentée

Type No.	Zähne/dents	d	da	N	b	L	B-H8
DG 772 N	72	50.4	51.8	20	5	13	6
DG 775 N	75	52.5	53.9	20	5	13	6
DG 780 N	80	56.0	57.4	20	5	13	6
DG 785 N	85	59.5	60.9	20	5	13	6
DG 790 N	90	63.0	64.4	20	5	13	6
DG 796 N	96	67.2	68.6	25	5	13	8
DG 7100 N	100	70.0	71.4	25	5	13	8
DG 7120 N	120	84.0	85.4	25	5	13	8

Figure 16 : Dimensions choisies pour la grande roue dentée

La colonne d est celle qui faut prendre en compte pour obtenir le rapport des diamètres. La plus grande roue ne doit pas dépasser le diamètre des roues en mousses, sinon elle touche le sol. (voir figure 17).

Le rapport entre ces deux roues dentées est alors le rapport des diamètres d :

$$\text{Rapport}_{i-} = \frac{63}{8.4} = 7.5$$

Le montage ci-dessous montre l'allure du montage final avec les dimensions choisies.

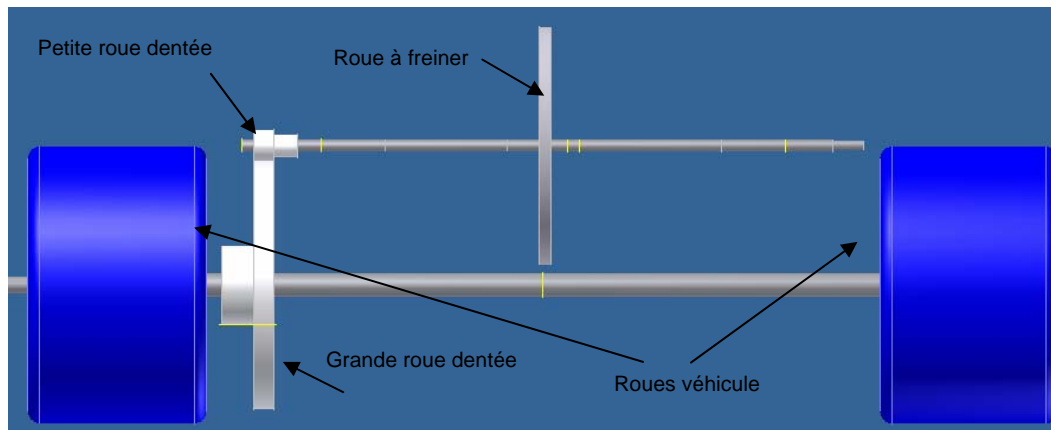


Figure 17 : Dessin 3D du montage pour l'accélération de la roue à freiner

Pour l'épaisseur de la roue à freiner, plus elle est fine, plus l'entrefer du circuit magnétique devient petit et plus l'induction magnétique est grande, donc la force de freinage est grande. A l'encontre de cela, plus la roue est fine, moins les courants de Foucault sont présents, donc la force de freinage diminue. Une largeur moyenne de 3mm a été choisie.

○ Variantes des roues à freiner

Comme mentionné en p. 21, afin de comparer des matériaux différents dans les mêmes conditions, plusieurs roues à freiner seront réalisées: l'aluminium et le laiton sont choisis. La géométrie de ces roues sera également changée : roue pleine, roue évidées.

En pouvant varier les matériaux et les géométries des roues, il est possible de pouvoir évaluer le comportement des courants de Foucault et de comprendre leur dépendance directe avec le type de métaux dans lesquels ils évoluent.



Photo 7: Différentes roues réalisées pour les tests

○ Principe du freinage : système pratique

Un système rapidement interchangeable est préférable : les roues en différents matériaux doivent être remplacées facilement pour les démonstrations. Il est possible de l'enlever et de le remettre en place rapidement et facilement, voir photos ci-dessous.



Photo 8: Axes interchangeables et leurs équerres de fixations

Le circuit magnétique doit également être amovible pour permettre le changement d'axe. Pour permettre à l'axe de tenir dans les deux équerres prévues, deux petites pièces sont usinées avec du jeu et permettent à l'axe de ne pas sortir des logements.

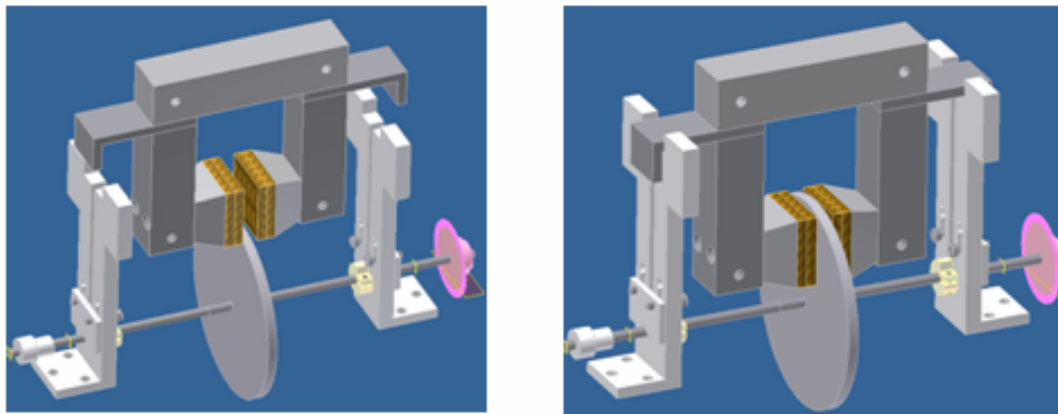


Figure 18: Circuit magnétique amovible

○ Générateur de l'induction magnétique

Les matériaux possibles pour les aimants sont très vastes. Celui choisi pour cette application est le Néodymferbore, voir Annexe 1: Alliages aimants et applications.

Avant toute étude ou dessins de prototype, un système tout simple est monté pour évaluer l'efficacité du freinage par courants de Foucault, voir figure 19.

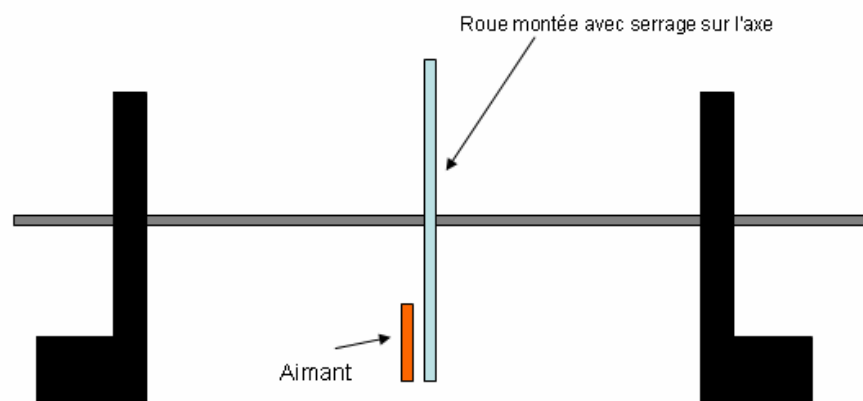


Figure 19: Montage test pour évaluer la force de freinage d'un seul aimant

Le deuxième générateur de champ magnétique est la bobine, électroaimant. Après un rapide calcul (voir Annexe 2 : Dimensionnement de la bobine), il s'avère que pour atteindre une induction magnétique proche de celle fournie par l'aimant, un montage trop imposant est nécessaire.

Cette méthode a donc été abandonnée.

Le montage se fera avec la possibilité de monter un ou deux aimants sur un support en acier. Sur les photos suivantes, les deux montages différents possibles.



Photo 9 : Montage du circuit magnétique avec un aimant et deux aimants

On pourrait augmenter quelque peu l'induction fournie par les aimants en en montant plusieurs en série. La courbe n'étant pas linéaire, l'induction résultante n'est augmentée que quelque peu, voir Annexe 4 : Calcul et mesure de l'induction maximum.

Deux aimants suffisent donc pour démontrer le phénomène.

Un système de réglage d'entrefer pour la partie supérieure du circuit est tout de même étudiée pour avoir en plus différentes valeurs d'inductions entre le minimum et le maximum à disposition suivant le montage avec un ou deux aimants.

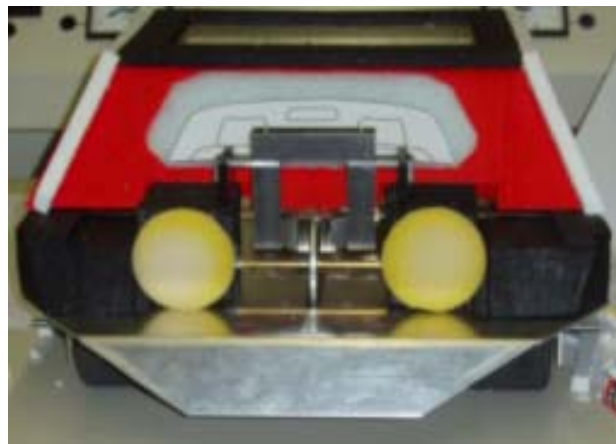


Photo 10 : Prototype final

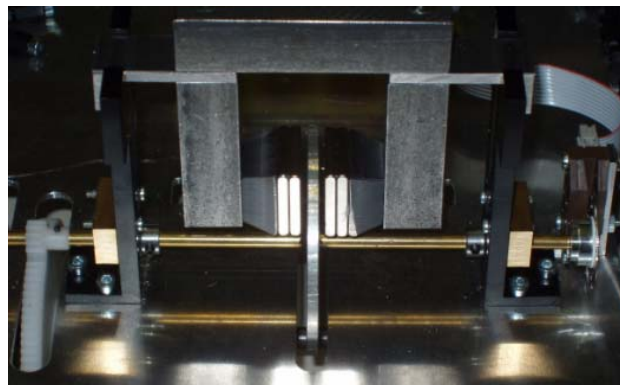
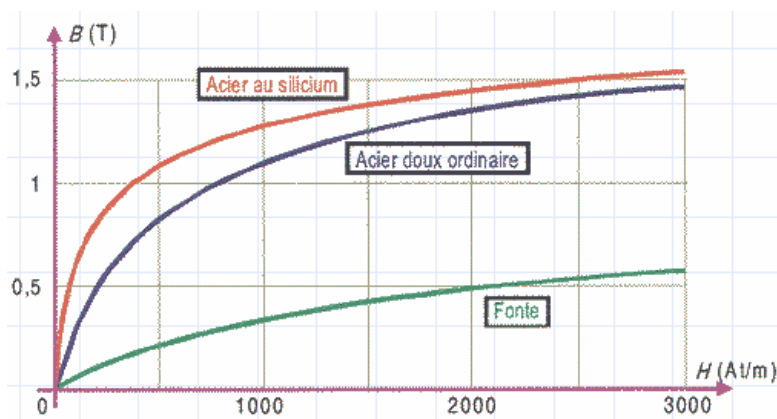


Photo 11 : Montage du frein à courants de Foucault

○ Principe du freinage : dimensionnement

Des mesures d'induction ont été effectuées sur un montage pour connaître la valeur de l'induction magnétique maximum générée par un montage avec deux aimants de chaque côté de la roue, voir Annexe 4 : Calculs et mesures induction magnétique maximum.

Avec ces valeurs, l'étude du circuit magnétique est possible. Le matériaux choisi est de l'acier doux ordinaire (Ac35).



Graphique 5 : Courbes de saturation des aciers classiques

La courbe bleue du graphique 5 (acier doux ordinaire) permet donc de calculer la section du circuit désiré. L'induction de saturation dans ce matériaux est de 1.4T.

Le développement complet des calculs se trouve en Annexe 4.

Le résultat pour la section est le suivant:

$$A_{\text{circuit}} = \frac{A_{\text{aimant}} * B_{\text{aimant}}}{B_{\text{acier}}} = \frac{20\text{mm} * 20\text{mm} * 0.7}{1.4} = 200\text{mm}^2$$

En gardant des dimensions carrées, une section de 15mm * 15mm répond aux exigences. Une réduction doit être prévue pour passer d'un carré de 20mm de côté à 15mm de côté. Sur les photos 7 et 8 ces réductions sont bien visibles.

○ **Mesure de vitesse : évaluation force freinage**

La force de freinage, et toutes les autres forces présentes sur le système, sont possibles d'être évaluées. Mais pour obtenir ces résultats, une inconnue doit être analysée: la vitesse. Pour cela, un capteur de vitesse type « encodeur optique » est monté sur le véhicule. La fréquence des impulsions qu'il délivre en fonction de la vitesse d'avance de la voiture est convertie en tension afin d'être affichable sur un voltmètre, oscilloscope ou multimètre.

L'analyse en détail de la carte électronique, tous les calculs des éléments et le choix de ces derniers se trouvent en Annexe 6: Conception de la carte électronique.

Au bout de l'arbre interchangeable est fixé le disque pour la mesure de vitesse, voir figure 20 ci dessous pour le montage.

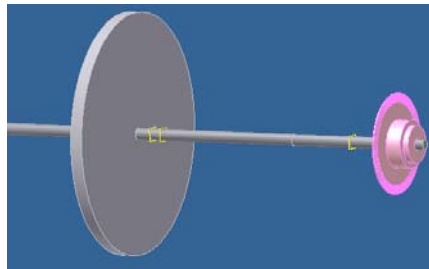


Figure 20 : Montage du disque de mesure de vitesse

Cette tension est donc proportionnelle à la vitesse du véhicule. Un affichage à aiguille (voltmètre) permet la visualisation directe de la tension de sortie (voir Annexe 7: Eléments commandés).

La carte électronique finale comportant tous les éléments nécessaires est la suivante :



Photo 12 : Carte électronique finale

- **Mesures de l'induction sur le prototype**

Les premiers essais ont été réalisés sur un montage en tôles feuilletées, voir Annexe 4 : Calculs et mesures de l'induction magnétique. Le circuit magnétique final est en acier 35. Voici le tableau des résultats des mesures et des calculs :

	Induction mesurée entre tôles feuilletées [T]	Induction calculée [T]	Induction mesurée entre acier 35 [T]
Un aimant	0.58	0.72	0.33
Deux aimants	0.7	0.95	0.64

Tableau 1 : Induction mesurée et calculée dans l'entrefer

Les valeurs d'induction entre le circuit en tôles feuilletées ou en acier 35 sont quasi les mêmes. La différence entre les mesures pour un aimant vient du fait que le montage a du être modifier pour ce contexte. (voir explications dans les pages suivantes).

La photo 13 montre le circuit magnétique réalisé pour le prototype.

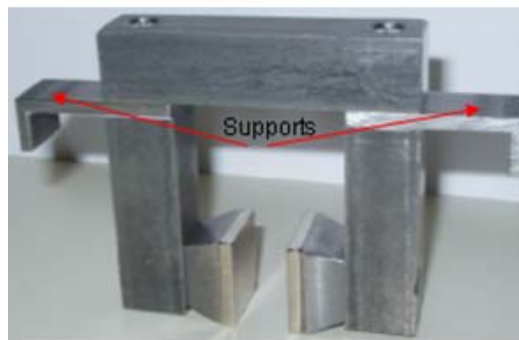


Photo 13 : Circuit magnétique

- **Montage des aimants**

En réalité, lorsqu'on monte un seul aimant en gardant le même entrefer, ce qui est le but, il faut compenser la place du deuxième aimant qui n'est pas là par une partie en acier.

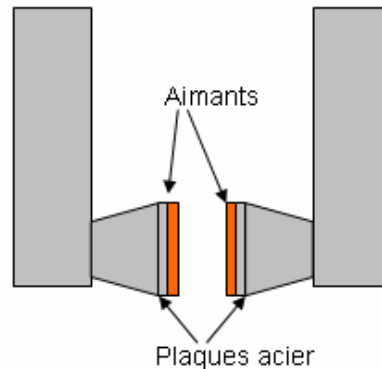


Figure 21 : Montage du circuit initial : plaques en acier contre le circuit

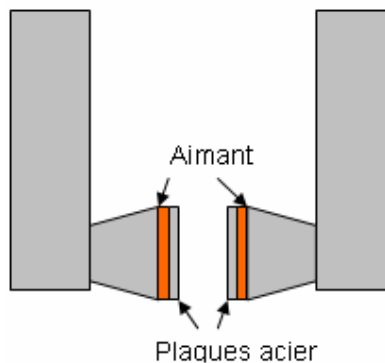


Figure 22 : Montage du circuit final : plaques en acier contre la roue à freiner

La force entre les deux côtés est trop grande pour que les aimants restent plaqués chacun de leur côté quand la partie acier est derrière, figure 21: elle est donc placée devant et là, la force diminue et permet le plaquage de l'aimant de son côté, figure 22.

De ce fait, l'induction finale diminue avec le montage de la figure 22. Ce n'est finalement pas dérangeant car le champ magnétique résultant est deux fois plus petit avec un aimant qu'avec deux.

Il est donc possible d'effectuer des mesures et de pouvoir comparer facilement les valeurs grâce à ce facteur 2.

- **Plaque de test**

En complément au prototype roulant, une plaque de test est intégrée au projet. Le véhicule démontre le freinage par courant de Foucault sur une roue en mouvement dans un champ fixe. Avec cette plaque de test, l'inverse est proposé: le matériaux ne bouge pas tandis que le champ magnétique bouge quand l'aimant descend sur la plaque. (voir figure 23).

Un support en bois comportant deux fentes est posés sur un pliage en alu afin de le soutenir avec une pente.

Dans ces fentes, plusieurs plaques de différents matériaux peuvent être glissées : alu, laiton, plastique, acier. Tout le système est sous une plaque de PVC transparente.

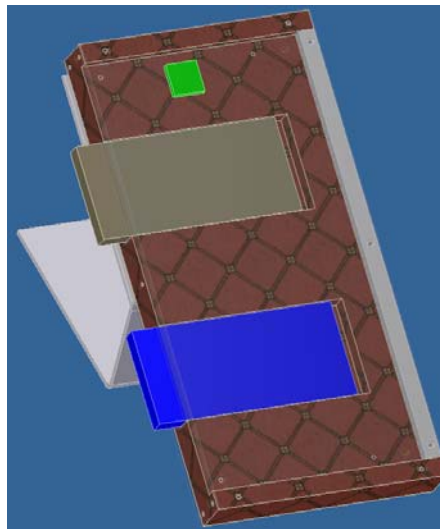


Figure 23 : Plaque de test 3D

Un aimant (le carré vert sur la figure 23) est ensuite lâché depuis le sommet du support en bois. Suivant la matière sur laquelle il glisse, il est freiné, arrêté ou il n'y a pas d'effet.

Le spectateur peut donc changer les plaques à son gré et mieux visualiser l'importance du matériaux pour l'induction des courants de Foucault.

Sur la photo 15, les différentes plaques réalisées pour les démonstrations.



Photo 14 : Rampe de test réalisée

La rampe réalisée est sur la photo ci-dessus.



Photo 15: Plaques pour la démonstration de la rampe

7. Changements effectués

- **Induction variable**

Un réglage de l'entrefer par un mouvement de la pièce supérieure du circuit était à étudier.

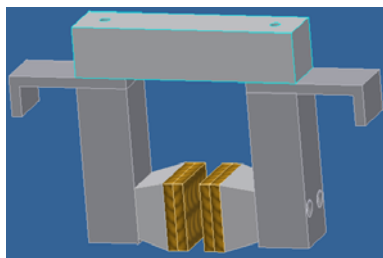


Figure 24 : Circuit magnétique avec l'induction maximal et non réglable

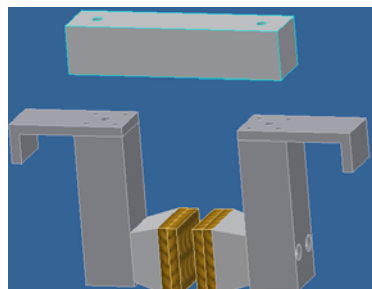


Figure 25 : Mouvement de la partie supérieur et diminution de l'induction

Un rapide calcul permet de se rendre compte à quelle point la force d'attraction est grande, voir page suivante. Cela rend les mouvements très difficiles. Cette idée a donc été abandonnée pour garder seulement les montages avec un aimant et deux aimants.

A disposition finalement trois valeurs différentes d'induction :

- Soit maximale avec deux aimants
- Soit minimale sans aimant
- Soit la moitié de la valeur maximale avec un aimant

○ Force en jeu avec un aimant

La moyenne de l'induction entre les deux aimants est mesurée à 0.33T (voir p.29 Tableau 1).
 Induction présente dans la section de 15mm*15mm :

$$\Phi = A_{\text{aimant}} * B_{\text{aimant}} = A_{\text{circuit}} * B_{\text{circuit}}$$

$$B_{\text{circuit}} = \frac{A_{\text{aimant}} * B_{\text{aimant}}}{A_{\text{circuit}}} = \frac{20\text{mm} * 20\text{mm} * 0.33}{15\text{mm} * 15\text{mm}} = 0.56\text{T}$$

La force d'attraction de la pièce supérieure sur le reste du circuit devient:

$$F = \frac{A * B_{\text{aimant}}^2}{2 * \mu_0} = \frac{15\text{mm} * 15\text{mm} * 0.56^2}{2 * 4 * \pi * 10^{-7}} = 28.97\text{N}$$

○ Force en jeu avec deux aimants

La moyenne de l'induction entre les deux paires d'aimants est mesurée à 0.64T.
 Induction présente dans la section de 15mm*15mm :

$$\Phi = A_{\text{aimant}} * B_{\text{aimant}} = A_{\text{circuit}} * B_{\text{circuit}}$$

$$B_{\text{circuit}} = \frac{A_{\text{aimant}} * B_{\text{aimant}}}{A_{\text{circuit}}} = \frac{20\text{mm} * 20\text{mm} * 0.64}{15\text{mm} * 15\text{mm}} = 1.13\text{T}$$

La force d'attraction de la pièce supérieure sur le reste du circuit devient:

$$F = \frac{A * B_{\text{aimant}}^2}{2 * \mu_0} = \frac{15\text{mm} * 15\text{mm} * 1.13^2}{2 * 4 * \pi * 10^{-7}} = 114.31\text{N}$$

8. Analyses des résultats

Données de départ pour tous les calculs qui suivent:

$d_{\text{roue_véhicule}} : 70\text{mm}$

$d_{\text{roue_à_freiner}} : 60\text{mm}$

$d_{\text{moyen_roue_à_freiner}} : 40\text{mm}$

$poids_moyen_des_véhicules = 1.83\text{kg}$

Toutes les comparaisons entre le freinage et non freinage sont faites avec une roue en alu pleine montée sur les deux véhicules.

- **Forces de frottements**

Comme mentionné en Annexe 8: Mesures sur les prototypes, les forces de frottement sont prises en compte pour les premiers calculs.

Le coefficient de frottement n'étant pas connu, une mesure a été effectuée pour le déterminer.

La valeur lue sur la réglette du ressort est entre 0.5 et 0.6 N.

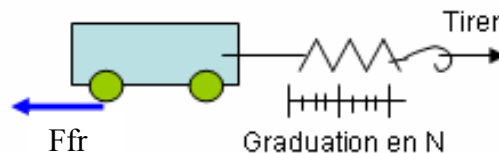


Figure 26: Montage réalisé pour l'évaluation de la force de frottement

Avec cette force F_{fr} mesurée, le coefficient de frottement peut être maintenant déterminé.

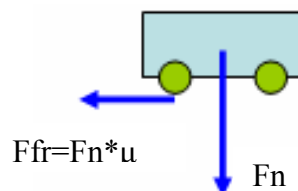


Figure 27: Force de frottement sur le chariot

$$F_{fr} = F_n * \mu_{frott}$$

$$\mu_{frott} = \frac{F_{fr}}{F_n} = \frac{F_{fr}}{m * g} = \frac{0.55}{1.83 * 9.81} = 0.0306$$

Une deuxième façon de déterminer le coefficient de frottement est de se baser sur les mesures de vitesse effectuées lors des tests.

Les courbes du véhicule qui ne freine pas permettent de déterminer ce coefficient. Il faut tout d'abord calculer l'accélération et ensuite, avec l'équation ci-dessous, trouver les forces de frottement, et finalement le coefficient de frottement.

Equation pour la voiture qui ne freine pas:

$$F_{freinage} = 0$$

$$\Sigma F = m * a = F_t - F_{fr} = m * a$$

$$a = \frac{\Delta v}{\Delta t}$$

Pour les valeurs des accélérations, se référer à Annexe 9: Mesures sur les prototypes

Poids [kg]	Masse [N]	Pente [%]	Pente [°]	Ft [N]	F _n [N] m*g	F _{fr} [N]	a[m/s*s] (suivant les mesures prises)	μ dynamique
1.83	17.95	6	3.4	1.08	17.9	0.639	0.92	0.0356
		12	6.8	2.14	17.8	0.477	2.45	0.0268
		24	13.5	4.19	17.5	0.415	5.52	0.0238

Tableau 2: Forces présentes sur le véhicule et coefficient de frottement

L'hypothèse faite préalablement sur les forces de frottements était correcte. Elles correspondent, suivant sur quelle pente se trouve le prototype, à plus de la moitié de la force Ft: il n'est pas possible de les négliger.

Les forces de frottements dépendent du poids du véhicule, comme il varie quelque peu, elles varient également. Une moyenne à 0.6N est gardée car ces valeurs sont pour le véhicule qui ne freine pas, donc lorsque la voiture freine, il y a encore un peu plus de frottement. C'est pourquoi la valeur gardée est plus haute que la moyenne réelle entre les trois valeurs du tableau.

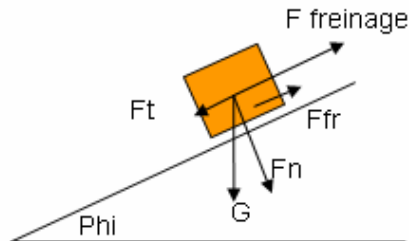


Figure 28: Représentation graphique des forces en jeu sur les véhicules

Les coefficients dynamiques calculés et ceux mesurés correspondent tout à fait.

Coefficient dynamique	
Calculés	Mesurés
0.0356	0.03
0.0268	0.03
0.0238	0.03

Tableau 3: Récapitulatif des coefficients dynamiques

Les coefficients présents dans le tableau 3 sont tous très proches. La mesure est donc bonne et les calculs également.

Pour les calculs où le coefficient intervient, une valeur moyenne de 0.03 est gardée.

Partant du principe que le coefficient ne change pas sauf si la vitesse augmente énormément, une moyenne entre ces valeurs permet de garder une force de frottement constante pour les calculs.

- **Différences de géométrie et de matériaux**

Pour une pente donnée, la force est toujours la même quelque soit le type de roue installé. Cela est dû au fait que le système s'équilibre toujours, donc la vitesse est constante et compense la différence entre les roues.

La roue en laiton va donner une vitesse d'équilibre plus haute que la roue en alu pleine car elle freine moins bien: sa résistivité est plus que deux fois plus grande que celle de l'aluminium. Mais la force de freinage est toujours la même. Idem pour la roue en alu perforée et celle pleine.

Dans le tableau suivant, voici les différences entre les vitesses de stabilisation suivant les différentes roues en alu utilisées.

				Rapport entre les vitesses
		Roue		
Pente 6%		Alu pleine	Alu vide	
	Un aimant	0.2	0.38	1.9
	Deux aimants	0.07	0.14	2.00
Pente 12%				
	Un aimant	0.43	0.77	1.79
	Deux aimants	0.14	0.28	2.00
Pente 24%				
	Un aimant	0.86	1.69	1.96
	Deux aimants	0.26	0.51	1.96

Tableau 4: Comparaison des vitesses de stabilisation en m/s pour les roues en aluminium

La photo 14 montre les deux roues en alu. Leur rapport des surfaces est calculé ci-dessous.

$$A_{\text{pleine}} = \frac{\pi * (60\text{mm}^2 - 20\text{mm}^2)}{4} = 2513\text{mm}^2$$

$$A_{\text{trouée}} = 2513\text{mm}^2 - (6 * \frac{\pi * 15\text{mm}}{4}) = 1453\text{mm}^2$$

$$\text{Rapport} = \frac{A_{\text{pleine}}}{A_{\text{trouée}}} = \frac{2513}{1453} = 1.73$$



Photo 16: Roues en alu réalisées pour les véhicules

Les rapports trouvés entre les vitesses stabilisées se rapprochent du rapport des aires, voir tableau 4, page précédente.

Pour un même matériaux, le freinage est sensiblement modifié suivant la géométrie de la roue. Les courants et tensions induites qui donnent naissance à la force de Laplace sont donc intimement liés à la surface traversant le champ magnétique.

Matériaux	Résistivité Ω/m
Laiton	7.00E-08
Aluminium	3.00E-08
Cuivre	1.70E-08

Tableau 5: Résistivité des matériaux utilisés

Le rapport entre les résistivités du laiton et de l'aluminium est de 2.3. Dans les mesures de vitesses, cela se ressent. Elles sont sensiblement différentes et cela se ressent dans les mesures effectuées, explicitement dans le tableau 6, ci dessous.

		Vitesse de la roue à freiner [m/s]			
		Un aimant	Deux aimants	Rapport vitesse alu/laiton 1 aimant	Rapport vitesse alu/laiton 2 aimants
Pente 6%					
Roue					
	Alu pleine	0.2	0.07	1.56	
	Laiton	0.32	0.11		1.57
Pente 12%					
Roue					
	Alu pleine	0.43	0.14	1.46	
	Laiton	0.63	0.23		1.64
Pente 24%					
Roue					
	Alu pleine	0.86	0.26	1.63	
	Laiton	1.4	0.43		1.65

Tableau 6: Comparaison entre les vitesses de stabilisation en m/s pour de l'alu ou du laiton

L'aluminium est plus que 2 fois meilleur conducteur que le laiton, voir tableau 5 page précédente.

Par rapport aux mesures effectuées, il faut donc s'attendre à un meilleur freinage avec une roue en aluminium.

Effectivement, le rapport entre les vitesses de sorties est un peu plus bas, mais l'aluminium est bel et bien plus efficace pour le freinage.

Cela est bien visible sur les figures ci-dessous.

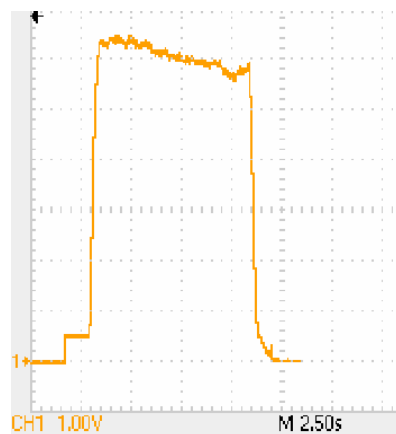


Figure 29: Allure de la vitesse pour une roue pleine alu, pente 24% et un aimant

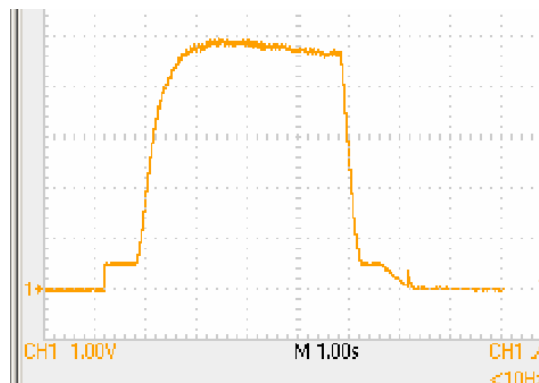


Figure 30: Allure de la vitesse pour une roue laiton, pente 24% et un aimant

Le freinage avec le laiton est plus "doux", figure 30, moins efficace que celui avec de l'aluminium, figure 29: la courbe de vitesse forme presque un angle droit avec l'aluminium, à l'inverse, celle du laiton est plus arrondie.

En résumé, pour une même pente, plus le matériaux est conducteur et meilleur cela freinera.

Maintenant, comparons, pour un même matériaux, si la différence de géométrie change quelque chose sur l'efficacité. A priori, comme mentionné en page précédente, la différence doit être visible sur les graphiques des vitesses.

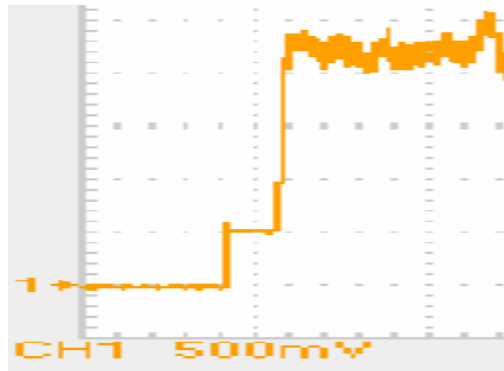


Figure 31: Allure de la vitesse pour une roue alu pleine, pente 12% et deux aimants

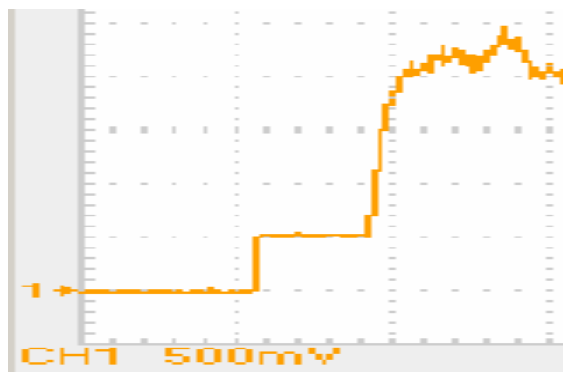


Figure 32: Allure de la vitesse pour une roue alu vidée, pente à 12% et deux aimants

Le même phénomène qu'avec le laiton, figure 30 se retrouve avec la courbe de la roue vide en alu, figure 32.

Le freinage est beaucoup plus efficace avec la roue en alu pleine: les courants de Foucault se créent plus rapidement dans la roue alu étant donné sa moindre résistivité comparé au laiton. Sur les poids lourds, les disques des ralentisseurs sont très souvent en cuivre, qui est encore meilleur conducteur que l'aluminium, voir tableau 5 p.39.

Egalement utilisé pour faire les câbles électriques, le cuivre et sa résistivité sont un grand atout pour conduire l'électricité sans trop d'opposition au courant.

- **Forces et couples de freinage**

Toutes les forces et vitesses calculées sur les roues à freiner sont appliquées sur le diamètre moyen traversant le champ magnétique. (voir p.35 données de départ)

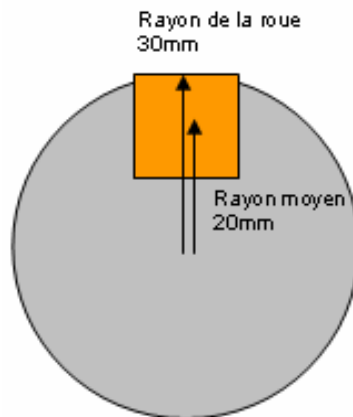


Figure 33: Rayon moyen des roues à freiner

Les mesures effectuées démontrent bien qu'après un certain temps, le véhicule se stabilise à une vitesse plus ou moins constante, voir Annexe 9: Mesures sur les prototypes. Lorsque le véhicule est lancé, l'équation suivante régit le système:

$$F_{\text{freinage}} = 0$$

$$\Sigma F = m * a = Ft - F_{fr} - F_{\text{freinage}} = m * a$$

Mais quand la stabilisation est faite, l'accélération tombe à zéro. La force F_{freinage} et la force de frottement compensent la force F_t .

$$F_{\text{freinage}} \neq 0$$

$$\Sigma F = 0 = Ft - F_{fr} - F_{\text{freinage}} = 0, F_{\text{freinage}} = Ft - F_{fr}$$

La force de freinage trouvée est celle appliquée sur les roues du véhicule. Afin d'obtenir la force délivrée par les aimants sur la roue à freiner, il faut tenir compte des rayons différents et du rapport entre les deux roues dentées.

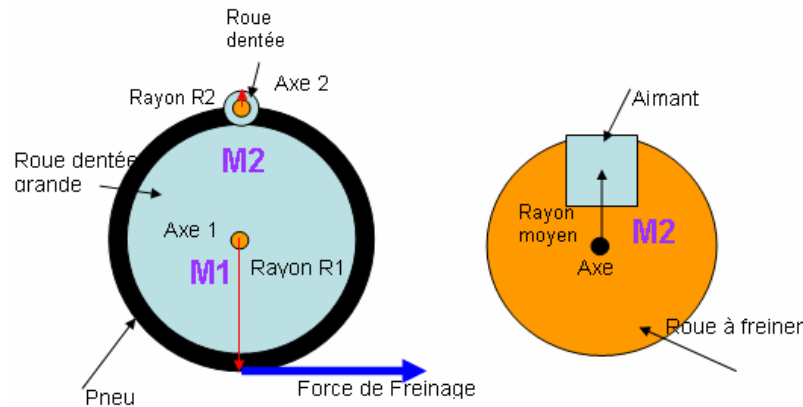


Figure 34: Schéma des rayons d'application des couples

La figure ci-dessous est une coupe à travers les deux roues dentées.

Le rapport des roues dentées est de 7.5, le diamètre des pneus est de 70mm et celui de la roue à freiner est de 60mm.

Le point d'application de la force des aimants est au centre de ces derniers pour simplifier les calculs.

En se référant à l'image ci-dessus, M définissant les couples, les équations suivantes peuvent être écrites:

$$M1 = 7.5 * M2$$

La roue à freiner est montée sur le même axe que la petite roue dentée, le couple est alors le même que sur cette dernière.

$$F_{\text{freinage}} * R1 = 7.5 * R_{\text{moyen}} * F_{\text{aimant}}$$

$$F_{\text{aimant}} = \frac{F_{\text{freinage}} * 0.035}{7.5 * 0.02} = F_{\text{freinage}} * 0.2333$$

Ces forces suivant les inclinaisons sont rassemblées dans le tableau 7, en page suivante.

	Force frottement	Force Ft	Force Freinage	Force des aimants
Pente	Ffr [N]	[N]	[N]	[N]
6%				
Alu pleine	0.60	1.06	0.46	0.11
Alu vide	0.60	1.06	0.46	0.11
Laiton	0.60	1.09	0.49	0.11
12%				
Alu pleine	0.60	2.12	1.52	0.35
Alu vide	0.60	2.11	1.51	0.35
Laiton	0.60	2.18	1.58	0.37
24%				
Alu pleine	0.60	4.18	3.58	0.84
Alu vide	0.60	4.17	3.57	0.83
Laiton	0.60	4.29	3.69	0.86

Tableau 7: Forces en jeu sur le véhicule freiné

Les forces sont quelques peu différentes pour une même pente car le poids change suivant la roue qui est utilisée.

La *force aimant* du tableau correspond à la force qui freine directement sur la roue.

Ces valeurs à disposition, il est possible d'obtenir maintenant les couples de freinage qui agissent sur les roues à freiner.

Il y a deux façons de pouvoir les calculer: soit par l'équation mécanique, soit par la puissance électrique calculée plus bas.

Les deux équations sont les suivantes:

$$M_{\text{méc}} = F * r_{\text{roue}}$$

$$P_{\text{élé}} = M * \omega, M = \frac{P_{\text{élé}} * 60}{2 * \pi * n}$$

Premièrement, il faut passer les vitesses des roues à freiner en tr/min par la formule ci-dessous:

$$v_{\text{en tr/min}} = \frac{v_{\text{en m/s}}}{d * \pi} * 60$$

Vitesse de la roue à freiner en [m/s] 1 aimant	Vitesse de la roue à freiner en [tr/min] 1 aimant	Pente	Vitesse de la roue à freiner en [m/s] 2 aimants	Vitesse de la roue à freiner en [tr/min] 2 aimants	Rapport des vitesses
		6%			
0.2	96.0	Alu pleine	0.07	33.6	2.85
0.38	182.4	Alu vide	0.14	67.2	2.71
0.32	153.6	Laiton	0.11	52.8	2.89
		12%			
0.43	206.4	Alu pleine	0.14	67.2	3.07
0.77	369.6	Alu vide	0.28	134.4	2.75
0.63	302.4	Laiton	0.23	110.4	2.74
		24%			
0.86	412.8	Alu pleine	0.26	124.8	3.3
1.69	811.2	Alu vide	0.51	244.8	3.3
1.4	672.0	Laiton	0.43	206.4	3.25

Tableau 8: Vitesses en tr/min et m/s des roues à freiner

Le tableau ci-dessus répertorie les valeurs en tr/min nécessaires pour déterminer oméga.

Les couples peuvent à présent être déterminés.

Quelque soit le montage, le couple est le même car il dépend de la force de freinage qui elle, ne dépend que de la pente.

Voici les couples calculé mécaniquement:

Pente	Couple de freinage sur la roue [mNm]
6%	
Alu pleine	2.15
Alu vide	2.14
Laiton	2.29
12%	
Alu pleine	7.09
Alu vide	7.07
Laiton	7.36
24%	
Alu pleine	16.70
Alu vide	16.65
Laiton	17.24

Tableau 9: Couple en mNm sur les roues à freiner suivant la vitesse d'avance

Si maintenant, le calcul du couple se fait à travers la puissance électrique, voici les valeurs qu'on obtient:

		Couple en [mnM] Sur la roue 1 aimant		Couple en [mnM] Sur la roue 2 aimants
Pente	P (W) 1aimant		P (W) 2 aimants	
6%				
Alu pleine	0.02	2.14	0.032	2.14
Alu vide	0.04	2.13	0.064	2.13
Laiton	0.04	2.28	0.054	2.28
12%				
Alu pleine	0.15	7.05	0.213	7.05
Alu vide	0.27	7.03	0.424	7.03
Laiton	0.23	7.32	0.363	7.32
24%				
Alu pleine	0.72	16.61	0.931	16.61
Alu vide	1.41	16.56	1.819	16.56
Laiton	1.21	17.14	1.588	17.14

Tableau 10: Couple en mNm sur les roues à freiner suivant la puissance électrique

A part la vitesse de stabilisation, qui elle est mesurée, toutes les valeurs sont obtenues par calculs. Elles sont dépendent donc toutes l'une de l'autre.

Cela veut dire que les résultats obtenus pour le couple suivant le montage est logiquement identique.

De plus, le couple dépend également de la force de freinage qui ne change presque pas pour une pente donnée.

Si maintenant, une comparaison est faite entre les différents couples trouvés suivant le calcul utilisé, tableaux 9 et 10, le constat est rapide: les valeurs sont les mêmes.

Etant donné que tous les résultats trouvés sont liés, il est normal de trouver les mêmes valeurs de couple dans les deux cas.

Dr. Daho Taghezout a effectué un montage similaire sur un logiciel 3D, Flux3D pour évaluer le couple et les courants induits présents dans le système. Ce programme est semblable à Flux2D, le programme sur lequel j'ai simulé le système avec l'option des calculs dynamiques en plus.

Ses données sont les suivantes:

Entrefer entre roue et aimants 2mm

Diamètre de la roue 77 mm

Br aimant 1T

Epaisseur de la roue 5 mm

Epaisseur des aimants : 3mm chacun

Résistivité de la roue: 29 nΩm

Le couple obtenu à 1'000 tours / min est constant et égal à 7.7 mNm

Voici ce qu'il obtient comme résultats:

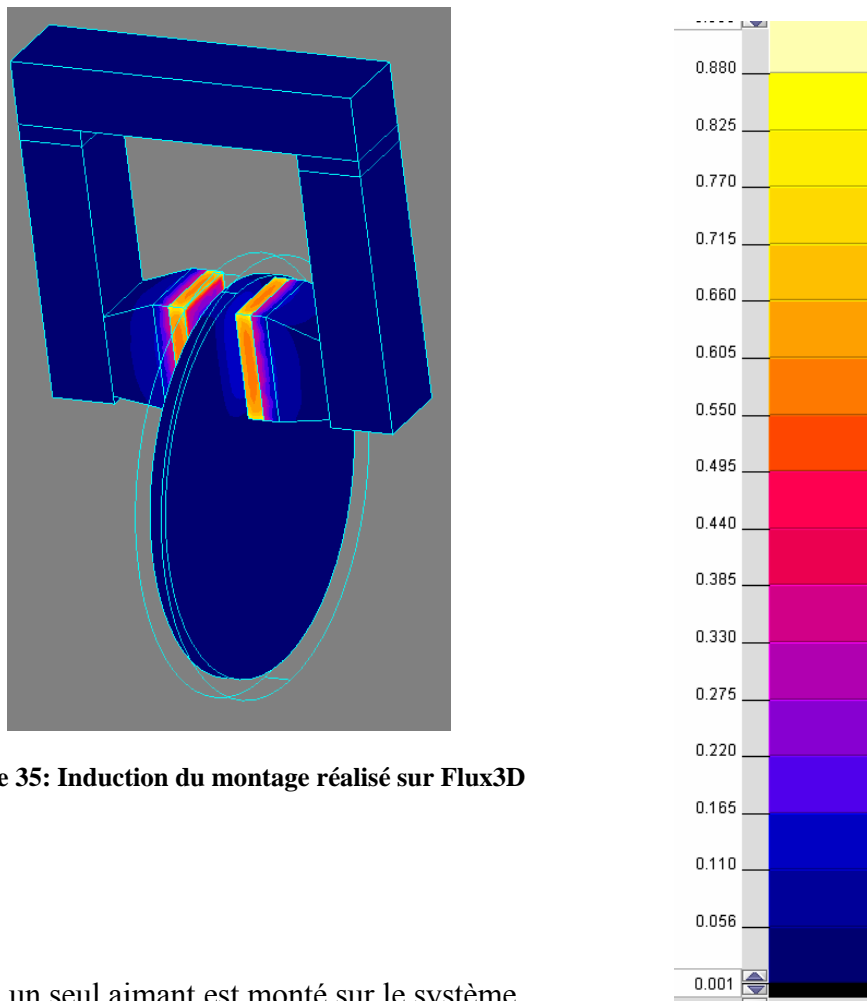


Figure 35: Induction du montage réalisé sur Flux3D

Apparemment, un seul aimant est monté sur le système.
L'échelle de couleurs à droite représente la valeur d'induction présente dans le dessin de la figure 35.

L'entrefer total est de : $5+2+2=9\text{mm}$.

Dans mon cas, pour effectuer une comparaison, lorsqu' un seul aimant est monté de chaque côté, il y a un espace de 1mm entre la roue et les aimants et cette dernière fait 3mm d'épais. Ce qui donne un entrefer de: $3+1+1= 5\text{mm}$.

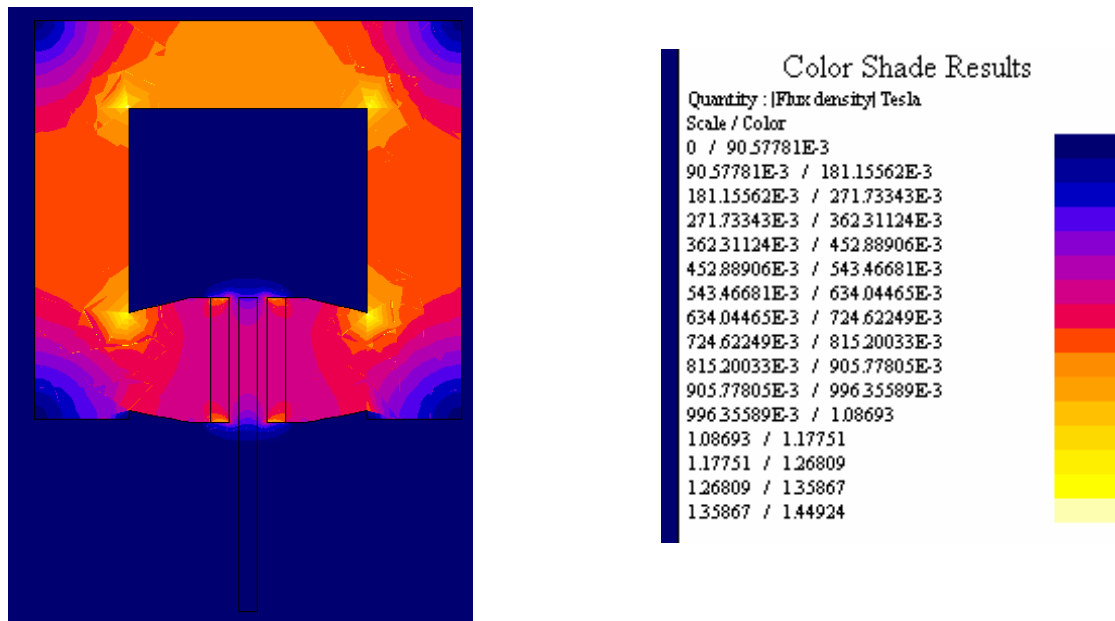


Figure 36: Montage réalisé sur Flux2D

L'échelle des couleurs à droite donne l'induction présente dans le montage de la figure 36. Avec les calculs effectués dans mon cas, tableau 10 p.46, un couple d'environ 16mNm est présent quand la roue alu pleine tourne à 800tr/min pour un montage avec un aimant.

Dans l'ordre de grandeur, les valeurs se tiennent entre les deux montages.

L'induction du système sur Flux3D dans l'entrefer, figure 35, est presque deux fois plus faible que dans le circuit réalisé sur Flux2D, figure 36, étant donné le rapport des entrefers pour les mêmes types d'aimants utilisés.

Il y a un rapport un peu plus élevé que deux entre les deux couples: 7mNm et 16mNm.

En étudiant également la densité de courant, les ordres de grandeurs sont gardés.

Dans le cas du montage sur Flux3D, une moitié environ des lignes de courant (voir figure 37 ci-dessous) a une densité de $5.5\text{E}06 \text{ A/m}^2$. L'autre moitié se situe à une moyenne d'environ $2\text{AE}06/\text{m}^2$.

La densité moyenne du montage sur Flux3D est donc de :

$$\frac{5.5 + 2}{2} = 3.75E06 \frac{A}{m^2} = 3.75 \frac{A}{mm^2}$$

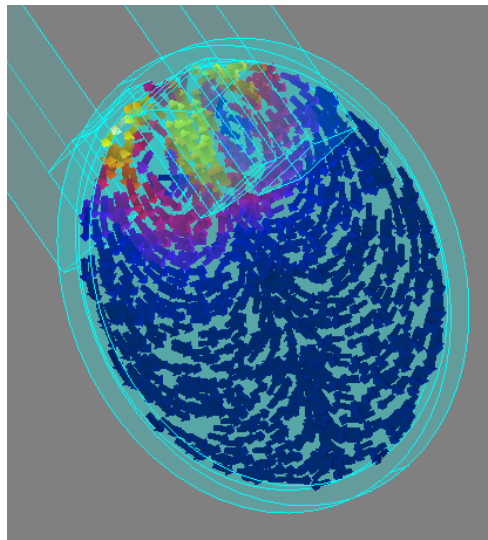
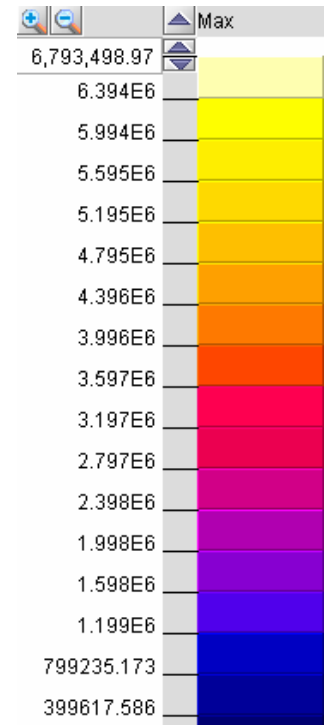


Figure 37: Allure des courants du montage sur Flux3D



L'échelle ci-contre montre l'intensité de la densité de courants dans la roue en A/m².

La densité du montage réalisé sur Flux2D donne un courant de 126A, voir tableau 11 page suivante.

Ce courant est supposé sur une section de la largeur de l'aimant fois l'épaisseur de la roue: cela donne une section de:

$$20mm * 3mm = 60mm^2$$

La moyenne de la densité de courant est:

$$Densité = \frac{I}{S} = \frac{126}{60} = 2.1 \frac{A}{mm^2}$$

Les deux couples et densité de courants sont dans les mêmes ordres de grandeur: les valeurs que j'ai trouvées sont donc proches de la réalité.

- **Tensions et courants induits**

Une fois les forces connues, les courants de Foucault et les tensions induites peuvent être déterminés suivant les formules ci-dessous.

$$F_{\text{aimants}} = I * L * B$$

$$U_i = -B * L * v$$

Pour la longueur L, la longueur de l'aimant est considérée dans les deux cas (20mm). L'induction B pour un montage avec un aimant est de 0.33T et pour deux aimants, elle vaut 0.64T.

La vitesse v présente dans la formule de la tension induite est celle du conducteur qui passe dans le champ magnétique. Comme le codeur nous donne directement la vitesse de l'axe sur lequel la roue à freiner est montée, aucune transformation n'est à faire.

Ces valeurs de vitesse en m/s sont celles en gras du tableau 8 p.45.

Le rapport des inductions entre le montage avec un aimant et deux aimants est le suivant :

$$\frac{\text{Induction}_{\text{mont}_2\text{aimants}}}{\text{Induction}_{\text{mont}_1\text{aimant}}} = \frac{0.64}{0.33} = 1.94$$

Le rapport des courants dans le tableau est de toute façon le même que celui des inductions, puisque ces derniers sont calculés avec les inductions.

	Courants de Foucault [A] 1 aimant	Courants de Foucault [A] 2 aimants	Rapport courants
Pente			
6%			
Alu pleine	16.30	8.41	1.94
Alu vide	16.20	8.35	1.94
Laiton	17.33	8.94	1.94
12%			
Alu pleine	53.73	27.70	1.94
Alu vide	53.52	27.60	1.94
Laiton	55.78	28.76	1.94
24%			
Alu pleine	126.53	65.24	1.94
Alu vide	126.12	65.03	1.94
Laiton	130.58	67.33	1.94

Tableau 11: Courants induits et rapport entre les deux suivant le montage

Par contre, les tensions ne gardent pas le même rapport de 1.94, voir le tableau 12 ci-dessous. Dans le calcul de celles-ci, la vitesse et l'induction y sont incluses.

Il y donc une division entre le rapport de 1.94 et celui entre les vitesses qui est en moyenne de 3, voir tableau 8 p.45.

Le calcul ci-dessous le démontre:

$$U_{i_2aimants} = v * B * L \quad U_{i_1aimant} = 3 * v * \frac{B}{1.94} * L$$

$$\frac{U_{i_1aimant}}{U_{i_2aimants}} = \frac{3}{1.94} = 1.54$$

	Tension induite U_i [mV] 1 aimant	Tension induite U_i [mV] 2 aimants	Rapport tensions
Pente			
6%			
Alu pleine	1.32	0.90	1.47
Alu vide	2.51	1.79	1.40
Laiton	2.11	1.41	1.50
12%			
Alu pleine	2.84	1.79	1.58
Alu vide	5.08	3.58	1.42
Laiton	4.16	2.94	1.41
24%			
Alu pleine	5.68	3.33	1.71
Alu vide	11.15	6.53	1.71
Laiton	9.24	5.50	1.68

Tableau 12: Tensions induites et rapport entre les différents montages

La moyenne des rapports de tensions du tableau 12 est de 1.54.

Les courants de Foucault ont, a priori, des valeurs élevées, voir tableau 11 page précédente. Mais cela ne veut pas dire que les roues chaufferont beaucoup. L'épaisseur des roues est relativement grande et le diamètre aussi. (voir Puissance dissipée, chapitre suivant). D'ailleurs, l'échauffement ne se ressent pas au toucher.

Par contre, la tension induite est très faible, quelques millivolts, voir tableau 12 ci dessus : elle est directement proportionnelle à la vitesse qui est relativement faible.

- ***Puissance dissipée***

La puissance dissipée dans la roue à freiner est minime: elle répond au produit des valeurs des deux tableaux précédents (le 11 et le 12).

Au début, l'échauffement est adiabatique. Ensuite, dès que la chaleur atteint la périphérie de la roue, les phénomènes de convection, de refroidissement apparaissent. Les premiers calculs deviennent erronés et l'évaluation de la chaleur qui reste dans la roue plus complexe à calculée.

Je me suis contentée des calculs d'échauffements adiabatiques.

La puissance dissipée par les courants et tensions induites est dissipée tout d'abord dans la roue, puis dans l'air.

Etant donné que la roue ne va pas énormément chauffer (quelques degrés) et que l'air ambiant est tempéré, la différence de température n'est pas grande. Le refroidissement par l'air ne sera pas très efficace donc le résultat obtenu par le calcul adiabatique sera proche de la réalité.

Il est possible d'obtenir cette puissance d'échauffement soit par calcul électrique soit par calcul mécanique.

- **Calcul électrique**

La solution électrique est mentionnée dans le tableau 13, ci-dessous. La puissance est tout simplement obtenue par la formule suivante:

$$P_{\text{dissipée}_1} = U_i * I_{\text{Foucault}}$$

Deux cas sont pris pour évaluer les différences entre les deux façons de calculer. Le montage avec un aimant dissipe plus de puissance, deux cas avec le montage d'un aimant sont choisis.

1er cas: Pente à 12%, roue en laiton, montage un aimant

$$P_{\text{dissipée}_\text{élé}} = 0.23\text{W}$$

2ème cas: Pente à 24%, roue en alu vidée, montage un aimant

$$P_{\text{dissipée}_\text{élé}} = 1.41\text{ W}$$

Pente	P (W) 1 aimant	P (W) 2 aimants
6%		
Alu pleine	0.02	0.008
Alu vide	0.04	0.015
Laiton	0.04	0.013
12%		
Alu pleine	0.15	0.050
Alu vide	0.27	0.099
Laiton	0.23	0.085
24%		
Alu pleine	0.72	0.217
Alu vide	1.41	0.425
Laiton	1.21	0.371

Tableau 13: Puissances électriques dissipée dans les roues à freiner

○ Calcul mécanique

Pour le 1^{er} cas: Pente à 12%, roue en laiton, montage un aimant

Si le calcul est fait par rapport à la roue à freiner, voici les dimensions à prendre en compte:

$$P_{\text{dissipée}_\text{méc}} = M * \omega = F_{\text{aimant}} * r_{\text{roue}_\text{à}_\text{freiner}}$$

$$r_{\text{roue}_\text{à}_\text{freiner}} = 40\text{mm}, \text{vitesse}_\text{en}_\text{m/s} = 0.63$$

(voir tableau 8 p. 45 pour la vitesse).

Les équations deviennent:

$$M = F_{\text{aimant}} * r_{\text{roue}_\text{à}_\text{freiner}} = 0.37 * 0.02 = 0.0074\text{Nm}$$

(voir tableau 7 p. 44 pour F_{aimant})

$$\omega_{11} = \frac{2 * \pi * n}{60} = \frac{2 * \pi * 0.63 * 60}{60 * \pi * 40mm} = \frac{2 * 0.63}{40mm} = 31.5 \frac{rad}{s}$$

$$P_{dissipée_méc_11} = M * \omega = 0.0074 * 31.5 = 0.233W$$

Si le calcul est fait par rapport aux roues du véhicules, voici les dimensions à prendre en compte:

$$r_{roue_véhicule} = 35mm$$

Les équations deviennent:

$$M = F_{freinage} * r_{roue_véhicule} = 1.58 * 0.035 = 0.0553Nm$$

(voir tableau 7 p. 44 pour F_{freinage})

$$\omega_{12} = \frac{\omega_{11}}{7.5} = \frac{31.5}{7.5} = 4.2 \frac{rad}{s}$$

$$P_{dissipée_méc_12} = M * \omega = 0.0553 * 4.2 = 0.232W$$

Pour le 2 ième cas: Pente à 24%, roue en alu vidée, montage un aimant

Si le calcul est fait par rapport à la roue à freiner, voici les dimensions à prendre en compte:

$$P_{dissipée_méc} = M * \omega = F_{aimant} * r_{roue_à_freiner}$$

$$r_{roue_à_freiner} = 40mm, vitesse_en_m/s = 1.69$$

(voir tableau 8 p. 45 pour la vitesse).

Les équations deviennent:

$$M = F_{\text{aimant}} * r_{\text{roue}} \text{ à freiner} = 0.86 * 0.02 = 0.0172 Nm$$

(voir tableau 7 p. 44 pour F_{aimant})

$$\omega_{21} = \frac{2 * \pi * n}{60} = \frac{2 * \pi * 1.69 * 60}{60 * \pi * 40mm} = \frac{2 * 1.69}{40mm} = 84.5 \frac{rad}{s}$$

$$P_{\text{dissipée}}_{\text{méc}}_{21} = M * \omega = 0.0172 * 84.5 = 1.45 W$$

Si le calcul est fait sur par rapport aux roues du véhicules, voici les dimensions à prendre en compte:

$$r_{\text{roue}}_{\text{véhicule}} = 35mm$$

Les équations deviennent:

$$M = F_{\text{freinage}} * r_{\text{roue}}_{\text{véhicule}} = 3.69 * 0.035 = 0.129 Nm$$

(voir tableau 7 p. 44 pour F_{freinage})

$$\omega_{22} = \frac{\omega_{21}}{7.5} = \frac{84.5}{7.5} = 11.266 \frac{rad}{s}$$

$$P_{\text{dissipée}}_{\text{méc}}_{22} = M * \omega = 0.129 * 11.26 = 1.45 W$$

Tous les résultats sont très proches voir égaux.

Les vitesses de stabilisation sont estimées suivant les courbes de l'Annexe 9 : Mesures sur les prototypes.

Il y a donc une erreur sur l'estimation qui s'ajoute à celle du coefficient de frottement qui a été pris comme une moyenne, la force de frottement étant constante.

Les puissances calculées mécaniquement et électriquement ne sont donc qu'à titre indicatif.

Il est tout même possible de se rendre compte du phénomène et de comprendre que le matériaux s'échauffe, même si ce n'est que très peu dans notre cas.

En réalité, sur les poids lourds, ou sur les trains, le problème de l'échauffement est beaucoup plus conséquent: c'est justement le grand défaut de ce type de frein.

○ Elévation de la température des différentes roues

Avant de calculer l'élévation de température, il est nécessaire de savoir combien de temps chaque véhicule va faire pour parcourir le chemin prévu.

Avec la pente à disposition, le parcours peut faire jusqu'à 6m.

Mais le phénomène étant visible dès quelques centimètres, seulement la moitié du chemin utilisable sera gardé: c'est à dire 3m.

C'est aussi pour une question de ralentissement du véhicule sans le freinage à courant de Foucault. Il aura moins de vitesse et sera plus facile à ralentir au fond de la pente.

Le tableau ci-dessous répertorie les vitesses d'avance des véhicules suivant les vitesses des roues mesurées.

Le rapport de transformation est le suivant:

$$v_{\text{véhicule}} = \frac{v_{\text{stabilisation}} * d_{\text{moyen roue à freinée}}}{d_{\text{roue véhicule}} * 7.5}$$

Pente	Vitesse stabilisation [m/s] 1 aimant	Vitesse du véhicule m/s 1 aimant	Vitesse stabilisation [m/s] 2 aimants	Vitesse du véhicule m/s 2 aimants
6%				
Alu pleine	0.20	0.05	0.07	0.02
Alu vide	0.38	0.09	0.14	0.03
Laiton	0.32	0.07	0.11	0.03
12%				
Alu pleine	0.43	0.10	0.14	0.03
Alu vide	0.77	0.18	0.28	0.07
Laiton	0.63	0.15	0.23	0.05
24%				
Alu pleine	0.86	0.20	0.26	0.06
Alu vide	1.69	0.39	0.51	0.12
Laiton	1.40	0.33	0.43	0.10

Tableau 14: Vitesse d'avance du véhicule suivant l'inclinaison de la pente

Une fois la vitesse d'avance du véhicule connue, le temps de descente peut être déterminé selon la formule:

$$\Delta t = \frac{\Delta d}{v}$$

Pente	Vitesse du véhicule m/s 1 aimant	Delta t en [s] pour 1 aimant	Vitesse du véhicule m/s 2 aimants	Delta t en [s] pour 2 aimants
6%				
Alu pleine	0.046	64.77	0.016	183.67
Alu vide	0.089	33.83	0.033	91.84
Laiton	0.075	40.18	0.026	116.88
12%				
Alu pleine	0.100	29.90	0.033	91.84
Alu vide	0.179	16.79	0.065	45.92
Laiton	0.147	20.41	0.054	55.90
24%				
Alu pleine	0.201	14.95	0.061	49.45
Alu vide	0.394	7.61	0.119	25.21
Laiton	0.326	9.21	0.100	29.90

Tableau 15: Temps de descente des véhicules suivant la pente

A présent, il est possible de déterminer l'échauffement à travers les roues. La formule suivante permet de calculer l'échauffement suivant la quantité de chaleur, la puissance par unité de temps, délivrée par le système.

$$Q = m * c * \Delta T = P * \Delta t$$

Les constantes des matériaux sont les suivantes:

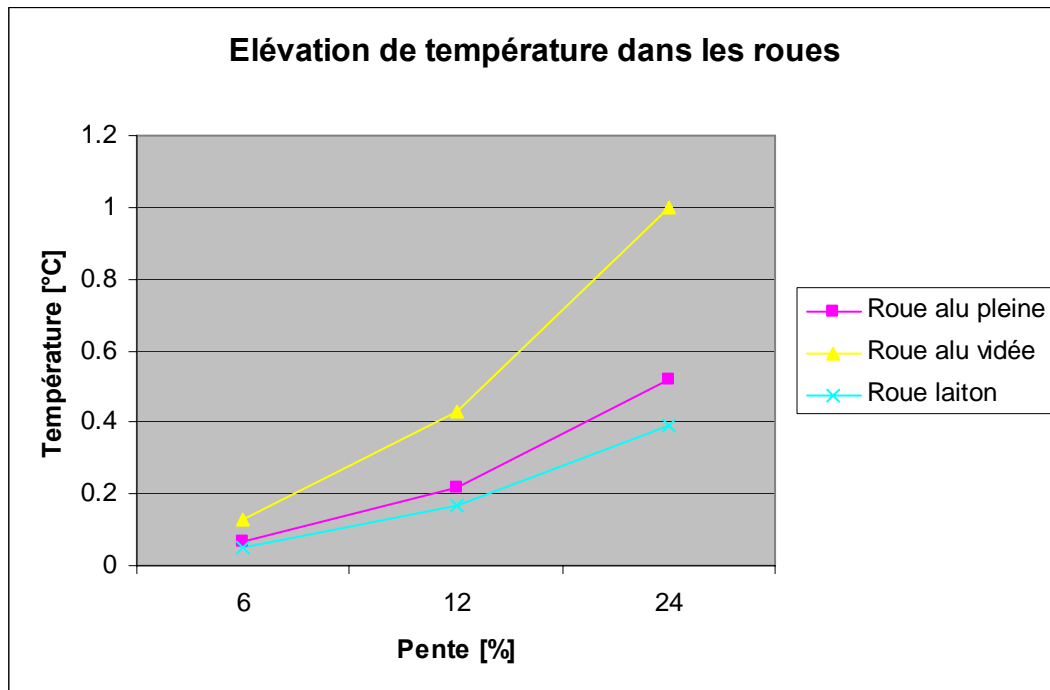
$$Masse_V_alu = 2.7 \frac{kg}{dm^3}$$

$$Masse_V_laiton = 8.6 \frac{kg}{dm^3}$$

$$Chaleur_massique_alu = 904 J \frac{kg}{K}$$

$$Chaleur_massique_laiton = 390 J \frac{kg}{K}$$

Le graphique 6 représente les élévations de température suivant les types de matériaux et les variations des pentes.



Graphique 6: Variations de la température dans les roues

L'échauffement est très faible. La plus grande élévation de température est de 1 °C.

Il est le même quelque soit le montage.

Cela est dû au fait que pour l'induction plus faible, la puissance est plus grande d'un facteur 3 que celle avec l'induction max.

A l'inverse, le temps de descente est 3 fois plus grand qu'avec la plus grande induction.

Il y a donc une annulation de ces facteurs et l'élévation de température s'avère être la même dans les deux cas.

- **Rapport entre les vitesses par rapport aux montages**

Le rapport des inductions entre le montage avec un aimant ou deux aimants est de deux. Celui des vitesses est quasiment constant mais plus grand que deux. Dans le tableau suivant, il est en moyenne de 3.

		Un aimant	Deux aimants	Rapport vitesse	Rapport induction
Pente 6%					
Roue					
	Alu pleine	0.2	0.07	2.8	1.94
	Alu vide	0.38	0.14	2.7	1.94
	Laiton	0.32	0.11	2.9	1.94
Pente 12%					
Roue					
	Alu pleine	0.43	0.14	3.1	1.94
	Alu vide	0.77	0.28	2.7	1.94
	Laiton	0.63	0.23	2.7	1.94
Pente 24%					
Roue					
	Alu pleine	0.86	0.26	3.3	1.94
	Alu vide	1.69	0.51	3.3	1.94
	Laiton	1.4	0.43	3.2	1.94

Tableau 16: Rapport des vitesses données en m/s et des inductions

Le fait d'avoir un morceau d'acier proche de la roue éloigne la source de champ magnétique que sont les aimants, voir photo 9 p.25. Cela permet aux lignes de champs de se disperser quelque peu et de ne pas toutes passer dans la roue.

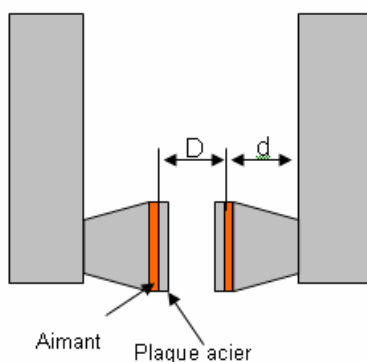


Figure 38: Montage du frein avec un seul aimant

La preuve en est que la distance D entre les aimants est plus grande que la distance d d'un aimant au bord du circuit magnétique, voir figure 43 sur la page précédente. Les lignes de champs ont donc moins de chemin à faire en passant par le circuit que dans l'air entre la roue. Voici l'analyse des deux types de montage (1 aimant et 2 aimants) par Flux2d.

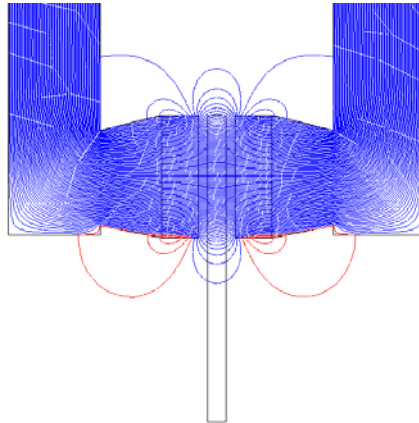


Figure 39: Lignes de champ dans le montage avec deux aimants

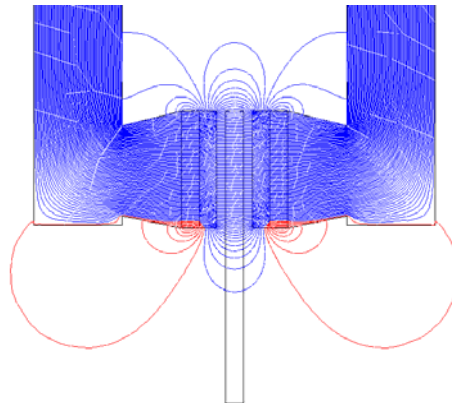


Figure 40: Lignes de champ dans le montage avec un aimant

Sur la figure 39, les lignes de champ qui se referment sur le circuit magnétique sont moins fréquentes que sur la figure 40.

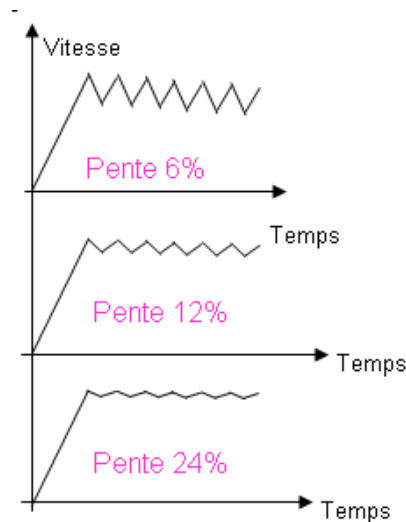
Il y a donc moins de freinage que prévu et la vitesse de stabilisation a un rapport plus grand que l'induction, comme mesuré dans le tableau 16 p. 59.

- **Oscillations des courbes de vitesses**

Le comportement des courbes devrait tendre vers une allure telle que celle présentée dans le graphique 7 ci-dessous, pour des vitesses dans la plage étudiée (faibles) .

Le freinage devient plus efficace avec la vitesse qui augmente. Donc, quand la voiture accélère, le freinage est plus efficace et elle ralentit. Après ralentissement, le frein est moins efficace, donc elle reprend de la vitesse. Et ainsi de suite jusqu'à ce qu'elle atteigne le fond de la pente.

Plus la pente est importante, moins les oscillations sont visibles car les points d'accélération et de freinage sont atteints plus rapidement.



Graphique 7: Allure prévue des courbes de vitesses

Quand l'induction est plus importante (montage avec deux aimants), ce principe est plus accentué car la force de freinage est plus grande. Il faut donc plus de temps pour que l'effet des courants de Foucault faiblisse à cause du ralentissement du véhicule.

Sur les courbes de vitesses mesurées, voir Annexe 9: Mesures sur les prototypes, ces oscillations sont tout à fait visibles. Néanmoins, elles ne sont pas aussi régulières que prévues à cause du montage des roues sur l'axe et de l'irrégularité de l'inclinaison de la pente (planches en bois pour les tests).

La partie de la roue à freiner en contact avec l'axe est petite, ce qui a rendu l'assemblage difficile. Les roues sont légèrement voilées sur l'axe, voir figure 41 de la page suivante. Il aurait fallu laisser un épaulement sur chaque côté des roues afin d'assurer une meilleure perpendicularité.

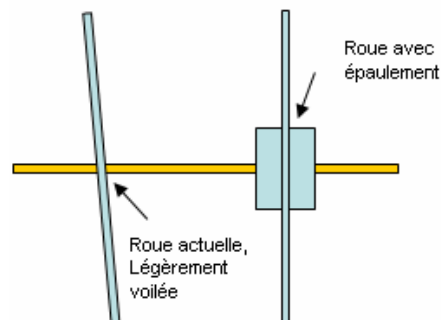
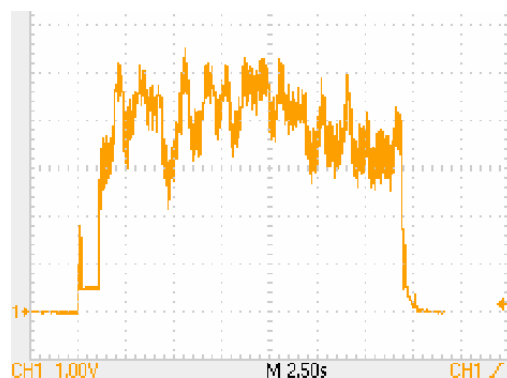


Figure 41: Montage réalisé et améliorations à effectuer

Une analyse des oscillations est faite suivant l'induction du montage.



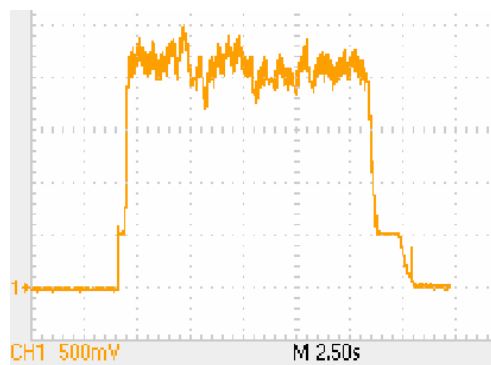
Graphique 8: Montage roue pleine alu, pente 6% et un aimant



Graphique 9: Montage roue alu pleine, pente 6%, deux aimants



Graphique 10: Montage roue pleine alu, pente 12% et un aimant



Graphique 11: Montage roue pleine alu, pente 12% et deux aimants

Les graphiques 8 et 10 montrent des oscillations plus faibles que les graphiques 9 et 11. L'induction est plus faible, donc les variations sont moins grandes. Ce même principe se voit également en prenant compte de la pente qui augmente. Les deux premiers graphes (8 et 9) ont des oscillations plus importantes que les deux figures ci-dessus car la pente est plus faible.

Sur un poids lourd ou un train, ces oscillations ne sont peut être pas visibles car les inductions et les vitesses sont bien plus importantes que celles en jeu dans ce cas présent. Les grandes oscillations présentes sur ces courbes sont dues, suivant les mesures, au voilage ou au freinage. Un calcul en Annexe 8, p. 33 et suivantes le démontre.

- **Evolution de la vitesse et de la force de freinage suivant l'augmentation de la pente**

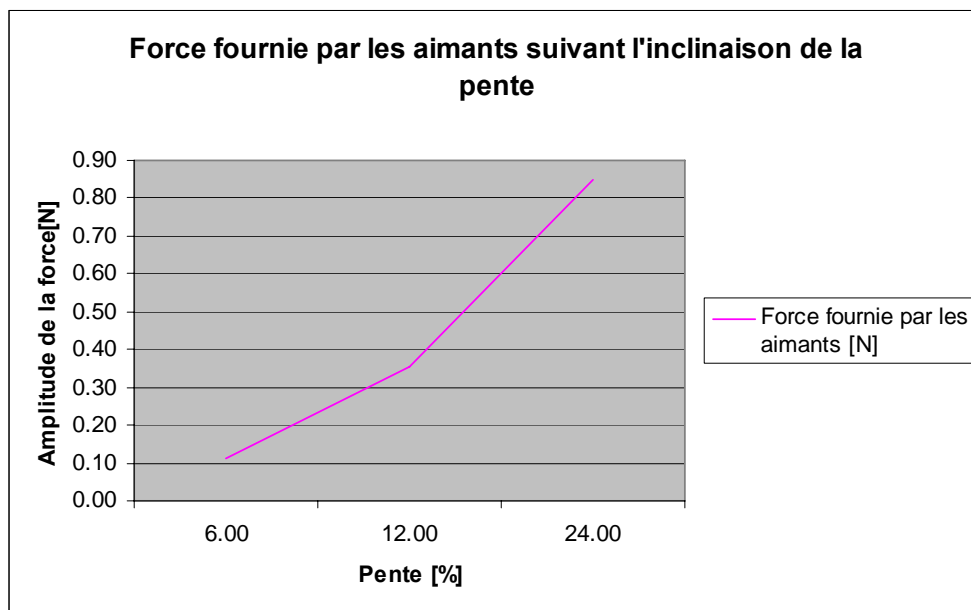
Pour un matériaux donné et une pente donnée, plus la vitesse augmente, plus la tension induite augmente et les courants induits suivent la même tendance.

Avec ces deux affirmations, la question se pose: comment varie la force des aimants, la vitesse de stabilisation en fonction de la pente??

Plus le véhicule va vite, plus la force de freinage est grande. Mais est ce que sa vitesse de stabilisation pour toutes les pentes tend vers une valeur constante?

Et bien jugez par vous-même sur les graphiques suivants.

Le premier graphique ci-dessous montre l'évolution de la force pour les inclinaisons étudiées.



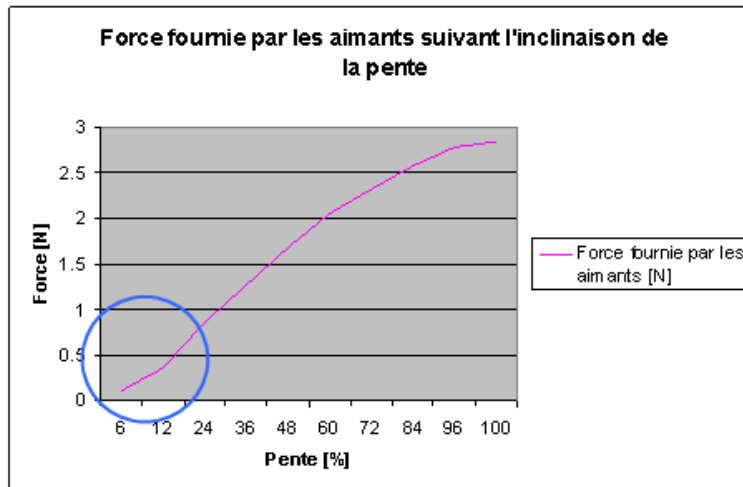
Graphique 12: Evolution de la force de freinage suivant les pentes étudiées

La courbe a une tendance linéaire sur ce graphique ci-dessus.

Il est évident que les calculs se basent sur des mesures (forces de frottement, coefficient de frottement) qui peuvent comporter des erreurs suivant l'interprétation.

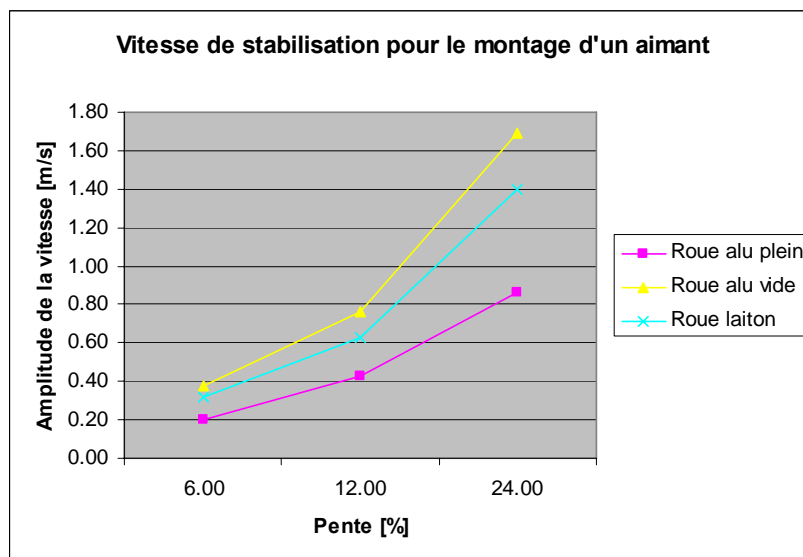
La courbe est donc à titre comparatif et explicatif.

En gardant la force de frottement constante, une extrapolation jusqu'à une pente extrême (100%) est faite sur le graphe suivant afin d'évaluer la tendance de la courbe.



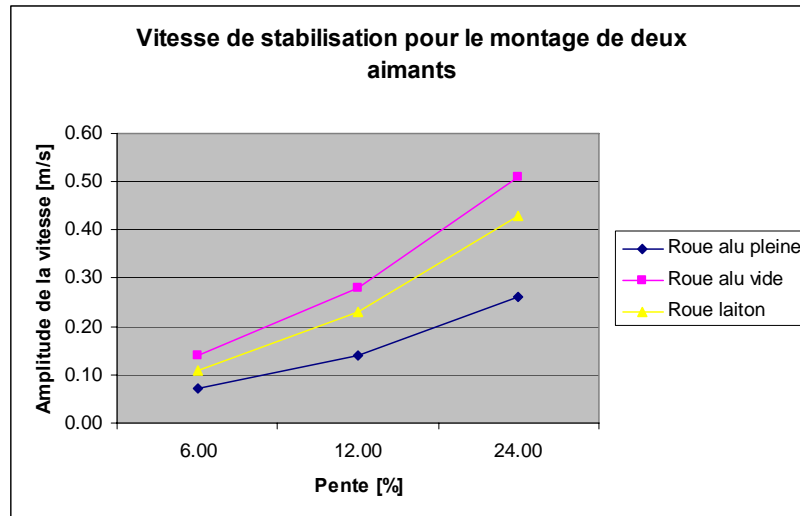
Graphique 13: Evolution de la force des aimants

A l'intérieur du cercle bleu du graphique 13 sont représentées les valeurs mesurées et étudiées. L'évolution a une tendance plus ou moins linéaire, comme prévu. Il est inutile d'évaluer une pente plus haute que 100%.



Graphique 14: Evolution de la vitesse de stabilisation pour le montage avec un aimant

En prenant l'allure du graphique 14, les vitesses de stabilisation sont plus ou moins linéaires avec la pente qui augmente. Indépendamment du montage, quelle que soit donc la puissance des aimants, les courbes ont la même tendance.



Graphique 15: Vitesse de stabilisation pour le montage avec deux aimants

Les courants induits et tensions induites ont exactement la même évolution que les vitesses de stabilisation et que la force de freinage.

C'est normal que toutes ces courbes aient les mêmes allures car toutes les valeurs obtenues le sont par calculs à part les vitesses de stabilisation.

On peut donc dire que tout est plus ou moins linéaire.

La preuve par calcul :

Pour une pente de 6%, la tension induite dans une roue en alu pleine est de 3.8mV.

Comme la pente est quasi linéaire, pour une pente de 24%, on s'attend à avoir environ :

$$Tension_induite = 4 * 3.8 = 15.2mV$$

Dans le tableau 12 p.51, la tension obtenue est de 14.2mV.

Deuxième calcul :

La pente est à 12%, le courant induit dans une roue alu vidée avec un aimant est de 53.5A.

La valeur attendue pour les même conditions avec une pente deux fois plus inclinée est de :

$$Courants_induits = 2 * 53.5 = 107A$$

Le résultat dans le tableau 11 p.50, donne une valeur de 126A.

L'erreur est un peu plus grande que pour la tension induite.

On s'aperçoit que sur toutes les courbes, une cassure à l'endroit de la pente à 12% est visible.

Il suffit que l'estimation de la vitesse stabilisée soit un peu déviée et les courbes bougent.

Mais la tendance à la linéarité est tout de même maintenue.

9. Conclusions

Le but de ce travail était de réaliser un démonstrateur électromécanique.

Le résultat est un véhicule équipé d'un frein à courant de Foucault et un deuxième bolide sans frein. Les deux lancés à même temps permettent d'évaluer le phénomène des freins à courant de Foucault.

Les roues de freinage sont interchangeable et le circuit magnétique facilement amovible.

Le cahier des charges est donc rempli.

Quelques surprises au niveau des types de matériaux ont créés des difficultés lors du montage des prototypes.

Certaines pièces étaient en matériaux ferromagnétiques et à montées proche du circuit magnétique. Il a donc fallu remplacer ces matériaux par de nouvelles pièces non ferromagnétiques.

Les différences de vitesses d'avance étant très différentes suivant les montages, un ou deux aimants et les types de roues utilisées, il a fallu prévoir des plages de résolution pour la carte électronique plus diverses.

Certaines améliorations sont évidemment possibles sur ces prototypes de démonstration.

Tout d'abord, les roues de freinage peuvent être améliorées en les usinant avec un épaulement de chaque côté afin d'éviter le voilage.

Elles pourraient également avoir des épaisseurs différentes afin d'évaluer l'efficacité d'un freinage sur ces nouvelles géométries.

Pour terminer, d'autres matériaux pourraient être utilisés pour agrandir la gamme de tests.

Les inductions à disposition ne sont pas très vastes (0.64T, 0.33T ou rien).

Un système permettant de déplacer les aimants le long de la roue à freiner serait un atout.

Une plus grande plage de valeurs d'induction serait utilisable pour plus d'essais.

Ce projet m'a permis de toucher à beaucoup de domaines comme la mécanique pour les dessins, l'électronique pour la carte, les matériaux, le magnétisme.

J'ai également pris le temps découvrir l'usinage, pas si simple, du polystyrène expansé ou plus communément appelé sagex et sa non compatibilité avec certaines colles et peintures.

Le résultat de cette découverte est la carrosserie de mes prototypes.

10. Bibliographie

- ***Notions théoriques***

http://fr.wikipedia.org/wiki/Loi_de_Lenz

<http://www.sciences.ch/htmlfr/electrodynamique/electrodynelectricite01.php>

http://www.cvgg.org/vincent/Cours_electricite_et_magnetisme/CoursElectriciteMagnetismeSansImages005.html

- ***Application et utilisations des courants de Foucault***

<http://motion-controls.global-spec.com/SpecSearch/Suppliers?QID=9733772&Comp=90&fc=1>

<http://perso.orange.fr/florent.brisou/Freinage%20organes.htm>

http://www.pourlascience.com/php/pls/article_integral.php?idn3=238

- ***Annexe 3 : Applications courants de Foucault***

<http://www.micro-epsilon.de/fr/direct-entry/by-applications/Thickness/#App134>

<http://www.beka-cookware.com/faq/index.php?l=fr#011>

<http://www.bag.admin.ch/themen/strahlung/00053/00673/03156/index.html?lang=fr>

- ***Analyses des résultats***

Fortec, Formulaire Technique, neuvième édition, Charles Pache, 1996

- ***Annexe 2 : Dimensionnement de la bobine***

http://cmi.epfl.ch/backend/wwwedep/Z5_ED_Cu_Ni__Au.htm

1. Annexe 1 : Alliages pour les aimants et applications	2
• Aimants AlNiCo : Aluminium-Nickel-Cobalt	2
• Aimants ferrite durs	2
• Aimants SmCo : Samarium-Cobalt	2
• Aimants NdFeB: Néodyme-Fer-Bor	2
2. Annexe 2 : Dimensionnement de la bobine	3
• Calculs	3
3. Annexe 3 : Applications courants de Foucault	6
• Capteurs	6
• Cuisinière à induction	7
• Le moteur à champ tournant	8
• Contrôles non destructifs	9
4. Annexe 4 : Calculs et mesures de l'induction magnétique	10
• Calculs	10
• Mesures	13
• Evolution de l'induction dans l'entrefer suivant le nombre d'aimants	14
5. Annexe 5 : Calcul de la section du circuit magnétique	15
6. Annexe 6 : Conception de la carte électronique	17
• Fréquence-tension	17
• Elévateur	21
• Capteur de vitesse	23
7. Annexe 7: Eléments commandés	24
• Roues des véhicules	24
• Roues dentées	25
• Capteur vitesse	26
• Affichage à cadran mobile	27
8. Annexe 8: Mesures sur les prototypes	28
• Conditions des tests	28
• Mesures	37
9. Annexe 9 : Mises en plan	59

1. Annexe 1 : Alliages pour les aimants et applications

Les aimants permanents peuvent avoir des alliages différents.

- ***Aimants AlNiCo : Aluminium-Nickel-Cobalt***

Cet alliage accepte un grand champ magnétique mais ce dernier n'est pas fortement encre dans l'aimant : c'est-à-dire qu'il est facile d'ôter ce champ par des systèmes démagnétisant et que cet alliage est donc sensible au choc. Il permet de travailler dans une grande plage de température.

- ***Aimants ferrite durs***

Un désavantage majeur de ces aimants est la fragilité. Ils doivent être magnétisés, donc fabriqués dans un champ magnétique. Ces aimants possèdent donc une direction préférentielle.

- ***Aimants SmCo : Samarium-Cobalt***

Cet alliage, comme le NdFeB, a une densité d'énergie jusqu'à 10 fois celles des aimants en ferrite ou AlNiCo.

Il est donc possible d'avoir des volumes beaucoup plus faibles pour une même utilisation. Leurs température d'utilisation est sensiblement plus haute que celle de l'alliage NdFeB. Le désavantage est que l'alliage est très cassant et demande donc une grande attention pour la mise en œuvre.

- ***Aimants NdFeB: Néodyme-Fer-Bor***

Température d'utilisation assez basse. Par contre, induction magnétique et champ magnétique très haut par rapport aux autres alliages.

Cet alliage demande une protection supplémentaire pour la corrosion.

Le but des aimants permanents utilisés sur le prototype est d'avoir le maximum de force pour le plus petit volume.

Suivant la feuille suivante, l'alliage adéquate est le NdFeB.

2. Annexe 2 : Dimensionnement de la bobine

L'induction maximum mesurée dans le montage est de 0.64T.

La bobine est dimensionnée pour rester dans cette gamme de valeur afin de pouvoir effectuer des mesures dans les mêmes conditions.

Pour le montage du système de freinage, les dimensions du circuit magnétique et de l'électroaimant doivent restées plus ou moins les mêmes.

La bobine de la figure 1 ci-dessous respecte les dimensions voulues: il faut donc l'intégrer au système et essayer d'obtenir la même induction qu'avec les aimants permanents.



Figure 1: Bobine à disposition

- **Calculs**

Données de base pour deux aimants de chaque cotés pour les calculs:

$L_{aimant} : 2 * 3mm * 2mm = 12mm$

$L_{entrefer} : 5mm$, 1mm entre la roue et chaque aimant

$L_{fer} :$

$\mu_0 : 4 * \pi * 10^{-7}$

$\mu_{air} : 1$

$\mu_{fer} : 3000$ (pour de l'acier 35 doux)

$B = 0.63T$, induction mesurée dans l'entrefer

Les formules à utilisées sont les suivantes:

$$R_{mtot} = \frac{L_{aimant}}{\mu_0 * \mu_r * A}$$

$$\Phi = B * A$$

$$\Theta = N * I = R_{mtot} * \Phi$$

Equation finale:

$$N * I = \left(\left(\frac{L_{fer}}{\mu_0 * \mu_{fer} * A} \right) + \left(\frac{L_{entrefer}}{\mu_0 * \mu_{entrefer}} \right) \right) * B$$

			Induction magnétique B [T]	Section [m²]	Longueur [m]	Résultat N*I
	μ air	μ fer				
	1	3000				
L entrefer A-B			0.64	1.00E-04	0.005	2507.96
L fer B-C			0.64	1.00E-04	0.015	2.51
L fer C-D			0.64	1.00E-04	0.03	5.02
L fer D-E			0.64	1.00E-04	0.04	6.69
L fer E-F			0.64	1.00E-04	0.03	5.02
L fer A-F			0.64	1.00E-04	0.015	2.51
					Total N*I	2529.70

Tableau 1: Dimensions du circuit magnétique et calcul de N*I

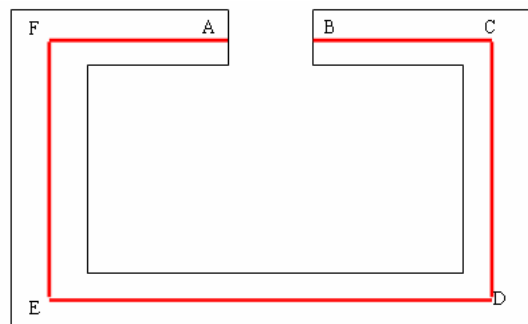


Figure 2: Schématisation du circuit magnétique pour les calculs du tableau 1

La condition que la bobine doit remplir devient donc: $N * I = 2530$

Dans la bobine, les spires de cuivre ne représentent pas la totalité de la section active de la bobine.

Il y a donc un facteur de remplissage k dont il faut tenir compte.

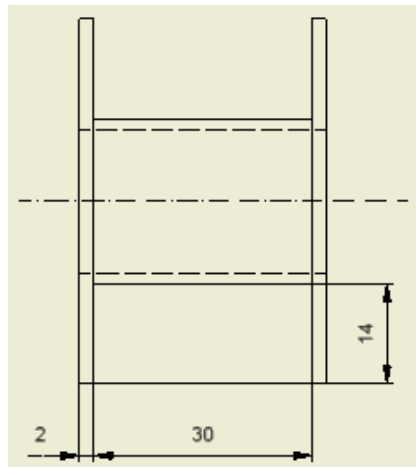


Figure 3: Dimensions de la bobine

La section de cuivre possible sur la bobine choisie devient donc:

$$A_{cu} = k * A_{active}$$

Un facteur de remplissage de 0.5 est choisis, la section de cuivre présente sera de (voir les dimensions sur la figure 3):

$$A_{cu} = 0.5 * 30mm * 14mm = 210mm^2$$

Pour du Cu standard, le courant est limité à $4 \frac{mA}{cm^2} = 4 \frac{A}{mm^2}$, les résultats sont les suivants:

$$N * I = 2530A$$

$$N * I_{à disposition} : 210 * 4 = 840A$$

La valeur est bien loin de celle qui faut pour assurer une plage équivalente d'induction magnétique entre les aimants et l'électroaimant.

L'idée de la bobine a donc été laissée de côté.

3. Annexe 3 : Applications courants de Foucault

- **Capteurs**

Les propriétés des courants de Foucault sont utilisées pour réaliser des capteurs de distance ou de mesure sans contact. Ils sont généralement constitués d'une bobine excitée à haute fréquence (200 kHz à 2MHz). Lorsqu'une pièce conductrice se trouve à proximité, l'inductance est modifiée. Une mesure de cette nouvelle inductance permet de déterminer la distance de la pièce. Le principe de mesure de la figure 4 est la combinaison d'un capteur à courant de Foucault et d'un capteur laser.

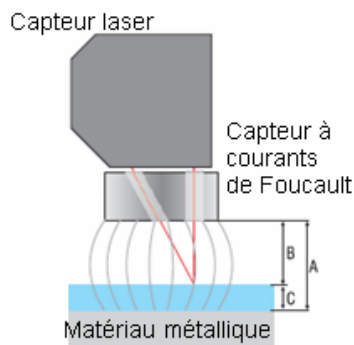


Figure 4: Détection d'un film plastique pulvérisé

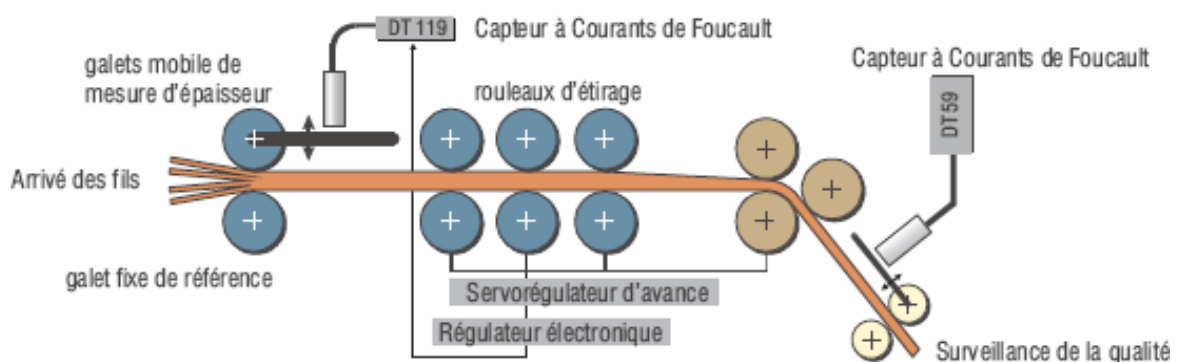


Figure 5: Détection d'une épaisseur de fil

Ces capteurs peuvent également permettre une détection d'épaisseur de toutes sortes de matériaux pour autant que ce soient des métaux ferromagnétiques.

- **Cuisinière à induction**

Les nouvelles cuisinières fonctionnent avec le principe des courants de Foucault.

Sous chaque plaque une bobine est placée: elle est similaire à un primaire d'un transformateur. Un courant à fréquence moyenne (20kHz à 100kHz) circule dans cette bobine créant un champ magnétique.

La casserole placée sur la plaque fait, elle, office du secondaire d'un transformateur: c'est un court-circuit du secondaire. Des courants s'induisent dans le fond de la casserole et chauffent ce qui s'y trouve. Le matériau de la casserole joue un rôle très important: il doit permettre aux courants de Foucault de présenter le plus de pertes possibles afin que l'intérieur de la casserole chauffe rapidement.

Les avantages sont les suivants:

- Economie d'énergie et de temps
- Plus de brûlures
- Plus d'oubli d'éteindre les plaques

Les inconvénients:

- Cuisinière plus chère à l'achat
- Casseroles et poêles spéciales

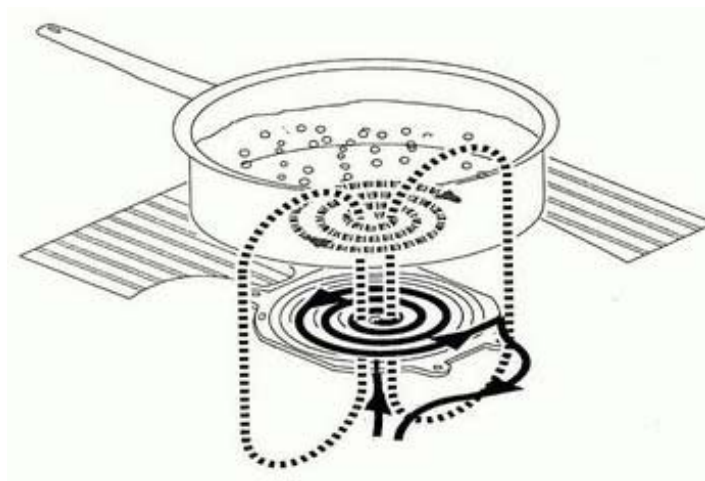


Figure 6 : Circulation des courants dans une plaque à induction

- ***Le moteur à champ tournant***

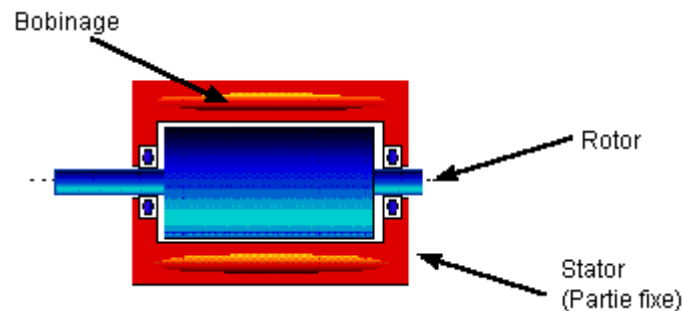


Figure 7 : Coupe d'un moteur à cage d'écureuil

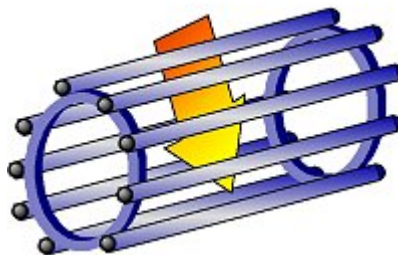


Figure 8 : Cage où les courants de Foucault circulent

Ce moteur est également appelé moteur à cage d'écureuil.

Le rotor est fait de barres d'aluminium dont les sommets sont reliés entre eux par deux anneaux conducteurs.

Le champ magnétique tournant généré par le stator traverse ces conducteurs en alu, des courants de Foucault prennent naissance et une force se crée.

Cette dernière induit donc un couple au rotor qui va tourner dans le même sens que le champ magnétique du stator, mais un petit peu moins vite.

Ce décalage est appelé glissement.

- **Contrôles non destructifs**

Ces contrôles sont effectués sur des tubes, barres, profilés.

Un bobinage de quelques spires est effectué et un courant alternatif y est injecté: des courants de Foucault sont induits dans le matériau à contrôler. Electriquement, l'équivalent de la bobine et du barreau est une impédance.

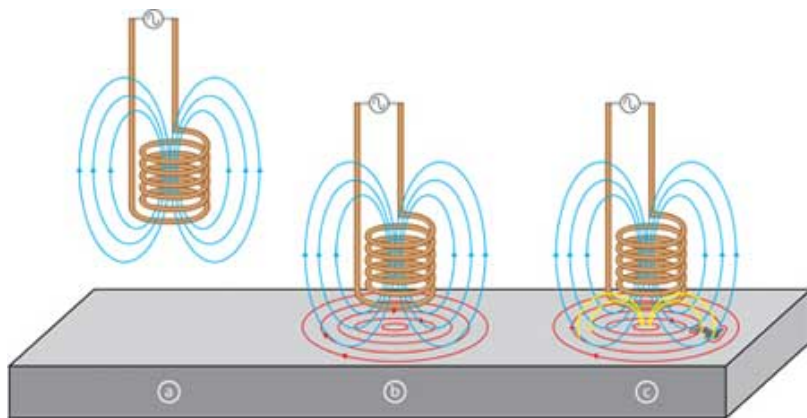


Figure 9 : Principe de contrôle par courants de Foucault

Les essais consistent à mesurer l'impédance résultante.

Si elle change, le barreau présente alors un défaut et s'il n'y a pas de changement, le barreau est sans défaut.

Ces essais fonctionnent donc seulement sur des matériaux conducteurs.

Avec ce système, il est possible de mesurer une épaisseur, des défauts dans la matière, des compositions et structures de matériaux.

Le principe de fonctionnement est le même que pour les capteurs à courants de Foucault.

4. Annexe 4 : Calculs et mesures de l'induction magnétique

Il est important de connaître l'induction régnant dans l'entrefer du montage pour évaluer les forces de freinage.

Cette valeur va être déterminée par mesure et par calcul.

• *Calculs*

Le calcul de l'induction nécessite un travail avec la courbe de magnétisation de l'alliage utilisé, en l'occurrence le NdFeB.

La longueur d'un aimant est de 3mm et la longueur de l'entrefer est de 5mm. Les calculs sont réalisés pour le montage avec soit un aimant de chaque cotés, ou bien deux.

Les formules électromagnétiques à utiliser sont les suivantes:

$$\frac{B}{H} = -\frac{1 * L_{\text{aimant}}}{Rm\partial * A_{\text{aimant}}} \quad Rm\partial = \frac{1 * L\partial}{\mu_0 * A\partial}$$

○ Deux aimants de chaque coté de la roue

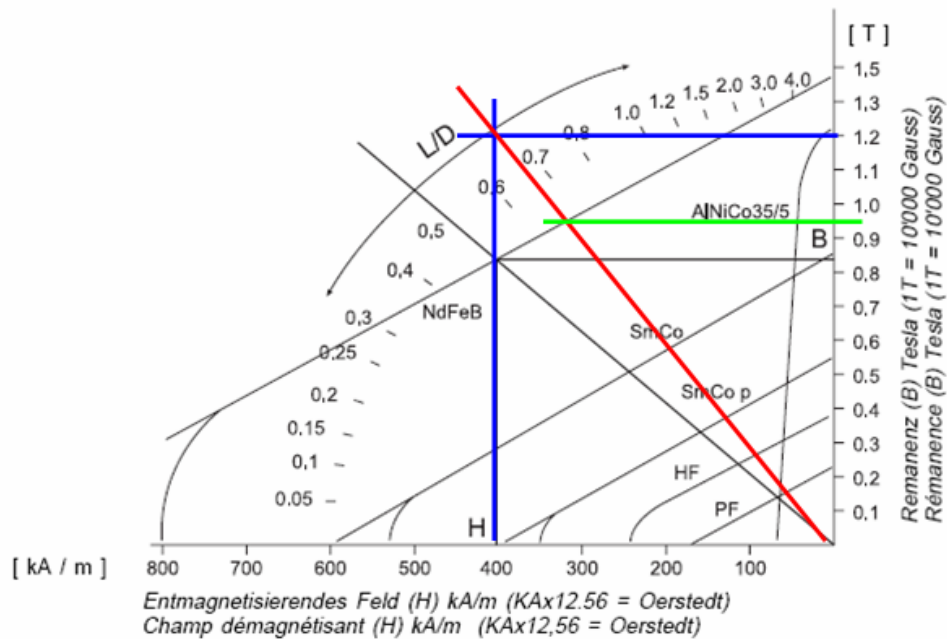
L'équation devient donc:

$$\frac{B}{H} = -\frac{\mu_0 * L_{\text{aimant}}}{L\partial} = -\frac{4 * \pi * 10^{-7} * 2 * 3mm * 2}{5mm} = 3.01 * 10^{-6}$$

En prenant un point de H quelconque sur le graphique 1 de la page suivante, par exemple $400 \frac{kA}{m}$, l'induction correspond à 1T.

Avec ce point, la droite rouge peut être tracée.

En retombant sur la courbe de l'alliage NdFeB, l'indication d'environ **0.95T** est donnée, (droite verte).



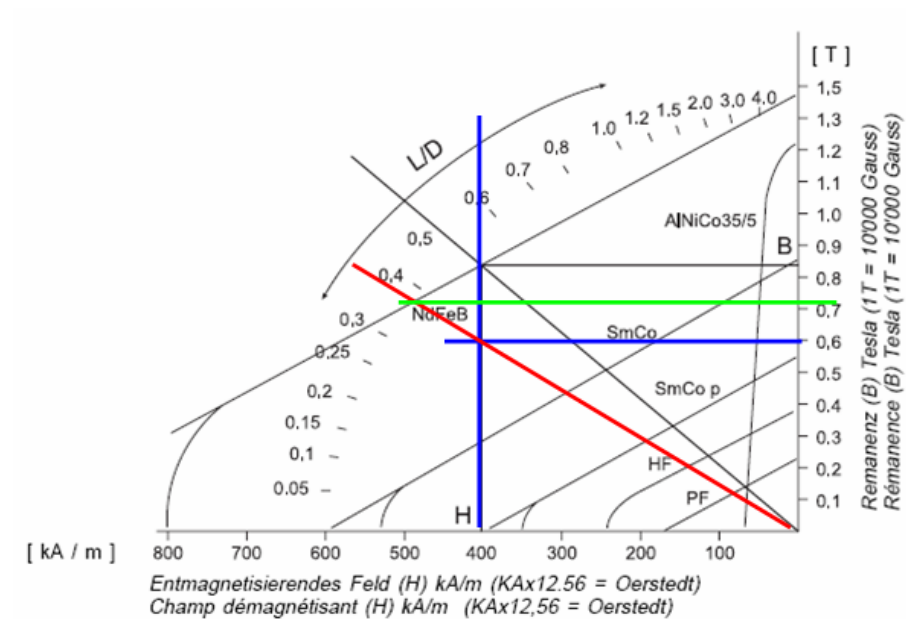
Graphique 1 : Calcul de l'induction pour deux aimants montés de chaque coté

○ Un aimant de chaque coté de la roue

L'équation devient donc:

$$\frac{B}{H} = -\frac{\mu_0 * L_{\text{aimant}}}{L\partial} = -\frac{4 * \pi * 10^{-7} * 2 * 3\text{mm}}{5\text{mm}} = 1.5 * 10^{-6}$$

En prenant un point de H quelconque sur le graphique 2, par exemple $400 \frac{\text{kA}}{\text{m}}$, l'induction correspond à 0.6T.
 Avec ce point, la droite rouge peut être tracée.
 En retombant sur la courbe de l'alliage NdFeB, l'indication d'environ **0.72T** est donnée.



Graphique 2 : Calcul de l'induction pour un aimant monté de chaque coté

- **Mesures**

La figure suivante représente la façon dont l'induction a été mesurée. Un premier circuit magnétique est monté avant d'avoir le montage réel afin d'évaluer l'induction présente dans la partie où le disque de freinage sera placé.

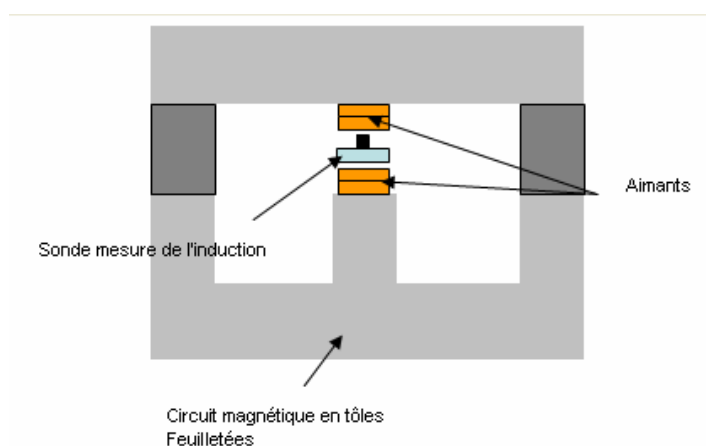


Figure 10 : Montage pour la mesure de l'induction réellement présente dans l'entrefer

L'écart de l'entrefer est le même que dans le montage final. Le circuit magnétique est en tôles feuilletées pour être le plus proche de l'acier utilisé dans le circuit final.

Les mesures effectuées dans l'entrefer sont les suivantes :

	Induction [T]
Un aimant	0.58
Deux aimants	0.7

Tableau 2 : Induction mesurée mesurées dans l'entrefer

En comparant les calculs et les mesures, ces dernières sont en dessous des valeurs calculées. Les fuites y sont prises en compte. Une erreur s'ajoute aux inductions calculées due à la lecture des graphes 1 et 2. Les valeurs gardées sont donc celles mesurées qui sont plus proches de la réalité.

	Induction mesurée [T]	Induction calculée [T]
Un aimant	0.58	0.72
Deux aimants	0.7	0.95

Tableau 3 : Inductions mesurées et calculées dans l'entrefer

- ***Evolution de l'induction dans l'entrefer suivant le nombre d'aimants***

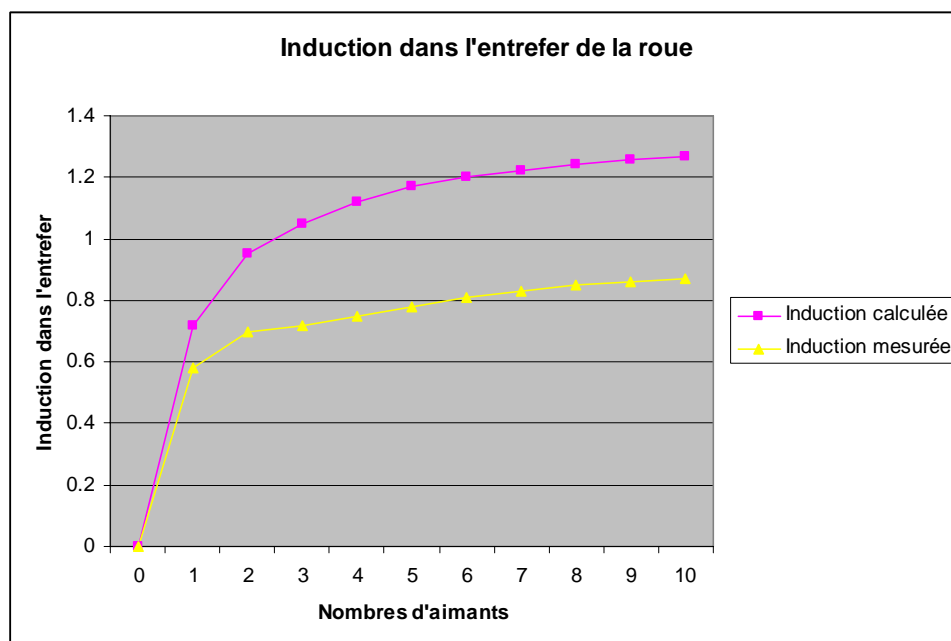
Dans le tableau 3, l'induction n'évolue pas linéairement suivant le nombre d'aimants montés en série.

Le graphique 3 ci-dessous démontre l'évolution de l'induction en fonction du nombre d'aimants posés de chaque côté de la roue.

En extrapolant suivant les deux mesures répertoriées dans le tableau 3 de la page précédente, une courbe des inductions mesurées a été établie pour trois aimants et plus. Elle n'est peut-être pas tout à fait correcte, mais donne tout de même une idée.

La formule reste toujours la même pour les calculs.

$$\frac{B}{H} = - \frac{\mu_0 * L_{\text{aimant}}}{L\phi}$$



Graphique 3 : Evolution de l'induction suivant le nombre d'aimants montés en série

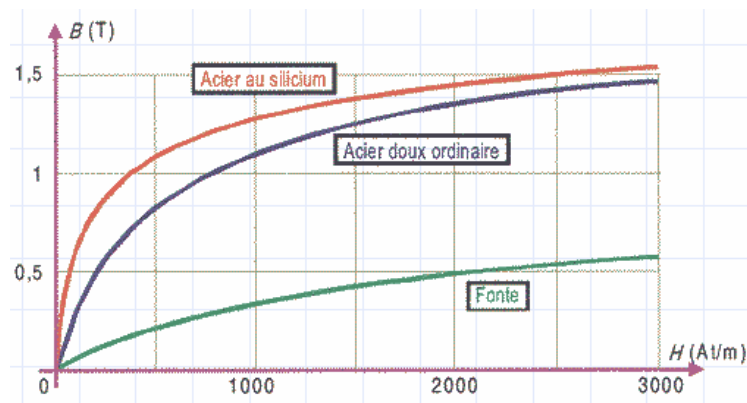
L'induction n'évolue pas du tout linéairement suivant le nombre d'aimants. Après 2 aimants, elle n'évolue que quelque peu.

C'est pour cette raison que le montage final est étudié avec 2 aimants au maximum

5. Annexe 5 : Calcul de la section du circuit magnétique

Le montage final dispose d'un entrefer de 5mm. Suivant la courbe de saturation magnétique de l'alliage d'acier du circuit magnétique, il est possible de déterminer les dimensions optimales du circuit.

Comme le montre l'image ci dessous, la saturation de l'acier utilisé se situe aux environs de 1.4T.



Graphique 4 : Courbe de saturation magnétique pour certains types d'aciers

Pour dimensionner la section du circuit, il faut connaître le flux qui circule dans celui-ci. Dans le pire des cas, les valeurs max à prendre sont celles-ci :

$$A_{\text{aimant}} : 20\text{mm} * 20\text{mm}$$

$$B_{\text{aimant}} : 0.7\text{T}$$

Le flux étant le même dans les aimants que dans le circuit magnétique, l'équation devient :

$$\Phi = A_{\text{aimant}} * B_{\text{aimant}} = A_{\text{circuit}} * B_{\text{acier}}$$

Suivant le graphique 4 ci-dessus, l'acier utiliser sera de l'acier doux au silicium et sature à environ 1.4T.

La section du circuit devient :

$$A_{\text{circuit}} = \frac{A_{\text{aimant}} * B_{\text{aimant}}}{B_{\text{acier}}} = \frac{20\text{mm} * 20\text{mm} * 0.7}{1.4} = 200\text{mm}^2$$

Cette section est donc la plus petite possible pour éviter une saturation du fer.
En gardant des dimensions carrées, une section de 15mm * 15mm est choisie.
La section du circuit magnétique pourrait être gardée à 20mm*20mm qui est la section des aimants. Mais pour une question de poids, elle est diminuée.

La partie qui suit les aimants doit garder la même dimension que les aimants pour pouvoir diriger tout le flux jusqu'à la section plus petite. Une réduction est donc obligatoire.
L'allure du montage est le suivant :

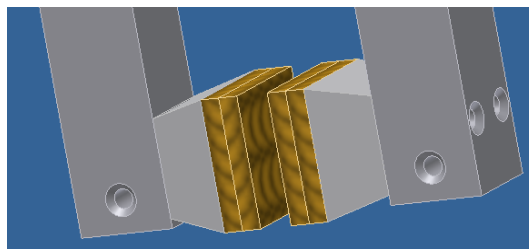


Figure 11 : Réduction prévue pour le changement de section

6. Annexe 6 : Conception de la carte électronique

Le circuit électronique doit être indépendant et donc alimenté par batteries. A disposition, 4*1.2V, 1800Ah pour l'alimentation.

- **Fréquence-tension**

Le disque fixé sur l'axe, voir photo 1 ci-dessous, possède 25 trous.
Pour un tour, 25 impulsions sont donc délivrées en sortie du capteur optique alimenté en 5V.
L'alimentation du capteur est faite par les batteries.



Photo 1: Disque à trous intégré sur l'axe de la roue à freiner

Ensuite, cette fréquence de sortie doit être transformée en tension de 0V à 8V pour être affichée sur un voltmètre.

La fréquence de sortie dépend de la vitesse du véhicule. Cette vitesse doit être estimée afin de dimensionner le circuit de conversion.

La vitesse est estimée à $1 \frac{m}{s}$.

Les calculs suivants permettent de déterminer la fréquence de sortie du capteur optique suivant la vitesse d'avance du véhicule.

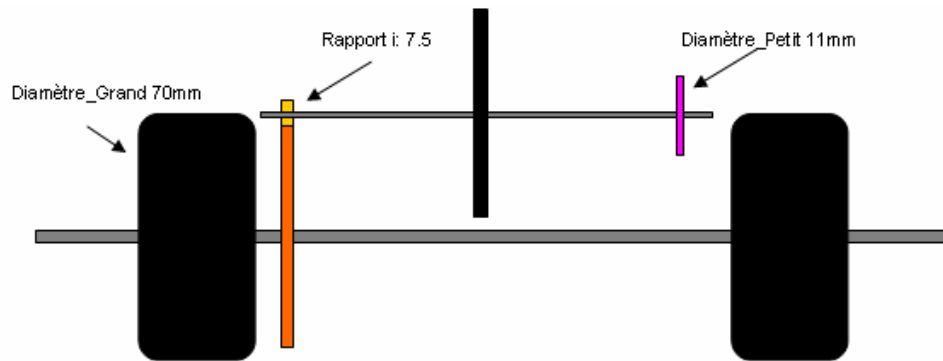


Figure 12 : Dimensions des roues du montage et rapport entre les deux roues dentées

La figure 12 représente les éléments et leurs dimensions utilisées dans les calculs suivants.

○ Calculs

Données de base pour les calculs :

$$R_Grand = 35mm$$

$$R_Petit = 5.5mm$$

$$v_véhicule = 1 \frac{m}{s}$$

$$nbr_trous = 25$$

$$i = 7.5$$

Estimation de la fréquence de sortie :

$$w_grand_axe = \frac{v_véhicule}{R_Grand} = \frac{1}{35mm} = 28.57 \frac{rad}{s}$$

$$w_petit_axe = w_grand_axe * i = 28.57 * 7.5 = 216 \frac{rad}{s}$$

$$v_disque_à_trous = w_petit_axe * R_Petit = 216 * 5.5mm = 1.18 \frac{m}{s}$$

$$Nbr_tours_en_1s = \frac{1.18}{11mm * \pi} = 34.2tours$$

$$F_out = Nbr_tours_en_1s * nbr_trous = 34.2 * 25 = 855Hz$$

Si l'estimation de la vitesse est trop basse et que le véhicule roule deux fois plus vite, $2\frac{m}{s}$, la fréquence de sortie est doublée. Cette vitesse augmenterait la plage de fréquence à environ 1800Hz.

Pour avoir de la marge, la plage de fréquence est montée jusqu'à 2kHz.

Les données définitives deviennent :

Plage de vitesse couverte : 0-2m/s
Plage de fréquence de sortie couverte : 0-2kHz

L'élément qui convertit la fréquence en tension est le suivant :

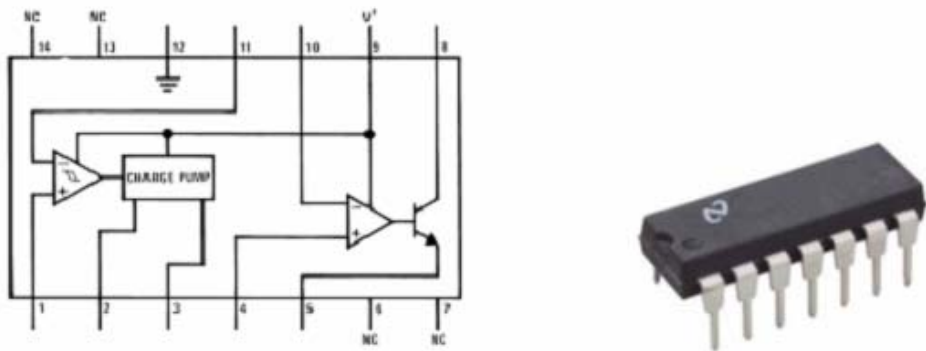


Figure 13 : Convertisseur F to U LM2907 et son schéma interne

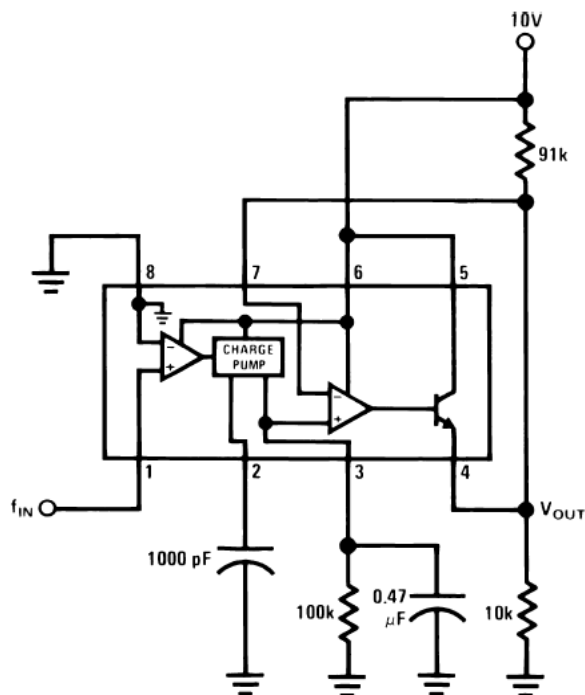


Figure 14 : Montage réalisé pour la conversion de fréquence en tension

Une formule pour tous les types de circuits permet de déterminer la tension de sortie du montage suivant les valeurs des éléments C1 (1000pF) et R1 (100k), voir figure 14 page précédente.

$$U_{out} = V_{cc} * F_{in} * R1 * C1$$

La tension d'alimentation Vcc est de 10V. Un élévateur a donc été intégré pour l'alimentation du circuit. Sa description succincte se trouve dans les pages suivantes.

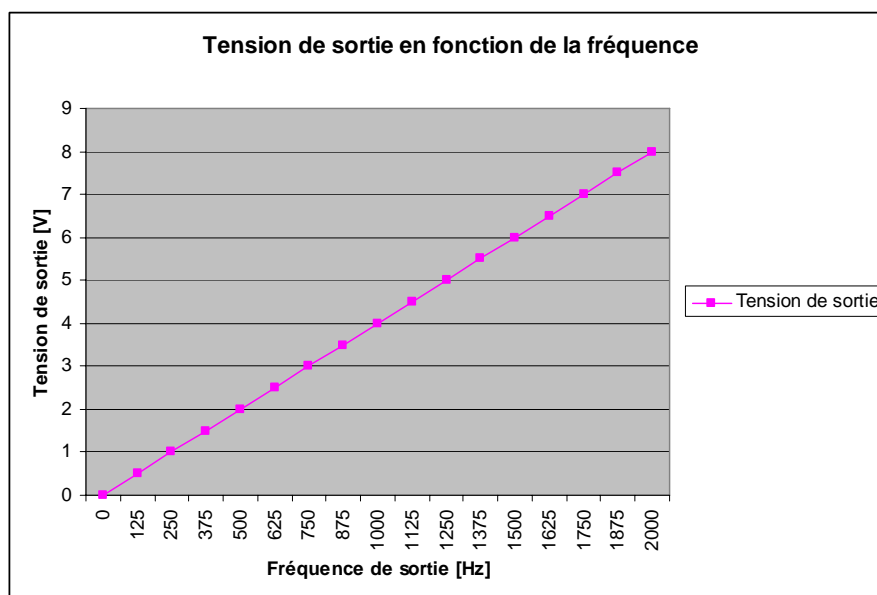
Pour R1=100k, un C1 de 4nF doit être monté pour travailler dans la plage de fréquence de 0 à 2kHz.

Dans la série de condensateurs à disposition, la valeur de 4nF n'existe pas. Un condensateur de 4.7nF sera monté à la place. L'ajustement pour avoir le bon gain demande une valeur de R1 de 85k. Les éléments définitifs sont donc les suivants :

$$C1 = 4.7nF, R1 = 85k\Omega$$

La tension maximum que peut délivrer le circuit est de 8V. Le rapport fréquence-tension donne 1V=250Hz.

Le graphique ci-dessous répertorie les valeurs de tension suivant la fréquence de sortie du capteur de vitesse.



Graphique 5 : Tension de sortie du circuit suivant la fréquence d'entrée

- **Elévateur**

L'élévateur choisi est le suivant :

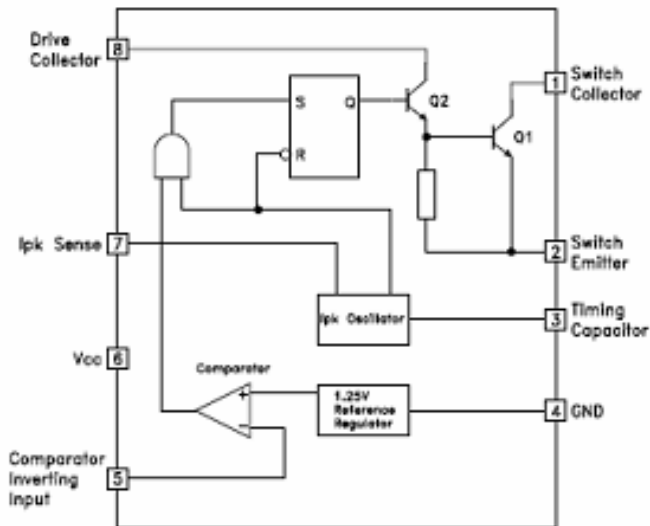


Figure 15 : Elévateur MC34063A et son schéma interne

Le montage réalisé pour élever la tension de 4.8V jusqu'à 10V est le suivant :

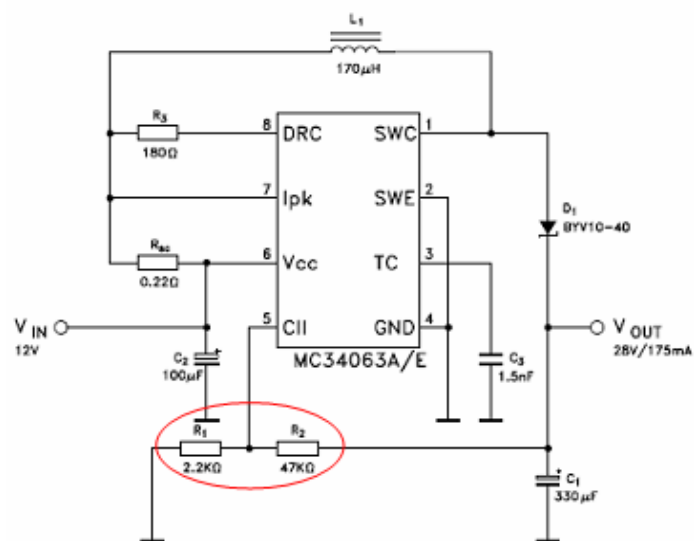


Figure 16 : Montage réalisé pour l'élévation de la tension

○ Calculs

Le pont R1 et R2, dans le cercle rouge de la figure 16 de la page précédente, fixe la tension de sortie et la tension de référence de 1.25V (point milieu) demandée pour le fonctionnement correcte de l'élevateur. La tension d'entrée Vin peut se situer entre 3V et 40V et la tension Vout est donc de 10V.

L'équation qui détermine les deux résistances est :

$$V_{out} * \frac{R1}{R1 + R2} = 1.25$$

$$R1 = 0.125 * (R1 + R2)$$

Avec la série de résistances à disposition, voici les valeurs choisies :

$$R1 = 4.7k\Omega, R2 = 33k\Omega$$

Tous les autres éléments sont les mêmes que sur la figure 16 page précédente.
Sur le PCB, une prise BNC et des bornes de sorties sont intégrées pour effectuer des mesures à l'oscilloscope et amener la tension de sortie de 0V à 8V sur un voltmètre 0-10V, voir la photo ci-dessous.



Photo 2: Voltmètre 0-10V monté sur l'arrière des deux véhicules

- **Capteur de vitesse**

Les deux trains d'impulsions ne sont pas utilisés: un seul suffit.

Pour chaque tour de la roue, 25*2 impulsions sont délivrées sur la carte électronique parce qu'il y a deux canaux en quadrature, voir figure 17.

Sur la photo 4, le câble plat servant à l'alimenter et amener les informations sur la carte se trouve sur la droite.

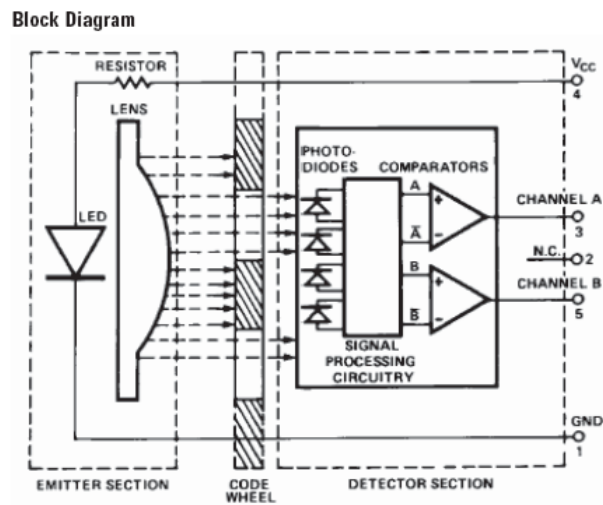


Figure 17 : Diagramme bloc du codeur

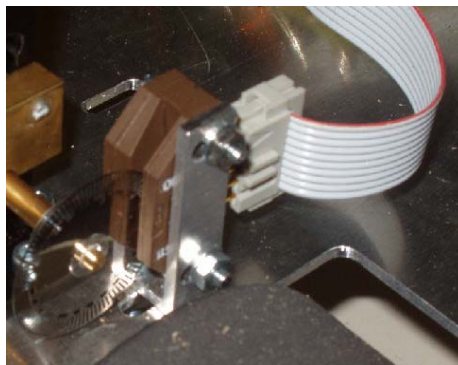


Photo 3: Capteur de vitesse et disque perforé

7. Annexe 7: Eléments commandés

- **Roues des véhicules**



Photo 4 : Roues en mousse

No d'article : 227818 - 62

14,95 EUR par paire

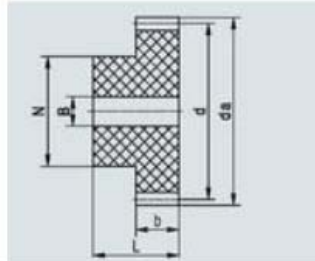
Felgen-Mitnehmer:	12 mm Sechskant
Reifenbreite:	43 mm
Reifen-Ø:	70 mm
Reifen:	Moosgummi
Inhalt:	1 Paar
Felgen-Farbe:	Weiß
Maßstab:	1:10

Tableau 4 : Caractéristiques des roues en mousse

Adresse fournisseur:

Conrad
 Alte Dübendorferstrasse 17
 8305 Dietlikon
 Tel. 0848/80 12 84
 Fax. 044/805 35 14
 filiale.dietlikon@conrad.ch

- **Roues dentées**



Modul 0,7		b = 5						
Type No.	Zähne/dents	d	da	N	b	L	B-H8	
DG 712 N	12	8.4	9.8	6	5	11	3	
DG 713 N	13	9.1	10.5	7	5	11	3	
DG 714 N	14	9.8	11.2	8	5	11	3	
DG 715 N	15	10.5	11.9	8	5	11	3	
DG 772 N	72	50.4	51.8	20	5	13	6	
DG 775 N	75	52.5	53.9	20	5	13	6	
DG 780 N	80	56.0	57.4	20	5	13	6	
DG 785 N	85	59.5	60.9	20	5	13	6	
DG 790 N	90	63.0	64.4	20	5	13	6	
DG 796 N	96	67.2	68.6	25	5	13	8	
DG 7100 N	100	70.0	71.4	25	5	13	8	
DG 7120 N	120	84.0	85.4	25	5	13	8	

Figure 18 : Tableau des dimensions des roues, en vert celles commandées

Prix unitaire : 10.40 FR pour le DG 712N
25.20 FR pour le DG 790N

Adresse fournisseur :

Nozag AG
Pünten 4
Postfach
8602 Wangen b.Düibendorf
Tél : 044 / 805.17.17
Fax : 044 / 805.17.18

- **Capteur de vitesse**



Photo 5 : Capteur incrémental et roues codeuses

No. d'article: 1161119

Prix unitaire : 64.55 FR

Description :

ENCODER, 2CH 11ROP 100CPR 3MM
Durchmesser, Welle:3mm
Kanäle, Zahl der:2
Lebensdauer, Rotations-:100
Spannung, Versorgung:5V
Temperatur, Betriebs- max.:100°C
Temperatur, Betriebs- min.: -40°C

Adresse fournisseur:

Farnell AG
Brandschenkestr.178
Postfach 1703
8027 Zürich
Phone: 044 204 64 64
Fax: 044 204 64 54
www.farnell.ch

- **Affichage à cadran mobile**



Photo 6 : Affichage de la tension

Numéro d'article : 900472,
 Prix unitaire : 30.13 FR

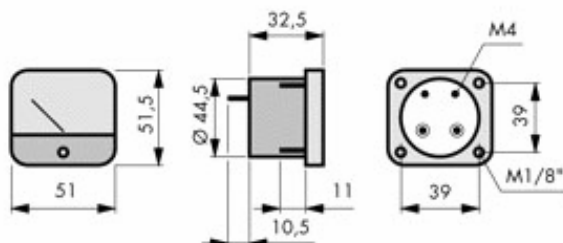


Figure 19 : Dimensions du voltmètre

Adresse fournisseur :

Distrelec
 Grabenstrasse 6
 Postfach
 CH-8606-Nänikon
 Phone: 044.944.99.22
 Fax: 044.944.99.88

8. Annexe 8: Mesures sur les prototypes

Afin d'évaluer l'efficacité des freins à courants de Foucault, les véhicules sont lancés sur une pente dont l'inclinaison varie.

Les courbes de vitesse ont été mesurées suivant les conditions suivantes.

- **Conditions des tests**

- **Principe**

Lorsque la voiture descend, quand il y a le frein à courant de Foucault, la vitesse se stabilise lorsque la force de freinage et celle de frottement compense la force F_t .

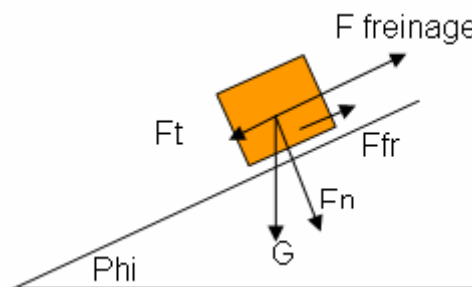


Figure 20 : Forces agissant sur le mobile

La force de frottement ne change pas lorsque la pente varie, c'est donc la force créée par les aimants qui compense la variation.

Cela entraîne des vitesses de stabilisation différentes suivant les inclinaisons étudiées et les différents montages.

- **Matériel et essais**

Sur le site de Telma, grand fournisseur de freins à courants de Foucault, une information sur l'efficacité des freins est présente. Depuis juillet 1993, une nouvelle réglementation est imposée: "A pleine charge, il faut pouvoir stabiliser la vitesse (sans l'aide des freins) à 30 km/h sur une pente à 7% longue de 6 km".

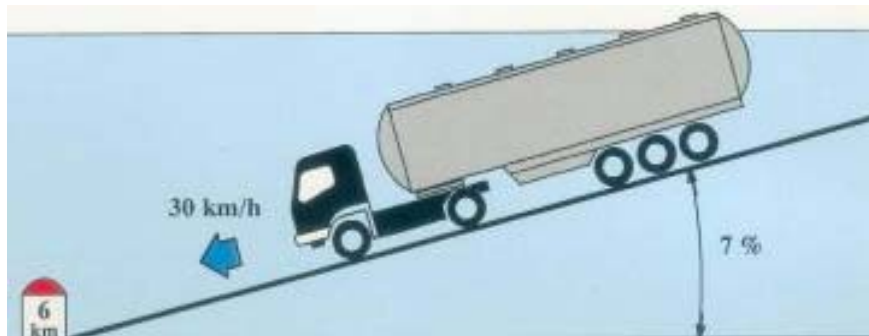


Figure 21 : Réglementation pour les freins à courants de Foucault

La démonstration lors des portes ouvertes s'effectuera sur une pente de 12% fixe. Les tests ont donc été effectués sur des pentes différentes plus grandes et plus faibles, soit:

- 6%
- 12%
- 24%

La pente est représentée par deux planches en bois longues de 4m pour les essais. Un oscilloscope est relié à la sortie de la carte électronique afin d'enregistrer les variations de tensions proportionnelles à la vitesse du véhicule.

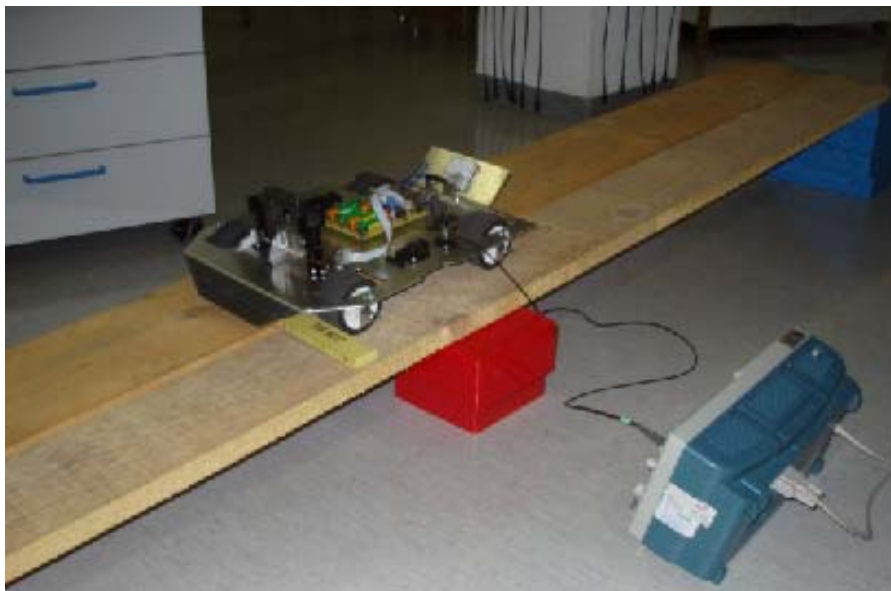


Photo 7 : Rampe de test

○ Transformation vitesse tension

La fréquence et la tension sont liées suivant la formule mentionnée en p. 20.

Mais la plage de fréquence sera différente suivant les tests car le véhicule ne roulera pas toujours à la même vitesse.

La résistance R étant fixée à $85k\Omega$, l'élément à varier reste le condensateur pour que la vitesse soit toujours visible sur le voltmètre entre 0 et 8V.

Il peut être alors interchangeable sur la carte, il est donc monté sur deux supports. (voir photos ci-dessous).



Photo 8 : Carte électronique final et le condensateur dans le cercle rose



Photo 9 : Emplacement du condensateur interchangeable et son support

Dans les tableaux suivants, les conversions pour la lecture du voltmètre et de l'oscilloscope suivant la vitesse du véhicule sont données.

Freiné			Résolution en m/s par V		Résolution en m/s par V		Résolution en m/s par V
1 aimant		Alu pleine		Alu vidée		Laiton	
	Pente (%)						
	6	1 et 2	0.063	3 et 4	0.063	5 et 6	0.063
	12	21 et 22	0.063	23 et 24	0.138	25 et 26	0.138
	24	27 et 28	0.138	29 et 30	0.294	31 et 32	0.294
2 aimants							
	Pente (%)						
	6	9 et 10	0.014	11 et 12	0.063	13	0.063
	12	14 et 15	0.063	16 et 17	0.138	18 et 19	0.138
	24	33 et 34	0.138	35 et 36	0.294	37	0.294
Pas Freiné							
	Pente (%)		m/s par V				
	6	7 et 8	0.92				
	12	20	0.92				
	24	38	1.38				

Tableau 5 : Numérotation des mesures et de leur résolution

Ensuite, pour chaque résolution différente, un condensateur différent est utilisé. Le tableau ci-dessous répertorie les plages de fréquences et les valeurs affichées sur le voltmètre suivant la capacité utilisée.

Valeur de R	Valeur de C	Fréquence Hz à 8V	Vitesse (m/S) à 8V	Fréquence Hz à 4V	Vitesse (m/S) à 4V	m/s par V affiché (résolution)
8.50E+04	1.00E-09	9412	11.04	4706	5.519	1.380
	1.50E-09	6275	7.36	3137	3.680	0.920
	4.70E-09	2003	2.35	1001	1.174	0.294
	1.00E-08	941	1.10	471	0.552	0.138
	1.50E-08	627	0.74	314	0.368	0.092
	2.20E-08	428	0.50	214	0.251	0.063
	3.30E-08	285	0.33	143	0.167	0.042
	4.70E-08	200	0.23	100	0.117	0.029
	1.00E-07	94	0.11	47	0.055	0.014
	1.50E-07	63	0.07	31	0.037	0.009
	4.70E-07	20	0.02	10	0.012	0.003

Tableau 6 : Résolution du voltmètre suivant la fréquence du capteur et des valeurs de condensateurs

○ Hypothèses

La première hypothèse est de ne pas négliger les forces de frottements pour les calculs. Il sera peut être possible de ne pas les prendre en compte après évaluation de leur grandeurs.

La deuxième hypothèse se fait sur les courants de Foucault à l'intérieur de la roue à freiner. Il est difficile d'imaginer le chemin pris par ces derniers dans la zone où le champ magnétique traverse la roue. De ce fait, la supposition que ces boucles de courants restent, pour la majorité d'entre elles, dans la section de l'aimant est gardée pour les calculs.

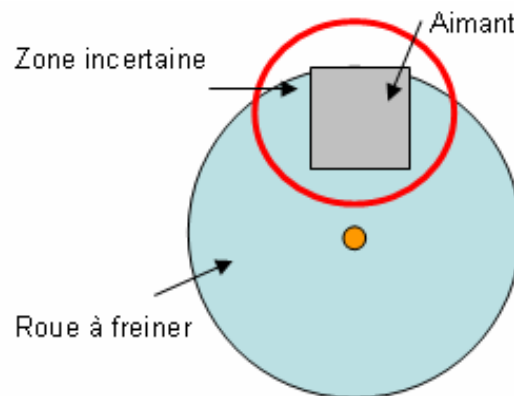


Figure 22: Zone des courants de Foucault incertaine

○ Voilage

Les calculs ci-dessous prouvent que les grandes oscillations sont dues au freinage et au voilage également.

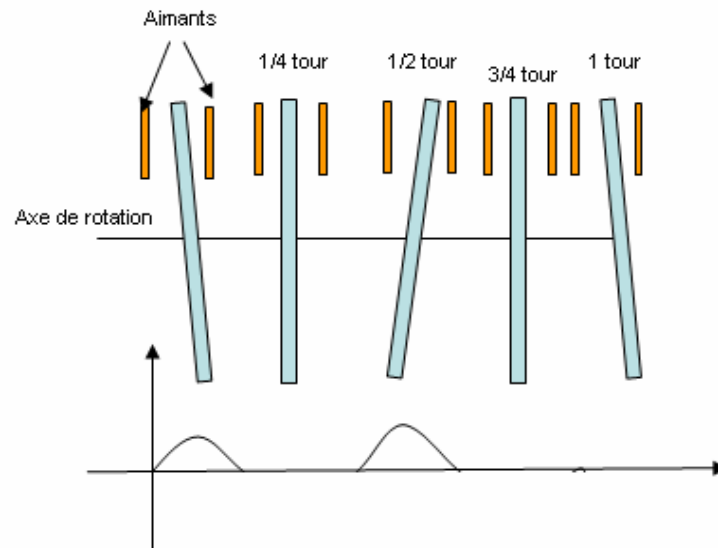


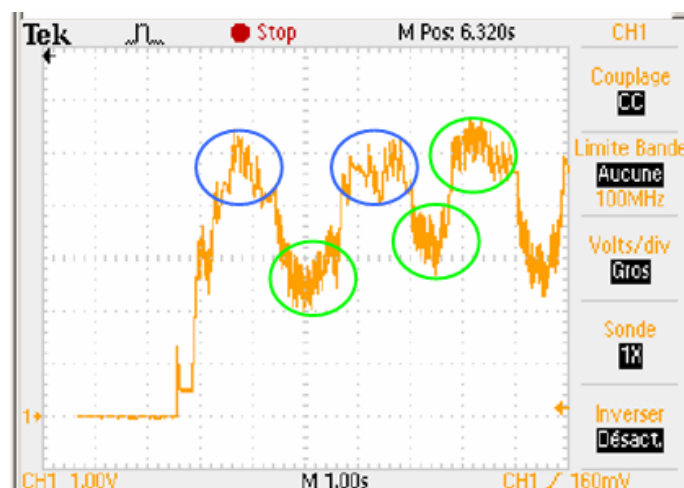
Figure 23: Tour d'une roue voilée et impulsions correspondantes

En supposant qu'une roue voilée tourne selon la figure 23, les deux oscillations correspondent à une augmentation des courants de Foucault: la roue se rapproche des aimants, donc plus d'induction, plus de courants, plus de force, plus de freinage.

Pour voir si l'on peut détecter ces oscillations dans les mesures prises il faut connaître leur fréquence d'apparition.

Trois cas sont étudiés afin d'essayer de détecter l'origine de ces perturbations.

Premier cas



Graphique 6: Vitesse de stabilisation pour un montage avec deux aimants, pente à 6% et roue alu pleine

Dans ce premier cas, la roue à freiner avance à 0.07m/s, (voir tableau 8 p.46 du Rapport). Le nombre de tours par seconde est donc de :

$$\frac{v}{\pi * d_{moyen}} = \frac{0.07}{\pi * 0.04} = 0.55 \frac{tr}{s}$$

Le nombre d'oscillations dans une seconde est donc de :

$$impulsions = 2 * n \frac{tr}{s} = 2 * 0.55 = 1.1$$

$$temps_impulsions = \frac{1s}{impulsions} = \frac{1}{1.1} = 909ms$$

Donc, dans le graphique 6, il faudrait que chaque 900ms, il y ait une impulsion pour que le voilage soit visible.

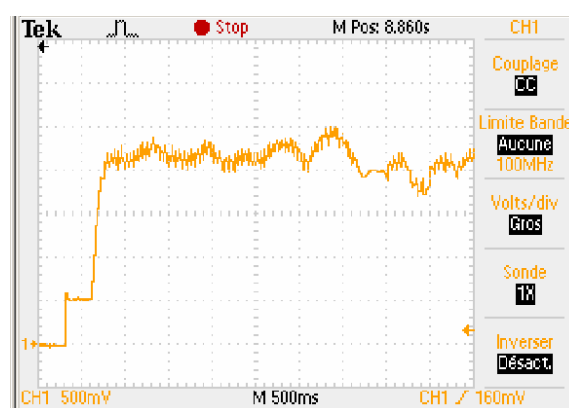
Les grandes oscillations sont présentes environ toutes les 2 secondes environ.

Dans ce cas, elles ne sont pas dues à la non perpendicularité du montage mais au freinage.

Les autres petites irrégularités ne sont pas constantes. Parfois très rapprochées (cercles verts) et parfois plus espacées (cercles bleus), il est difficile des les liées au voilage du système.

Certainement des perturbations sur le signal.

Deuxième cas



Graphique 7: Vitesse de stabilisation pour un montage avec deux aimants, pente à 12% et roue alu pleine

Dans ce deuxième cas, la roue à freiner avance à 0.14m/s.

Le nombre de tours par seconde est donc de :

$$\frac{v}{\pi * d_{moyen}} = \frac{0.14}{\pi * 0.04} = 1.11 \frac{tr}{s}$$

Le nombre d'oscillations dans une seconde est donc de :

$$impulsions = 2 * n \frac{tr}{s} = 2 * 1.11 = 2.22$$

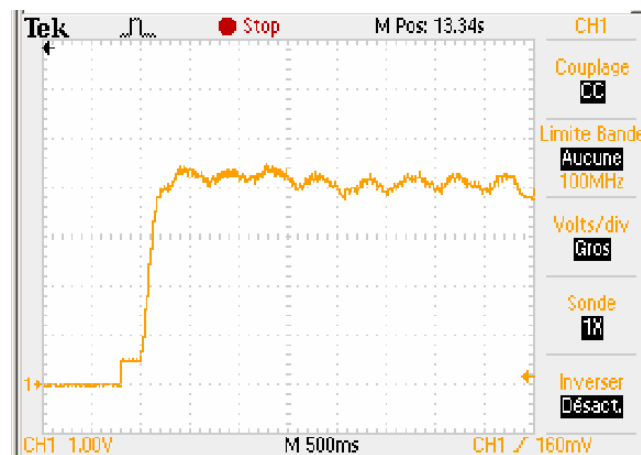
$$temps_impulsions = \frac{1s}{impulsions} = \frac{1}{2.22} = 450ms$$

Donc, dans le graphique 7, il faudrait que chaque 450ms, il y ait une impulsion pour que le voilage soit visible.

Les grandes oscillations sont présentes toutes les 400 à 500 millisecondes environ.

Il est clair que dans ce cas, elles sont dues au voilage et également au freinage.

Troisième cas



Graphique 8: Vitesse de stabilisation pour un montage avec deux aimants, pente à 24% et roue alu pleine

Dans ce deuxième cas, la roue à freiner avance à 0.26m/s.

Le nombre de tours par seconde est donc de :

$$\frac{v}{\pi * d_{moyen}} = \frac{0.26}{\pi * 0.04} = 2.07 \frac{tr}{s}$$

Le nombre d'oscillations dans une seconde est donc de :

$$impulsions = 2 * n \frac{tr}{s} = 2 * 2.07 = 4.15$$

$$temps_impulsions = \frac{1s}{impulsions} = \frac{1}{4.15} = 240ms$$

Maintenant, sur le graphique 8, il faudrait que chaque 240ms, il y ait une impulsion pour que le voilage soit visible.

Les grandes oscillations sont présentes toutes les 400 à 500 millisecondes environ.

Dans ce troisième cas, ces impulsions dues au voilage ne sont pas visibles.

Ce voilage induit donc bien des impulsions sur la mesure de vitesse. Mais tout dépend du contexte dans lequel sont faites les mesures.

Apparemment, pour les vitesses faibles et rapides, ces oscillations dues au voilage ne sont pas visible. A l'inverse, pour les vitesses moyennes, comme le deuxième cas, ces impulsions sont bien visibles.

La plage de vitesses entre 0.11m/s et 0.2m/s permet de visualiser ces impulsions, au delà, elles ne sont plus décelables.

- **Mesures**

Les courbes de vitesses suivantes sont les résultats des tests avec toutes les options possibles: toutes les pentes choisies avec toutes les roues prévues.

Les symboles ci-dessous sont choisis pour désigner de quel test il s'agit:

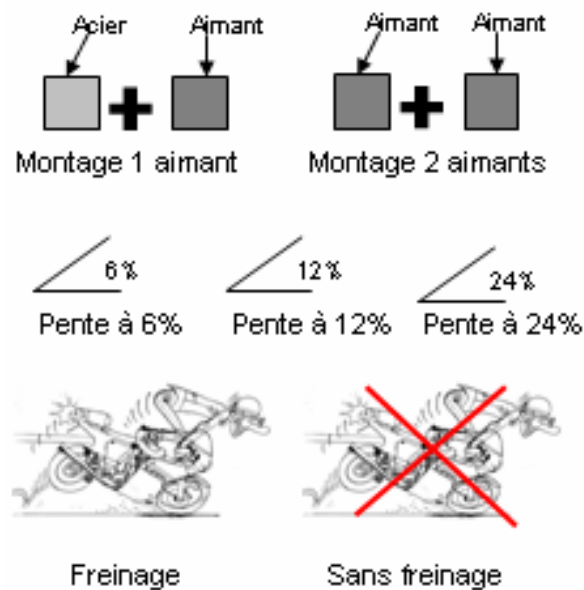
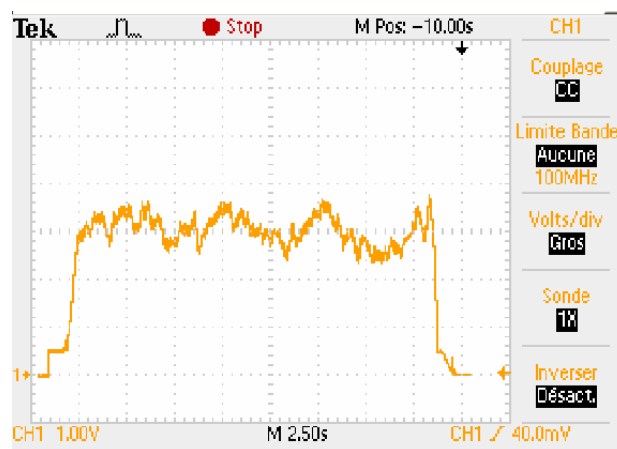


Figure 24: Symboles utilisés pour désigner le type de test effectué

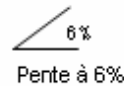
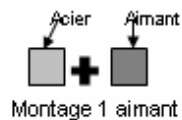
- Mesures 1 et 2:
 - Montage 1 aimant: Diagram showing an 'Acier' (steel) block and an 'Aimant' (magnet) block with a '+' sign between them.
 - Pente à 6%: Diagram showing a 6% incline.
 - Freinage: Diagram showing a motorcycle with a rider.
- , Roue alu pleine



Graphique 9: Allure de la vitesse d'une roue alu pleine freinée (mesure 1)



Graphique 10: Allure de la vitesse d'une roue alu pleine freinée (mesure 2)



○ **Mesures 3 et 4:**

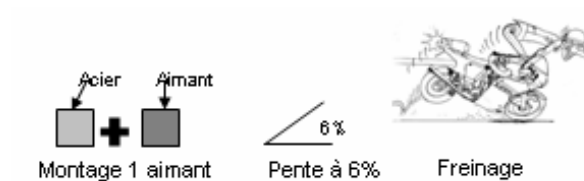
, Roue alu vidée



Graphique 11: Allure de la vitesse d'une roue alu vidée freinée (mesure 1)



Graphique 12: Allure de la vitesse d'une roue alu vidée freinée (mesure 2)



○ Mesures 5 et 6:

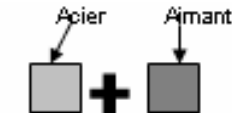


, Roue laiton

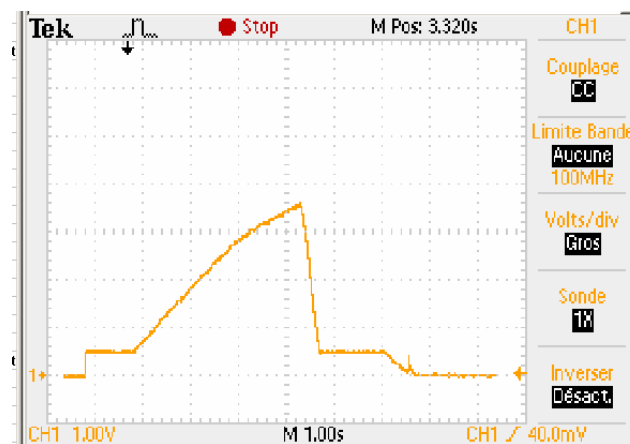


Graphique 13: Allure de la vitesse d'une roue laiton freinée (mesure 1)

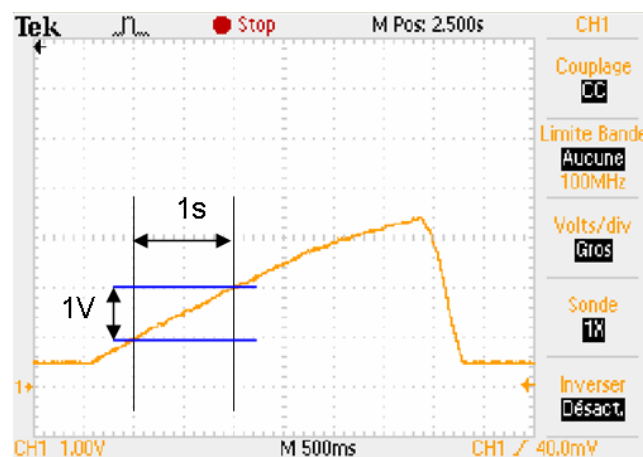


Graphique 14: Allure de la vitesse d'une roue laiton freinée (mesure 2)

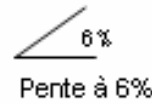
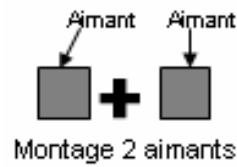
- Mesures 7 et 8:    , Roue alu pleine



Graphique 15: Allure de la vitesse d'une roue alu pleine non freinée (mesure 1)

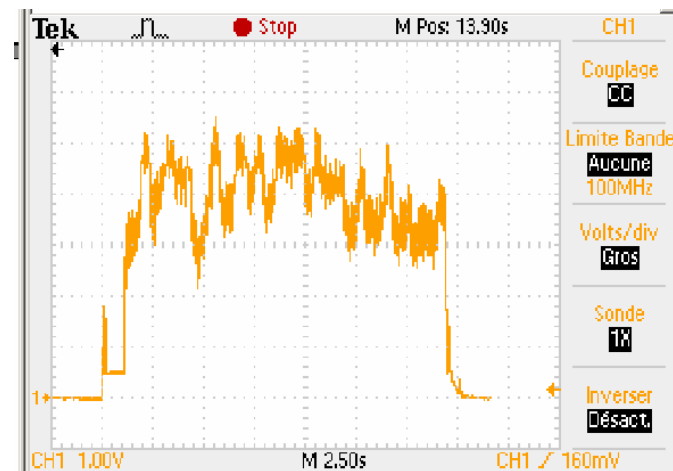


Graphique 16: Allure de la vitesse d'une roue alu pleine non freinée (mesure 2)



- Mesures 9 et 10: alu pleine

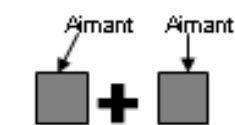
, Roue



Graphique 17: Allure de la vitesse d'une roue alu pleine freinée (mesure 1)



Graphique 18: Allure de la vitesse d'une roue alu pleine freinée (mesure 2)



Montage 2 aimants



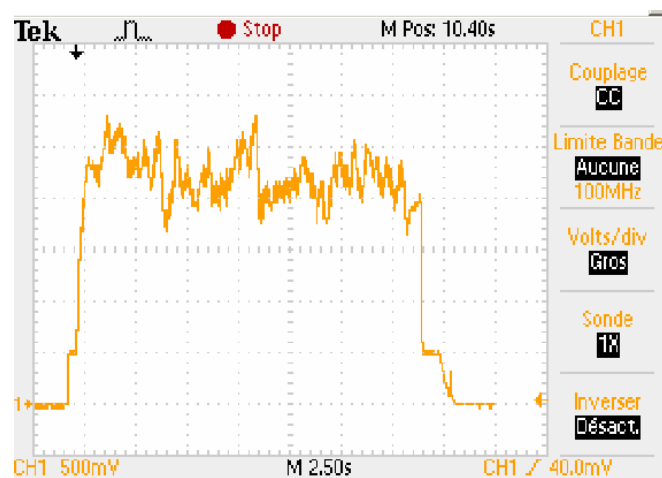
Pente à 6%



Freinage

,Roue alu

- Mesures 11 et 12: vidée

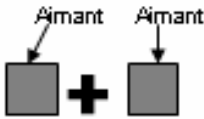


Graphique 19: Allure de la vitesse d'une roue alu vidée freinée (mesure 1)

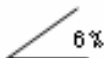


Graphique 20: Allure de la vitesse d'une roue alu vidée freinée (mesure 2)


- **Mesure 13:**



Montage 2 aimants



Pente à 6%



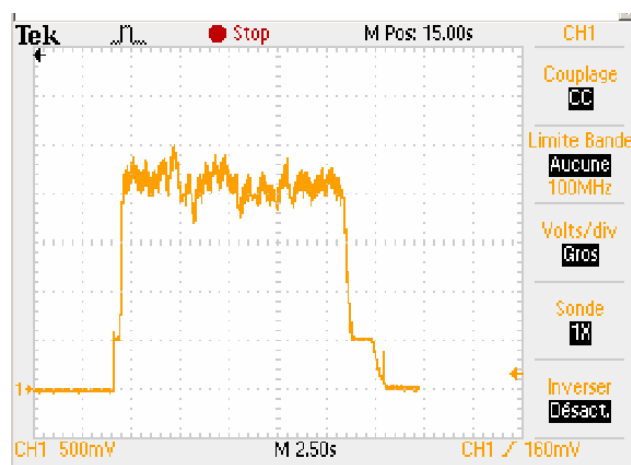
Freinage

, Roue laiton

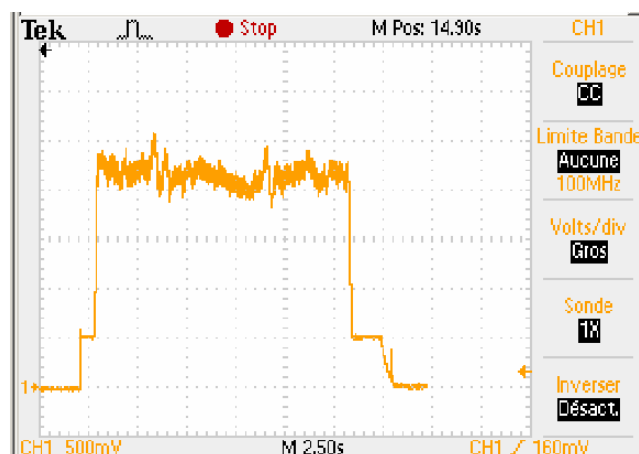


Graphique 21: Allure de la vitesse d'une roue laiton freinée (mesure 1)

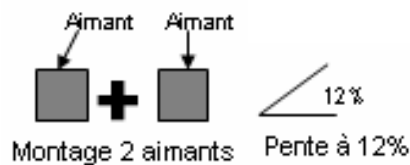
- Mesures 14 et 15: **Montage 2 aimants** **Pente à 12%** **Freinage** **,Roue alu pleine**



Graphique 22: Allure de la vitesse d'une roue alu pleine freinée (mesure 1)



Graphique 23: Allure de la vitesse d'une roue alu pleine freinée (mesure 2)



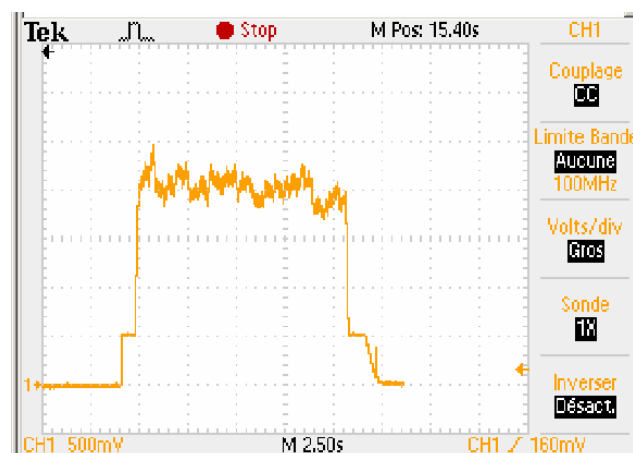
Freinage

, Roue

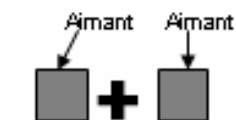
- Mesures 16 et 17:
alü vidée



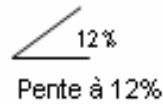
Graphique 24: Allure de la vitesse d'une roue alü vidée freinée (mesure 1)



Graphique 25: Allure de la vitesse d'une roue alü vidée freinée (mesure 2)



Montage 2 aimants



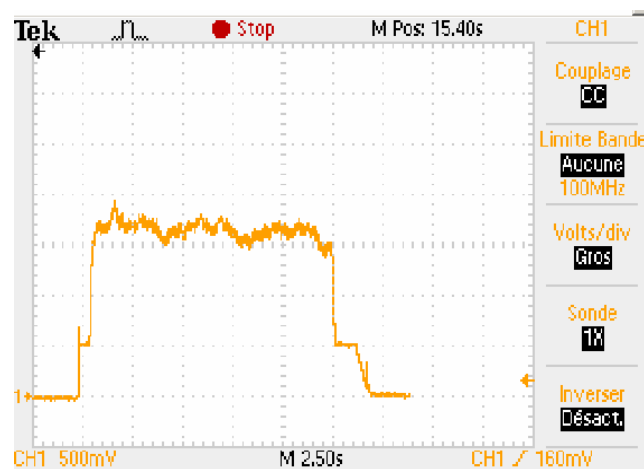
Pente à 12%



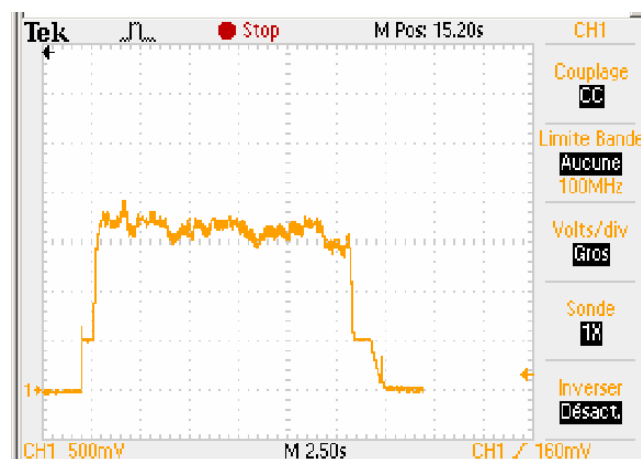
Freinage

,Roue

- Mesures 18 et 19:
laiton

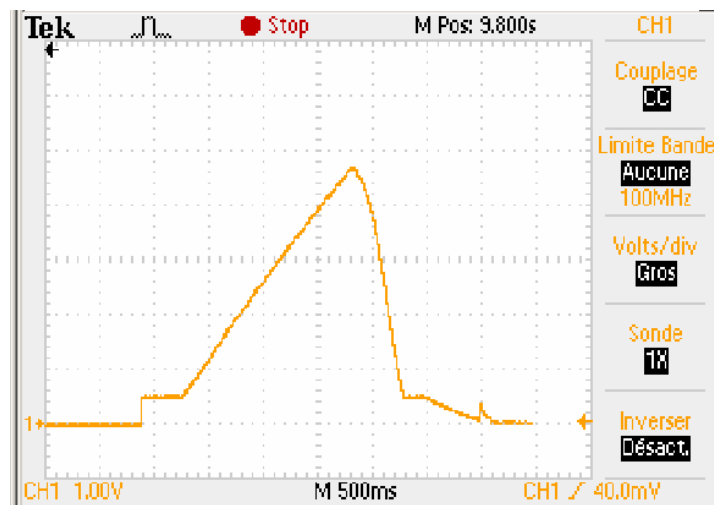


Graphique 26: Allure de la vitesse d'une roue laiton freinée (mesure 1)

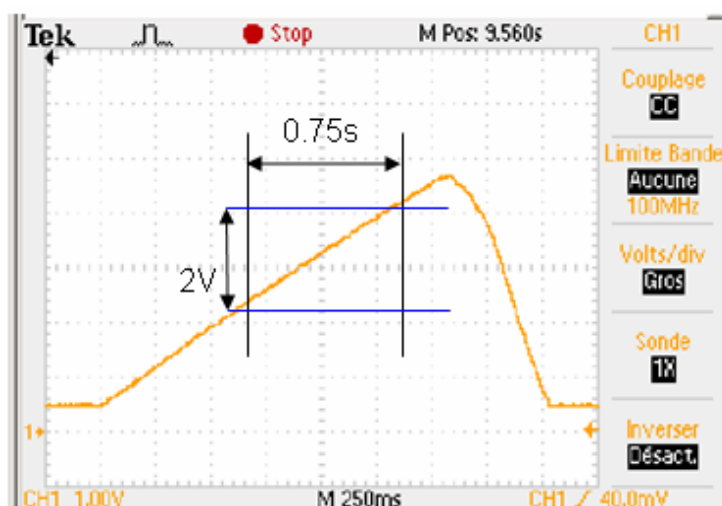


Graphique 27: Allure de la vitesse d'une roue laiton freinée (mesure 2)

- **Mesure 20 :**
pleine
- Montage 2 aimants Pente à 12% Sans freinage ,Roue alu

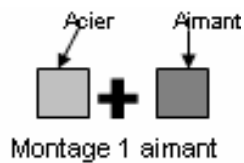


Graphique 28: Allure de la vitesse d'une roue alu pleine pas freinée (mesure 1)



Graphique 29: Allure de la vitesse d'une roue alu pleine pas freinée (agrandissement mesure 1)

- Mesures 21 et 22 : pleine



Pente à 12%

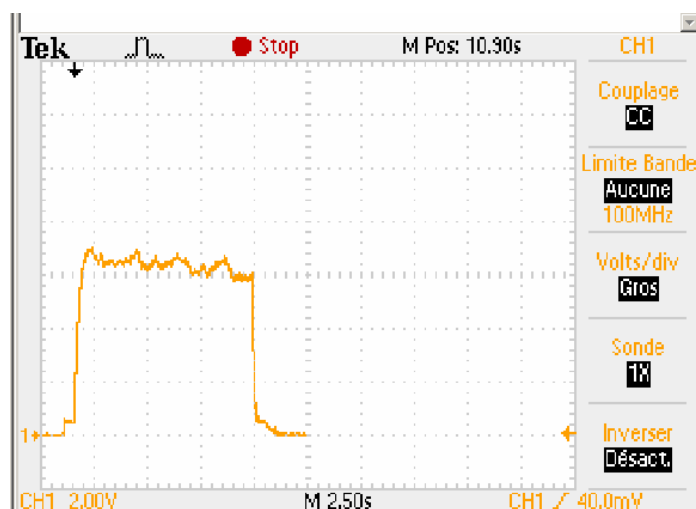


Freinage

Roue alu

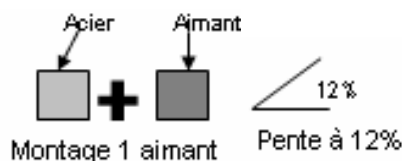


Graphique 30: Allure de la vitesse d'une roue alu pleine freinée (mesure 1)



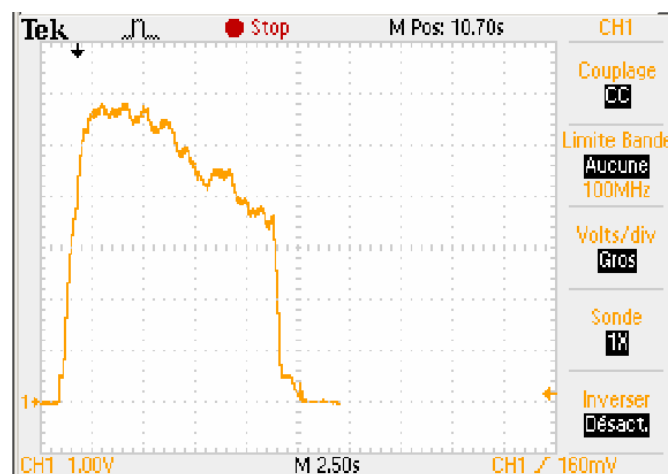
Graphique 31: Allure de la vitesse d'une roue alu pleine freinée (mesure 2)

- Mesures 23 et 24 :
alü vidée



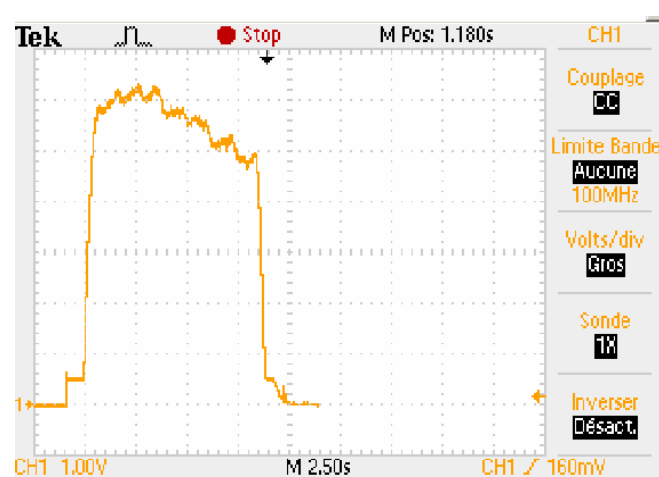
Freinage

Roue

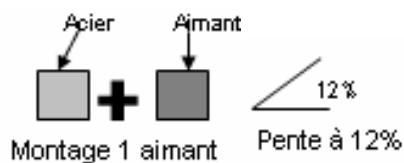


Graphique 32: Allure de la vitesse d'une roue alü vidée freinée (mesure 1)

A la fin de certaines courbes, la vitesse diminue car la pense est faite de deux planches qui ne sont pas parfaitement droite et au milieu du trajet, elles ont tendance à courber.

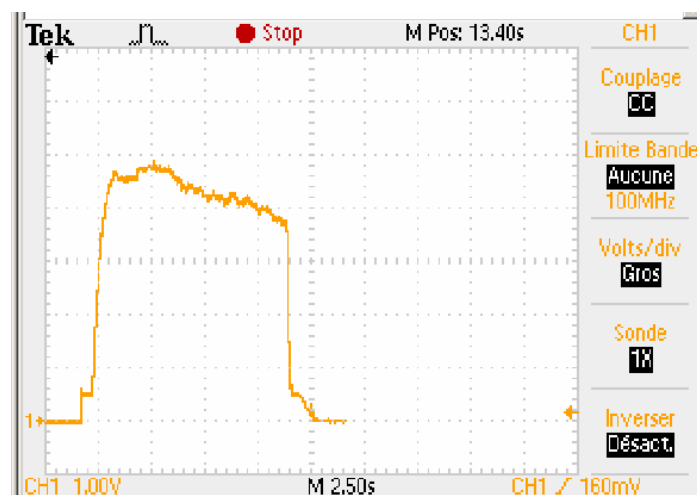


Graphique 33: Allure de la vitesse d'une roue alü vidée freinée (mesure 2)

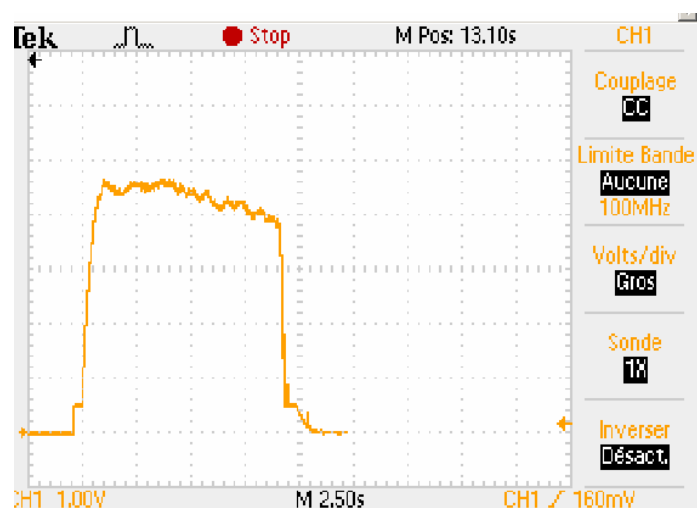


- Mesures 25 et 26 :
laiton

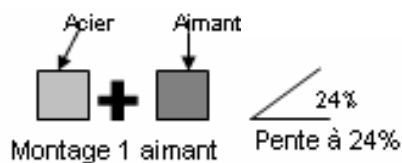
Roue



Graphique 34: Allure de la vitesse d'une roue laiton freinée (mesure 1)



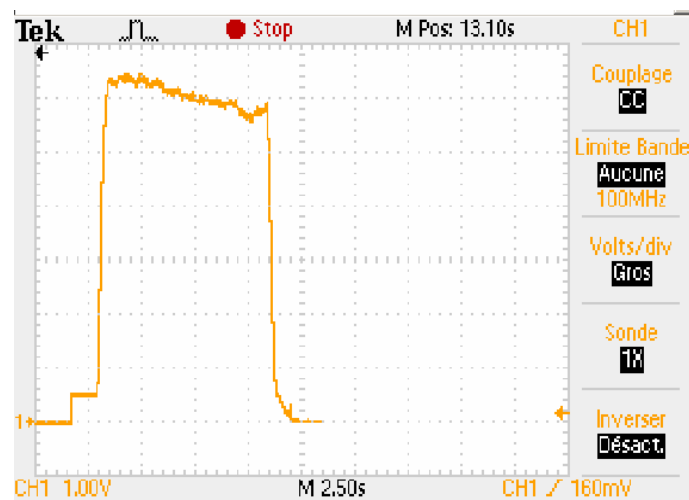
Graphique 35: Allure de la vitesse d'une roue laiton freinée (mesure 2)



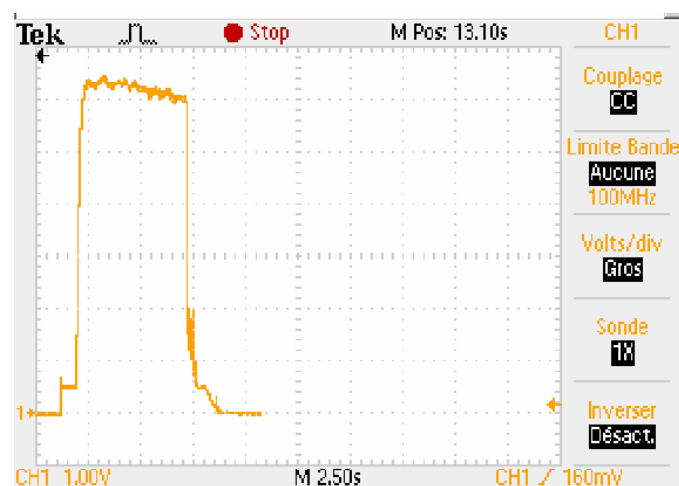
Freinage

Roue

- Mesures 27 et 28 :
 alu pleine

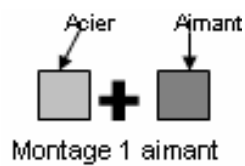


Graphique 36: Allure de la vitesse d'une roue alu pleine freinée (mesure 1)

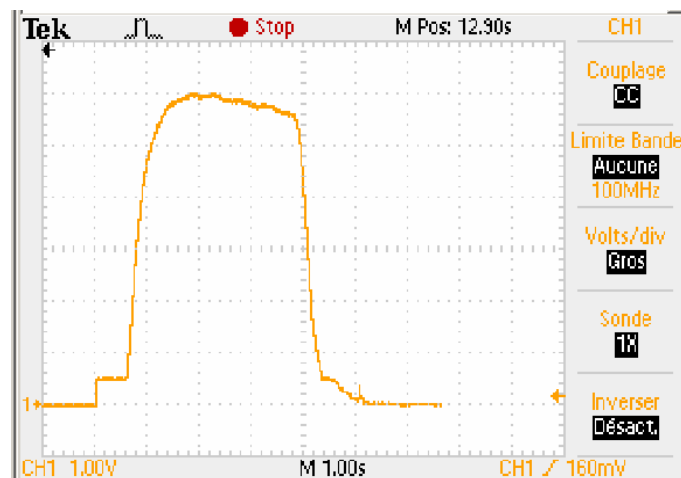


Graphique 37: Allure de la vitesse d'une roue alu pleine freinée (mesure 2)

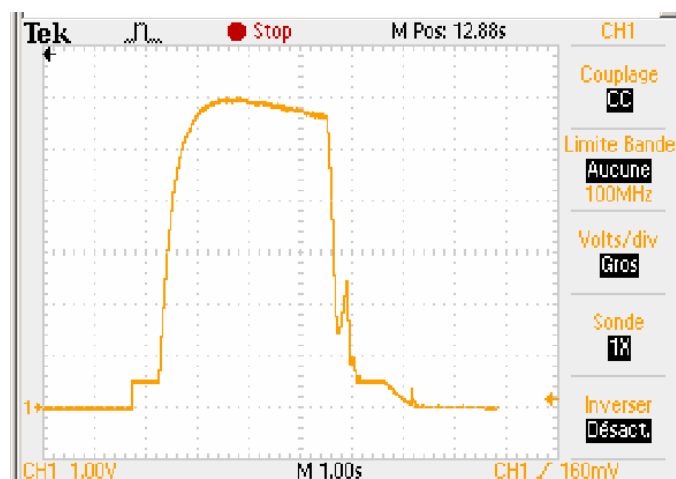
- Mesures 29 et 30: vidéo



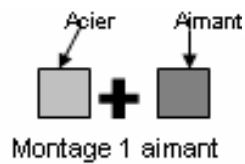
Roue alu



Graphique 38: Allure de la vitesse d'une roue alu vidée freinée (mesure 1)



Graphique 39: Allure de la vitesse d'une roue alu vidée freinée (mesure 2)



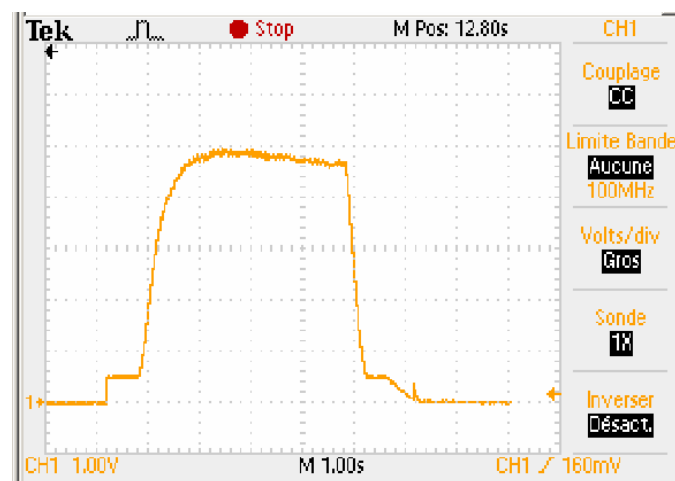
24%
Pente à 24%



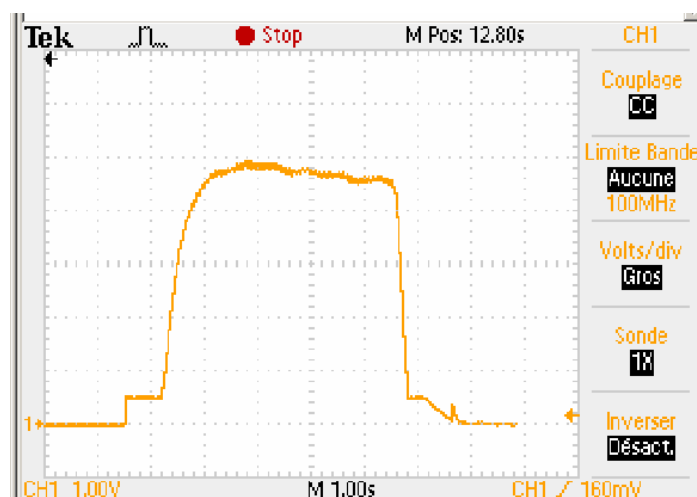
Freinage

Roue

- Mesures 31 et 32:
laiton

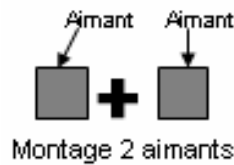


Graphique 40: Allure de la vitesse d'une roue laiton freinée (mesure 1)



Graphique 41: Allure de la vitesse d'une roue laiton freinée (mesure 2)

- Mesures 33 et 34: pleine

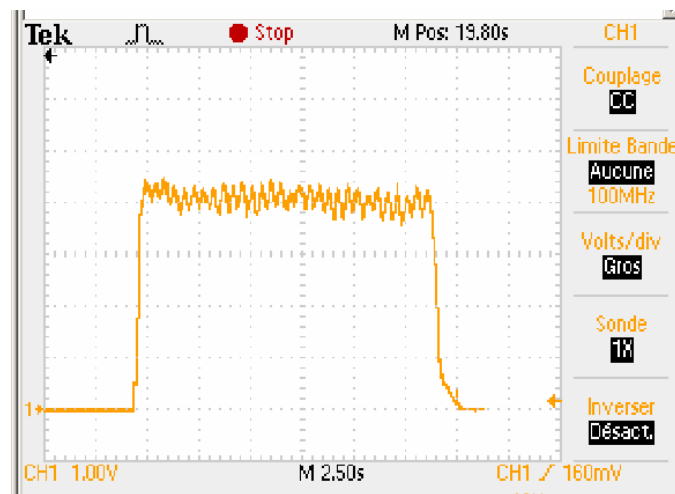


Pente à 24%

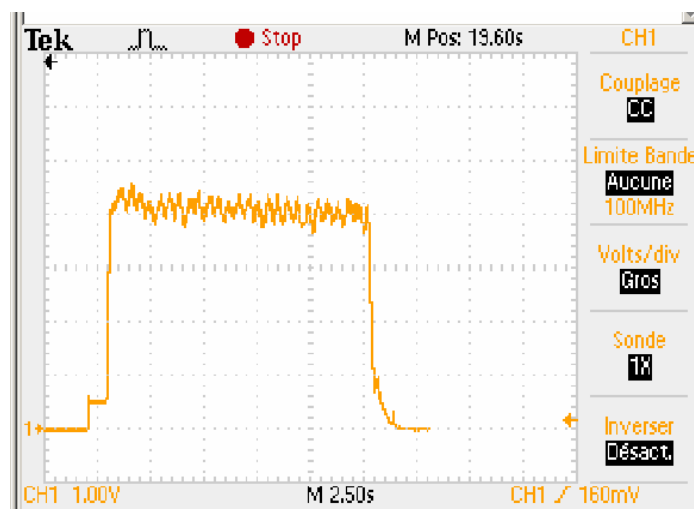


Freinage

Roue alu

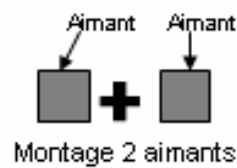


Graphique 42: Allure de la vitesse d'une roue alu pleine freinée (mesure 1)



Graphique 43: Allure de la vitesse d'une roue alu pleine freinée (mesure 2)

- **Mesure 35 et 36: vidéo**

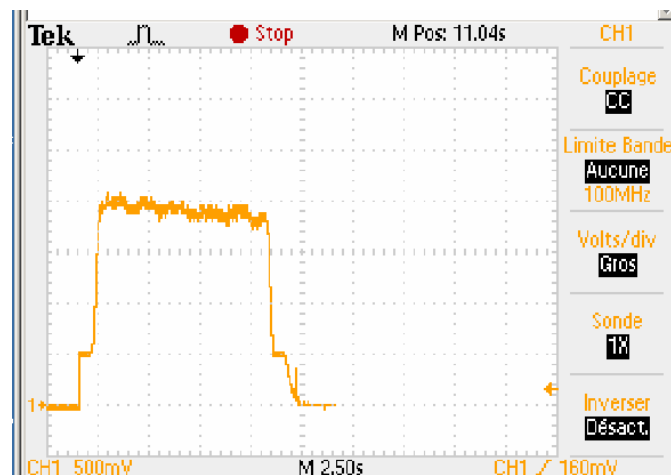


Pente à 24%



Freinage

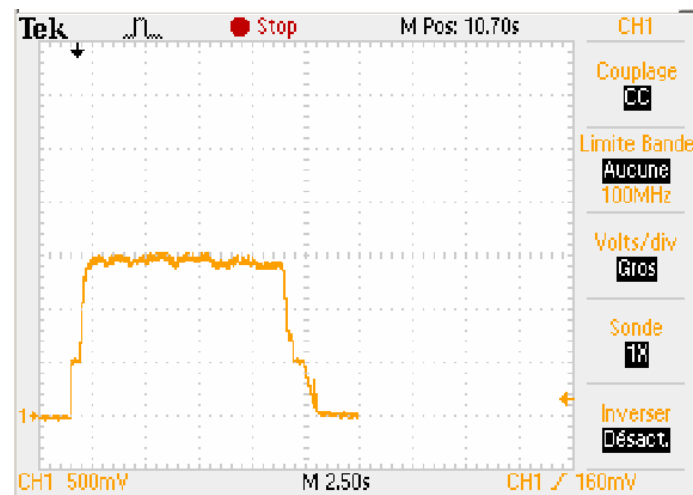
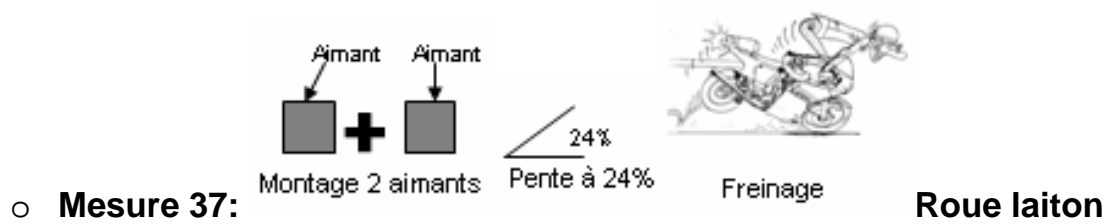
Roue alu



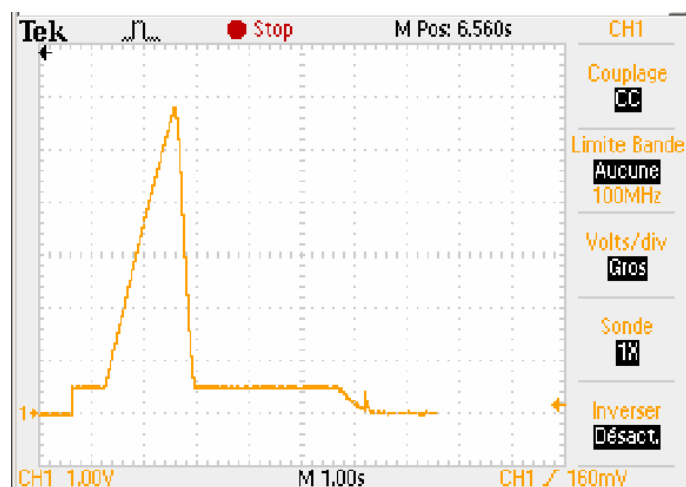
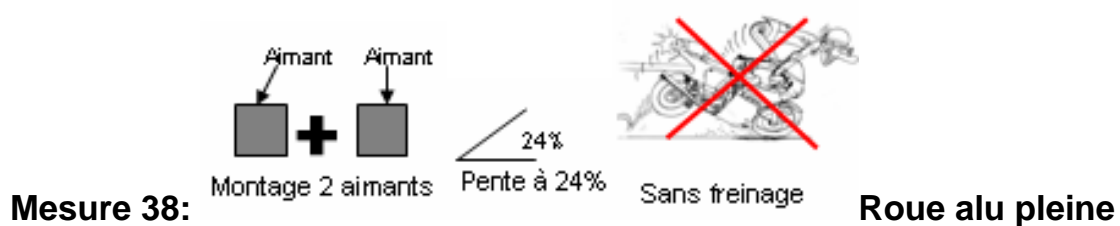
Graphique 44: Allure de la vitesse d'une roue alu vidée freinée (mesure 1)



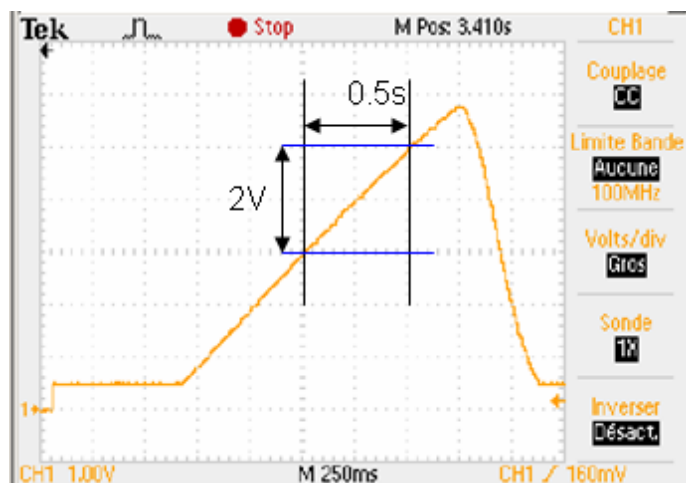
Graphique 45: Allure de la vitesse d'une roue alu vidée freinée (mesure 2)



Graphique 46: Allure de la vitesse d'une roue laiton freinée (mesure 1)



Graphique 47: Allure de la vitesse d'une roue alu pleine freinée (mesure 1)



Graphique 48: Allure de la vitesse d'une roue alu pleine freinée (agrandissement mesure 1)

9. Annexe 9 : Mises en plan