

Réflexions sur un robot Eurobot

Ce document sans aucune prétention théorique, s'inspire d'une expérience acquise par les diverses équipes RCVA qui se sont succédées après 11 années de participation au concours Eurobot.

Ces quelques réflexions non exhaustives n'insistent pas sur les sujets déjà largement développés, à travers le forum Planète sciences et aussi à l'occasion de certains articles ou comptes rendus de projets disponibles sur internet. Il s'agit plutôt de donner un éclairage différent et on espère original sur certains problèmes spécifiques et qui apparaissent comme essentiels dans l'optique de la conception d'un robot Eurobot.

SOMMAIRE

I

- Chapitre 1. Rappels cinématiques de base, coefficient d'adhérence
- Chapitre 2. Phénomène de glissement en phase accélération
- Chapitre 3. Choix d'un profil de vitesse
- Chapitre 4. Les lois mécaniques et thermiques dans un moteur
- Chapitre 5. Blocage du robot
- Chapitre 6. Choix de la vitesse et de l'accélération
- Chapitre 7. Essais avec enregistrements
- Chapitre 8. Asservissement

- Chapitre 9. Le jeu des 15 questions

Chapitre 1

Rappels cinématiques et définition du coefficient d'adhérence

Dans ce chapitre, on s'attache à rappeler quelques formules de base en cinématique et à définir le coefficient d'adhérence des pneus au sol, ce qui doit permettre d'évaluer la force de traction maximum applicable au robot sans glissement.

On définit également un mode opératoire qui permet de mesurer ce coefficient grâce à une manipulation inédite.

Rappels de cinématique

Solide en translation suivant un axe

abscisse du déplacement: x

vitesse linéaire: v

accélération linéaire: γ (gamma)

x (m)

$v = dx/dt$ (m/s)

$\gamma = dv/dt = d^2x/dt^2$ (m/s²)

Solide en rotation autour d'un axe

angle de rotation: θ

vitesse angulaire: ω

accélération angulaire: **acc_rot**

θ (rd)

$\omega = d\theta/dt$ (rd/s)

acc_rot = $d\omega/dt = d^2\theta/dt^2$ (rd/s²)

Relation fondamentale de la mécanique

$$F = m \cdot \gamma$$

F: somme des forces appliquées

m: masse du solide

γ : accélération du solide

$$C = J \cdot \text{acc_rot}$$

C: somme des couples appliqués

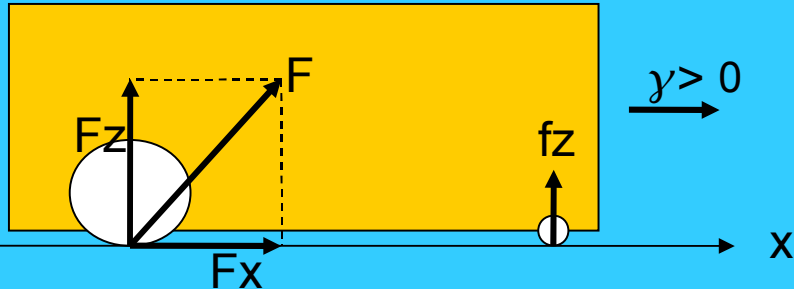
J: moment d'inertie autour de l'axe

acc_rot: accélération angulaire

Robot en translation sur plan horizontal

On suppose le robot propulsé par 2 roues motrices (vue de profil)

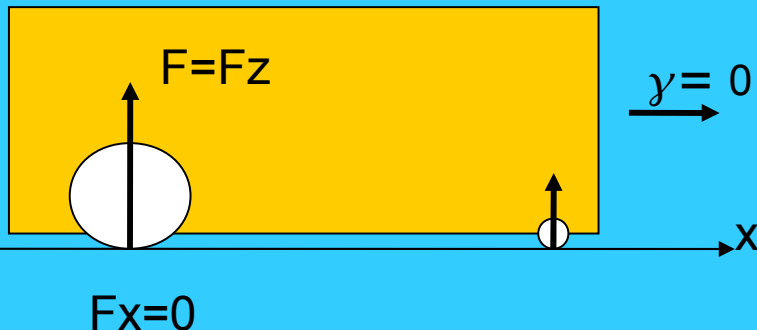
Robot en phase d'accélération



Robot en phase de freinage:



Robot à vitesse constante



F: réaction du sol sur la roue

F_z: réaction verticale du sol sur la roue
(s'oppose à la force d'appui de la roue due au poids du robot)

F_x:
force de propulsion de la roue

$$y = 2F_x / M \quad (M: \text{masse du robot})$$

Cette formule n'est valable que si :

$$F_x < F_{x\max}$$

F_{xmax} correspondant à la limite de patinage de la roue avec:

$$F_{x\max} = k_a \cdot F_z$$

k_a: coefficient d'adhérence des roues au sol
k_a compris entre les limites théoriques 0 et 1

k_a=0: adhérence nulle

k_a=1: adhérence théorique max

Pour nos robots: $0.3 < k_a < 1.5$ (suivant nature et dimension de la bande de roulement des roues et état du terrain)

A propos du coefficient d'adhérence K_a

Et oui, le coefficient d'adhérence peut dépasser la limite théorique de 1. La force de traction peut dépasser dans ce cas la force verticale qu'exerce le robot sur son essieu moteur.

Lorsqu'un pilote de F1 freine à 4g (décélération de 40m/s^2), si on néglige l'appui aérodynamique, ça correspond à $k_a=4$ environ, et si on suppose un appui aérodynamique égal au poids de la monoplace, ça fait tout de même $k_a=2$.

Pour un véhicule de tourisme, la moyenne pour le coefficient d'adhérence sur sol sec tourne autour de 1 et descend à 0.7 (voir moins) sur sol mouillé.

Pour un robot Eurobot, tout dépend du type de pneu utilisé et de l'état du terrain.

On peut imaginer une solution extrême avec un pneu constitué d'un simple joint torique ou k_a peut descendre à une valeur inférieure à 0.5. A l'inverse un pneu caoutchouc de degré shore faible (de l'ordre de 20 à 30) doit pouvoir dépasser la limite théorique de 1.

Il est possible de mesurer la valeur de ce coefficient, comme va le prouver la manip présentée à la page suivante et qui est réalisée à l'occasion de la rédaction de ce document.

Cette manip relève de la plus haute technologie car elle nécessite l'usage du matériel suivant:

- un pèse-bébé

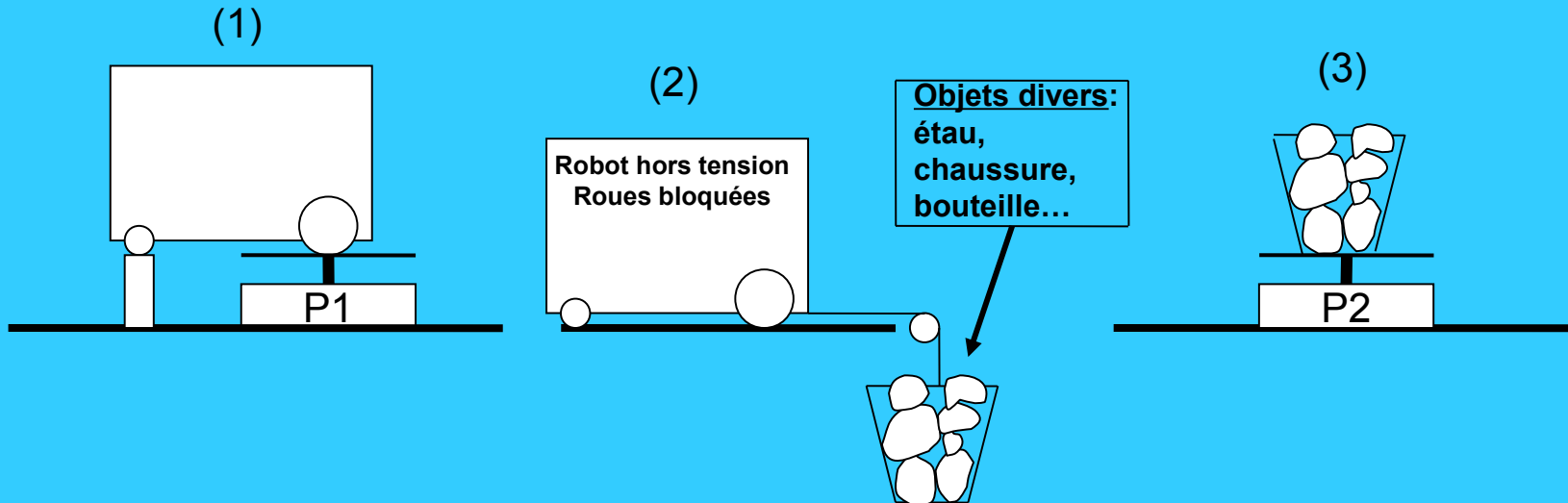
- une ficelle

- une poulie

- un sceau

La difficulté est d'ordre mécanique car il faut bloquer mécaniquement les roues par rapport au châssis (Ce qui ne pose pas de problème si le robot possède le frein à main ☺)

Détermination du coefficient d'adhérence par la méthode du sceau suspendu



(1) On pose l'essieu sur le pèse-bébé et on maintient le robot à l'horizontale grâce à une cale:
On mesure **P1**, force d'appui des 2 roues sur le sol.

(1) On charge le sceau jusqu'au début d'apparition du phénomène de patinage des roues. (La ficelle doit être attachée au robot le plus bas possible)

(2) On pèse le sceau avec sa charge:

On mesure **P2**. (force de traction maximum en limite de patinage)

On en déduit **$Ka = P2/P1$**

Résultats:

Le robot a été allégé puis chargé, ce qui a permis d'effectuer 2 mesures de ka :

Robot allégé: $P1 = 7.55 \text{ kg}$ $P2 = 7.90 \text{ kg}$ $ka = 1.04$

Robot chargé $P1 = 14.65 \text{ kg}$ $P2 = 13.5 \text{ kg}$ $ka = 0.92$

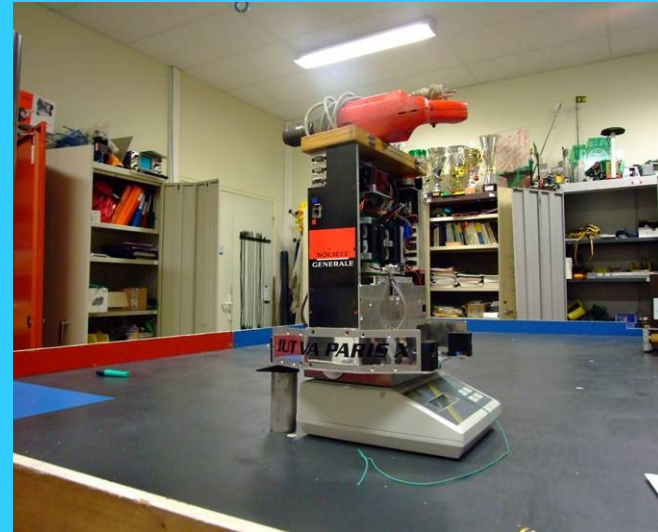
Normalement ka est indépendant du poids du robot. Ce n'est pas tout à fait vrai dans la manip mais il faut mettre ça sur le dos des erreurs de mesure à ± 1 chaussure près.

On peut retenir l'ordre de grandeur de ka (environ $ka = 1$ dans notre cas)

Quelques photos pour se détendre.



Pesée du robot version allégée



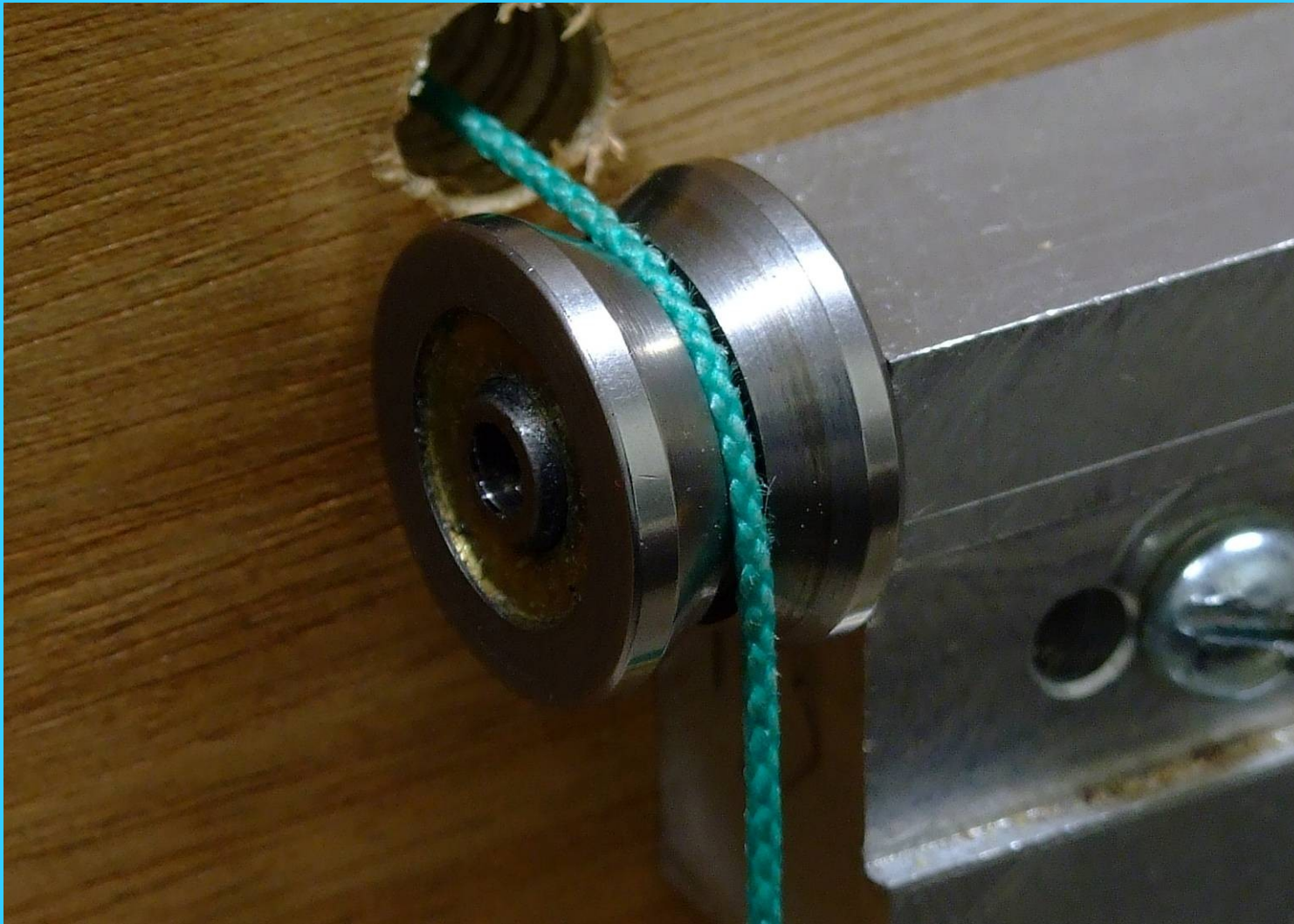
Pesée du robot version alourdie



On charge le sceau jusqu'au glissement



Pesée de la charge



Un détail pour illustrer les sommets technologiques atteints par la méthode du sceau suspendu



Avertissement sur la méthode du sceau suspendu

Afin d'éviter un système mécanique pour le blocage des roues, certains pourraient être tentés d'asservir le robot sur consigne de position fixe.

Il faut avertir nos sympathiques lecteurs sur le danger de ce procédé en termes de durée de vie de leurs moteurs. En effet chaque moto réducteur sera placé dans la pire des situations qui consiste à maintenir par asservissement le robot à l'arrêt avec les roues à leur limite de glissement. C'est là que la puissance dissipée par effet joule est maximum et assez rapidement le rotor peut monter à des températures record jusqu'au passage en phase fumée noire.

Les risques sont d'autant plus importants que le moto réducteur est sous dimensionné en terme de couple, que le robot est lourd et que le coefficient d'adhérence des pneus est élevé.

On reparlera de ce problème d'échauffement aux chapitres 4 et 5

Chapitre 2

Etude du phénomène de glissement en phase accélération

On démontre que la position du centre de gravité et l'adhérence au sol des roues motrices permettent de calculer une accélération limite à ne pas dépasser (sous peine de dérapage ou weeling)

On traite successivement les 2 cas:

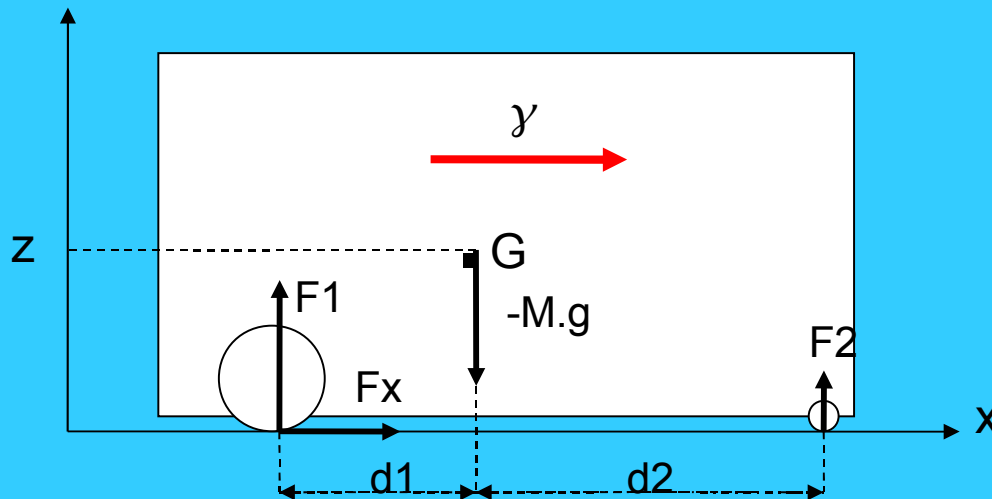
->robot avec essieu moteur décalé

->robot avec essieu central et symétrie centrale

weeling: *phénomène bien connu en moto qui consiste à décoller la roue avant à l'accélération, ou la roue arrière au freinage)*

Répartition des appuis

(Robot avec 2 roues arrière et 2 billes à l'avant)



F1 et F2 représentent les réactions du sol sur la roue motrice et sur la bille de soutien.

-M.g représente la force de pesanteur appliquée au centre de gravité.

On pose $d = d_1 + d_2$

Les relations générales de la mécanique donnent pour le système en équilibre:

$$2.F_1 + 2.F_2 - M.g = 0 \quad (\text{somme des forces verticales} = 0)$$

$$2.F_x = M. \gamma \quad (\text{somme des forces horizontales} = M. \gamma)$$

$$F_2.d_2 - F_1.d_1 + F_x.z = 0$$

(somme des couples appliqués au point G = 0)

On en tire:

$$\frac{(2F_1)}{M.g} = \frac{d_2}{d} + \left(\frac{\gamma}{g}\right) \cdot \left(\frac{z}{d}\right) \quad \frac{(2F_1)}{M.g} \text{ représente la répartition des masses sur l'essieu moteur}$$

$$\frac{(2F_2)}{M.g} = \frac{d_1}{d} - \left(\frac{\gamma}{g}\right) \cdot \left(\frac{z}{d}\right) \quad \frac{(2F_2)}{M.g} \text{ représente la répartition des masses sur l'avant}$$

Les termes d_2/d et d_1/d représentent les répartitions des masses en statique. (lorsque $\gamma=0$)

On voit apparaître le terme supplémentaire $(\gamma/g) \cdot (z/d)$ qui représente le transfert de masse.

En phase accélération, ($\gamma > 0$) ce transfert de masse augmente l'appui arrière et déleste l'avant.

En phase freinage, ($\gamma < 0$) les roues motrices sont délestées

Choix de l'accélération (Robot avec essieu arrière)

Rappel des formules:

$$(2F1)/M.g = d2/d + (\gamma/g).(z/d)$$

$$(2F2)/M.g = d1/d - (\gamma/g).(z/d)$$

$$2.Fx = M. \gamma$$

En phase accélération, il faut éviter:

Le patinage des roues motrices : $Fx < k_a.F1$ soit

Le décollage de l'avant (weeling) : $F2 > 0$ soit

On retient pour γ_{max} la plus petite de ces 2 valeurs.

$$\gamma_{max1} = g. k_a. d2/(d - k_a.z)$$

$$\gamma_{max2} = g.d1/z$$

En phase freinage, il faut éviter:

Le patinage des roues motrices : $|Fx| < k_a.F1$ soit

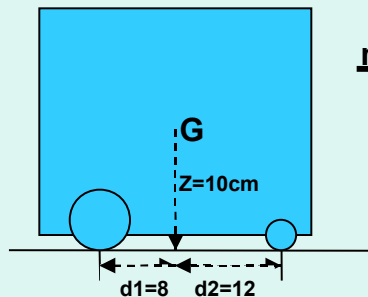
Le décollage des roues arrières (weeling) : $F1 > 0$ soit

On retient pour γ_{max} la plus petite de ces 2 valeurs. (γ_{max} représente le max de la valeur absolue de γ)

$$\gamma_{max1} = g.k_a.d2/(d + k_a.z)$$

$$\gamma_{max2} = g.d2/z$$

Exemples avec $k_a=1$



En accélération:

$$\gamma_{max1} = 1.2g$$

$$\gamma_{max2} = 0.8g$$

c'est le weeling qui limite l'accélération:

$$\gamma_{max} = 0.8g$$

soit environ $8m/s^2$

Au freinage

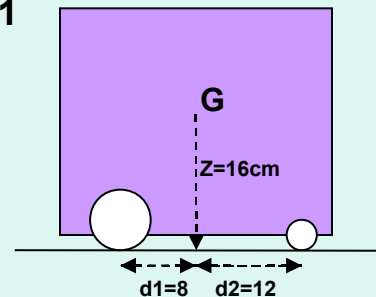
$$\gamma_{max1} = 0.4g$$

$$\gamma_{max2} = 1.2g$$

C'est le dérapage qui limite l'accélération

$$\gamma_{max} = 0.4g$$

soit environ $4m/s^2$



Le centre de gravité est remonté de 6 cm

En accélération:

$$\gamma_{max1} = 3g$$

$$\gamma_{max2} = 0.5g$$

C'est le weeling qui limite l'accélération:

$$\gamma_{max} = 0.5g$$

soit environ $5m/s^2$

Au freinage

$$\gamma_{max1} = 0.3g$$

$$\gamma_{max2} = 0.75g$$

C'est le dérapage qui limite l'accélération:

$$\gamma_{max} = 0.3g$$

soit environ $3m/s^2$

En marche AR, les résultats sont inversés

En marche AR, les résultats sont inversés

Commentaires sur le choix de l'accélération max (Robot avec essieu arrière)

On rappelle les limites de l'étude qui ne porte que sur des déplacements en translation. Ce choix permet d'optimiser l'accélération en terme de performance maximum. (On verra plus tard comment choisir les moto réducteurs capables de passer cette accélération)

A remarquer la simplicité des résultats qui ne dépendent que de la position du centre de gravité et du coefficient de frottement des roues au sol.

En particulier, le poids du robot n'intervient pas ce qui ne constituait pas une évidence à priori.

Le rappel des 2 formules,

$$(2F1)/M.g = d2/d + (\gamma/g).(z/d)$$

$$(2F2)/M.g = d1/d - (\gamma/g).(z/d)$$

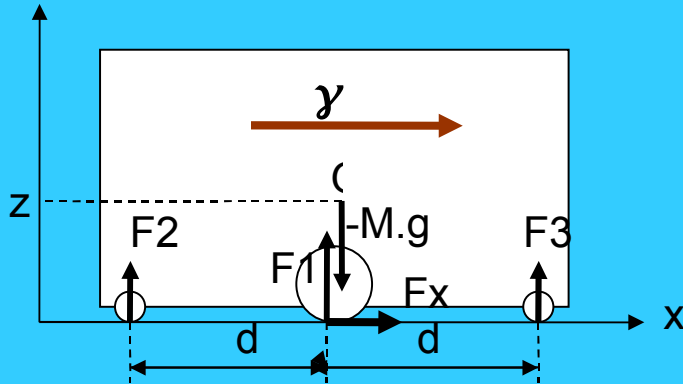
conduit aux remarques suivantes:

On a intérêt à avoir le maximum d'appui sur l'essieu moteur, donc augmenter autant que possible le rapport $(2F1)/M.g$, soit le terme statique $d2/d$, ce qui conduit à positionner le centre de gravité au plus près de la verticale de l'essieu.

Quand au transfert de masse dynamique $(\gamma/g).(z/d)$ il change de signe avec γ , ce qui donne de l'appui aux roues motrices pendant l'accélération, mais les déleste pendant le freinage.

Comme nos robots en cours d'un match, freinent autant qu'ils accélèrent, il semble raisonnable de diminuer autant que possible ce transfert de masse qui dépend simplement du rapport (z/d) , en abaissant le centre de gravité.

Répartition des appuis (Robot avec essieu central)



Les vecteurs $F1$ et $-Mg$ sont colinéaires
(Le léger décalage sur la figure est fait pour raison de lisibilité)

On a simplifié en supposant une symétrie mécanique du robot.

En statique ($\gamma=0$) :

$$F2 = F3=0$$

$$2F1= Mg$$

Le poids du robot appuie entièrement sur l'essieu moteur

Voyons maintenant le transfert de masse dû à l'accélération: On démontre que:

Si le robot accélère ($\gamma > 0$)

$$(2F1)/Mg = 1 - (\gamma/g).(z/d) \rightarrow \text{Le transfert de masse déleste l'appui sur l'essieu}$$

$$(2F2)/Mg = (\gamma/g).(z/d) \rightarrow \text{Le robot prend appui sur les billes arrières}$$

$$(2F3)/Mg = 0$$

Si le robot freine ($\gamma < 0$)

$$(2F1)/Mg = 1 - (\gamma/g).(z/d) \rightarrow \text{Le transfert de masse déleste l'appui sur l'essieu}$$

$$(2F2)/Mg = 0$$

$$(2F3)/Mg = (\gamma/g).(z/d) \rightarrow \text{Le robot prend appui sur les billes avant}$$

Rappel du résultat :

Conclusion sur choix de l'accélération avec essieu central

Si le robot accélère ($\gamma > 0$)

$$(2F1)/Mg = 1 - (\gamma/g).(z/d)$$

$$(2F2)/Mg = (\gamma/g).(z/d)$$

$$(2F3)/Mg = 0$$

Le transfert de masse déleste l'appui sur l'essieu

Le robot prend appui sur les billes arrières

Si le robot freine ($\gamma < 0$)

$$(2F1)/Mg = 1 - (\gamma/g).(z/d)$$

$$(2F2)/Mg = 0$$

$$(2F3)/Mg = (\gamma/g).(z/d)$$

Le transfert de masse déleste l'appui sur l'essieu

Le robot prend appui sur les billes avant

Il y a symétrie totale entre accélération et freinage

L'appui sur l'essieu moteur diminue du même transfert de charge en accélération et freinage

Calcul de γ_{max} :

condition de non patinage: $F_x < k_a.F1$ (k_a : coefficient de frottement) entraîne:

$$\gamma_{max1}/g = k_a/(1+k_a.z/d)$$

condition de non weeling: $F1 > 0$ entraîne:

$$\gamma_{max2}/g = d/z$$

Montrons que le weeling est impossible avec cet essieu central symétrique:

En combinant les 2 équations, on obtient:

$$\gamma_{max1} = \gamma_{max2} / (1 + \gamma_{max2} / k_a.g) \quad \text{soit} \quad \gamma_{max1} < \gamma_{max2} \quad \text{CQFD}$$

Exemple: $d=15\text{cm}$ $z=15\text{cm}$ $k_a=1$

$$\gamma_{max1}/g = 0.5$$

C'est le dérapage qui impose la valeur de γ_{max} avec

$\gamma_{max}=0.5g$ Limite valable aussi bien pour le freinage que pour l'accélération

Récapitulatif des formules de calcul de l'accélération maximum

Avec essieu décalé

a l'accélération:

$$\gamma_{\max 1} = g \cdot k_a \cdot d^2 / (d - k_a \cdot z)$$

$$\gamma_{\max 2} = g \cdot d^2 / z$$

au freinage

$$\gamma_{\max 1} = g \cdot k_a \cdot d^2 / (d + k_a \cdot z)$$

$$\gamma_{\max 2} = g \cdot d^2 / z$$

prendre pour γ_{\max} la plus petite des 2 valeurs $\gamma_{\max 1}$ et $\gamma_{\max 2}$

Avec essieu central et robot symétrique

$$\gamma_{\max} = g \cdot k_a / (1 + k_a \cdot z / d)$$

Par sécurité par rapport à des fluctuations possibles de k_a , se garder une marge de sécurité par rapport à cette valeur max (par exemple $0.8 \cdot \gamma_{\max}$).

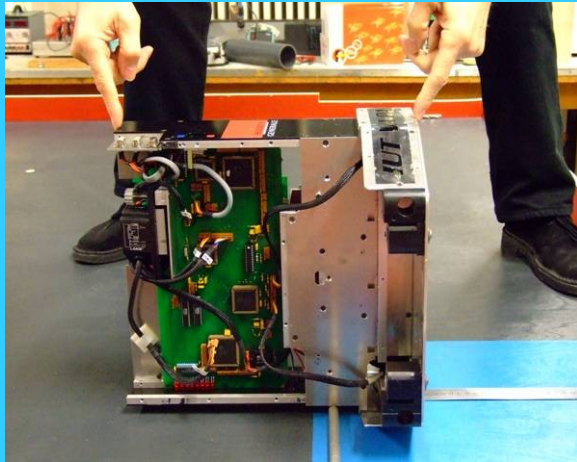
Ces formules sont d'autant plus intéressantes qu'on a appris à mesurer k_a et qu'il est possible de déterminer avec précision la position du centre de gravité c'est-à-dire les valeurs de d_1 , d_2 , d , z .

Il suffit pour cela d'utiliser la **méthode du manche à balai** présentée à la page suivante et qui encore une fois, fait appel à un matériel de haute technologie, soit:

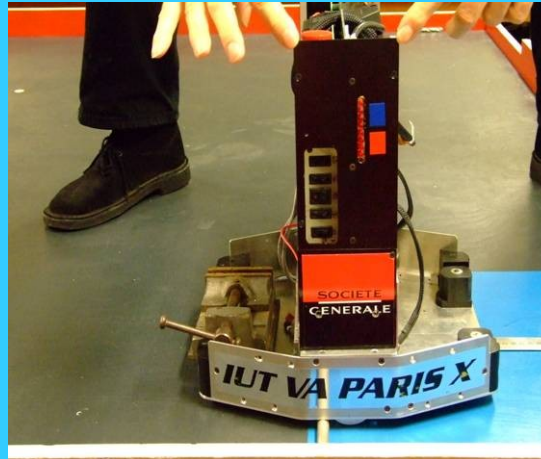
→ Un manche à balai ou barre ronde

→ Une règle graduée

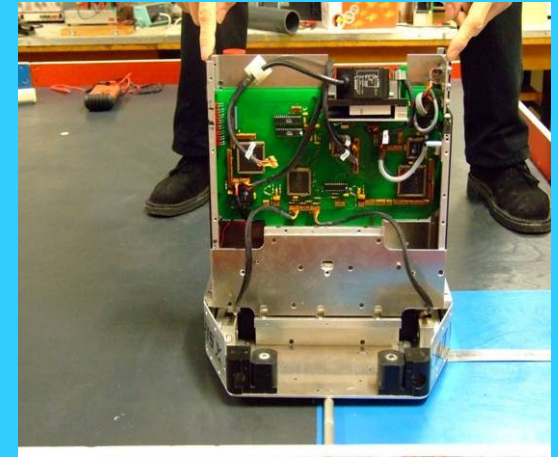
Localisation du centre de gravité



Mesure de z (hauteur de G)



Robot volontairement lesté à gauche. Mesure de la distance entre projection au sol de G et essieu



On vérifie que G est bien dans le plan médian. (Symétrie parfaite droite-gauche)

On recherche la position d'équilibre du robot en le faisant rouler sur la barre posée au sol. La position d'équilibre étant instable est maintenue délicatement par 2 doigts. On mesure la distance par rapport à la barre, avec la règle posée au sol perpendiculairement à la barre
(Si le robot est de forme cylindrique, ça doit être encore possible).

Chapitre 3

Choix d'un profil de vitesse

On va définir un profil de vitesse pour les phases accélération et freinage du robot en tenant compte de l'accélération maximum déterminée au chapitre précédent.

Les profils retenus pour les variables accélération, vitesse, distance sont des profils souhaités qui serviront de consigne lorsqu'on abordera le problème de l'asservissement de position.

Pourquoi un profil trapézoïdal de vitesse?

On va présenter le problème pour un mouvement de translation, sachant que les résultats obtenus seront transposables pour la rotation.

Il s'agit de déplacer le robot depuis une position d'arrêt vers un point destination par une trajectoire rectiligne et le plus rapidement possible. (On suppose qu'en position initiale, le robot est déjà positionné vers la cible). Le mouvement va se décomposer en une phase d'accélération, une phase de freinage et le plus souvent une phase à vitesse constante.

Choix des phases accélération et freinage :

Si on veut optimiser ces phases, le robot doit être à tout instant à sa limite de patinage ou de weeling . Naturellement on gardera toutefois une marge de sécurité par rapport aux valeurs d'accélération maximum.

(Par exemple $\gamma = 0.8\gamma_{\max}$)

Ces 2 phases imposent donc une accélération constante et le mouvement du robot devient tout simplement le classique mouvement appelé : ***mouvement uniformément accéléré***, dont on rappelle les formules de base:

$$\begin{aligned} \gamma &= \text{constante} \\ \text{vitesse} &= \gamma \cdot t \\ \text{distance} &= \frac{1}{2} \cdot \gamma \cdot t^2 \end{aligned}$$

Choix de la vitesse max

Il s'agit d'un problème de bon sens connaissant les dimensions du terrain et en tenant compte des missions à accomplir en présence d'un adversaire qu'il faut éviter à tout prix.

Chacun à sa vision du problème, mais il apparaît que des vitesses max de l'ordre de 1m/s constituent un choix raisonnable, sachant qu'augmenter cette vitesse au-delà va procurer un gain en temps négligeable compte tenu des courtes distances de déplacement .

Exemple:

déplacement= 1m

$\gamma=0.2g=2\text{m/s}^2$ (accélération et freinage)

On appelle t_1, t_2, t_3 la durée de chacune des 3 phases: accélération, vitesse constante, freinage.
 d_1, d_2, d_3 la distance de chacune des 3 phases.

$v_{\text{max}}=1\text{m/s}$

$t_1=t_3=v_{\text{max}}/\gamma=\underline{0.5\text{s}}$ (phase accélération ou freinage)

$d_1=d_3=1/2\gamma t^2=0.25\text{m}$

$d_2=\text{déplacement}-2.d_1=0.5\text{m}$

$t_2=d_2/v_{\text{max}}=\underline{0.5\text{s}}$ (phase vitesse constante)

$t_1+t_2+t_3=\underline{1.5\text{s}}$

$v_{\text{max}}=1.4\text{m/s}$

$t_1=t_3=v_{\text{max}}/\gamma=\underline{0.7\text{s}}$ (accélération ou freinage)

$d_1=d_3=1/2\gamma t^2=0.49\text{m}$

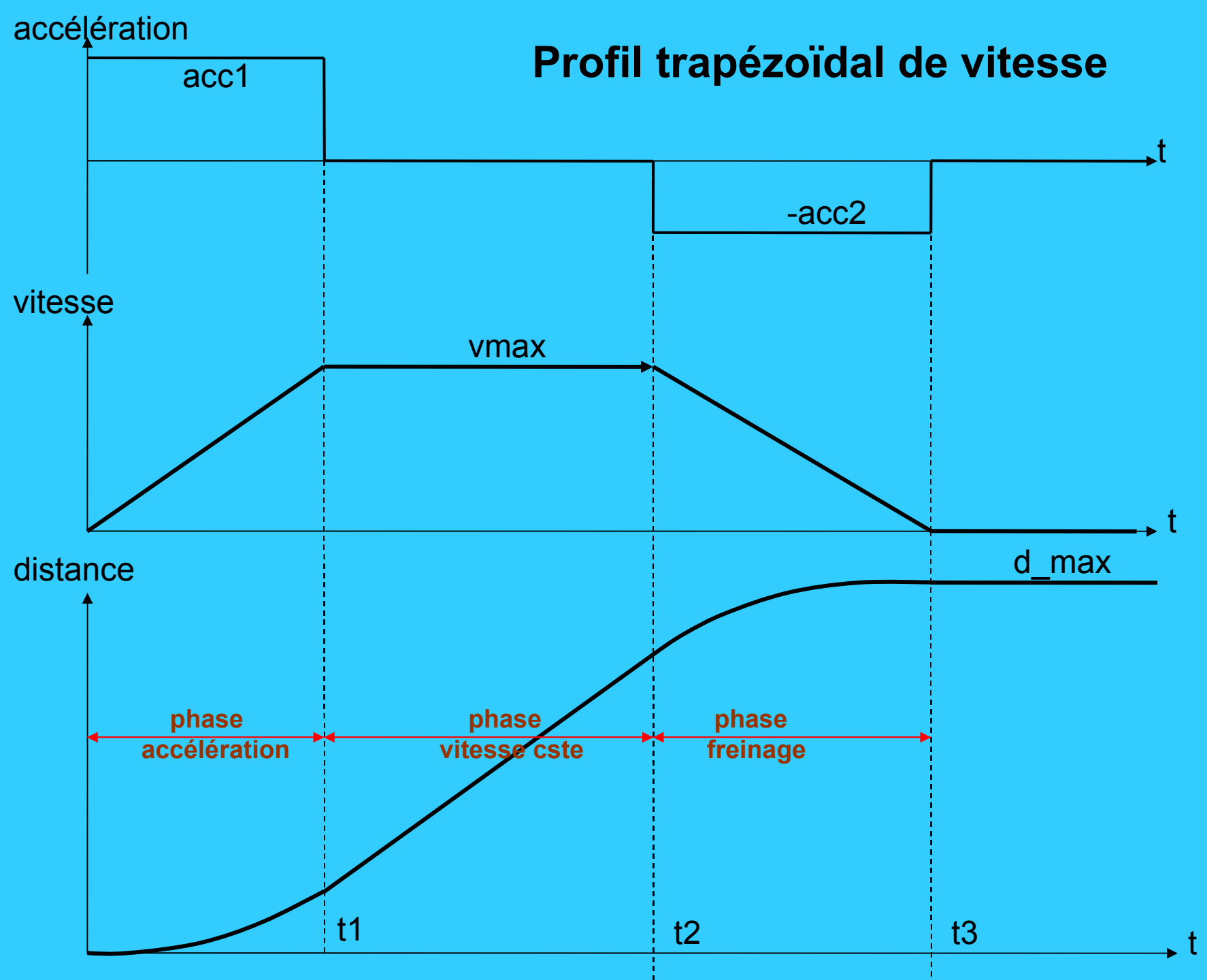
$d_2=\text{déplacement}-2.d_1=2\text{ cm}$

$t_2=d_2/v_{\text{max}}=\underline{0.014\text{s}}$ (phase vitesse constante)

$t_1+t_2+t_3=\underline{1.41\text{s}}$

En passant de 1m/s à 1.4 m/s on gagne 1/10 sec ce qui est négligeable!

Profil trapézoïdal de vitesse



Commentaires sur le profil trapézoïdal

On note l'évolution parabolique de la distance au cours des 2 phases accélération et freinage qui permet des mouvements en douceur bien que l'accélération soit optimisée à sa limite max acceptable. Dans ces conditions, on ne voit aucun intérêt à adoucir davantage. On y perdrait en performance sans rien gagner en fiabilité mécanique.

D'autant plus qu'on verra plus tard que cette courbe de **distance** représente en fait une courbe de **consigne de la distance**. Et la constante de temps mécanique du robot va encore lisser, s'il en était besoin, l'évolution réelle du robot.

Chapitre 4

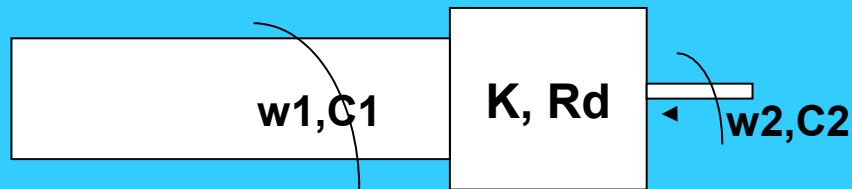
Les lois mécaniques et thermiques dans un moteur

**On rappelle d'abord les lois de base d'un moteur continu en régime établi.
Puis on évoque les problèmes thermiques**

A ce stade, on a appris à choisir l'accélération max. Encore faut-il que nos moto réducteurs puissent fournir le couple nécessaire à ces performances.

On se limitera au choix de moteurs continus, en laissant de côté les moteurs brushless, bien que très excitants pour leurs performances. Mais notre expérience est trop limitée sur le sujet.

Présentation du problème:



On pose:

K : le rapport de réduction du réducteur.

Rd: Rendement mécanique du réducteur

w1: vitesse angulaire moteur

w2: vitesse angulaire roue

C1: couple moteur

C2: couple à la roue

P1=C1.w1: puissance mécanique moteur

P2=C2.w2: puissance mécanique à la roue

$$w_2 = w_1 / K$$

$$C_2 = C_1 \cdot Rd \cdot K$$

$$P_2 = P_1 \cdot Rd$$

Remarquer que la relation sur les puissances ne dépend pas de **K**.

Si on augmente **K**, on augmente le couple roue, mais on diminue la vitesse du robot d'où le dilemme dans le choix de **K**.

Rappels de base sur le moteur continu:

$$U = r.i + \lambda_v.w$$

$$C = \lambda_c.i$$

les variables:

U: tension d'induit (v)

w: vitesse de rotation (rd/s)

C: couple moteur (N.m)

i: courant d'induit

les constantes:

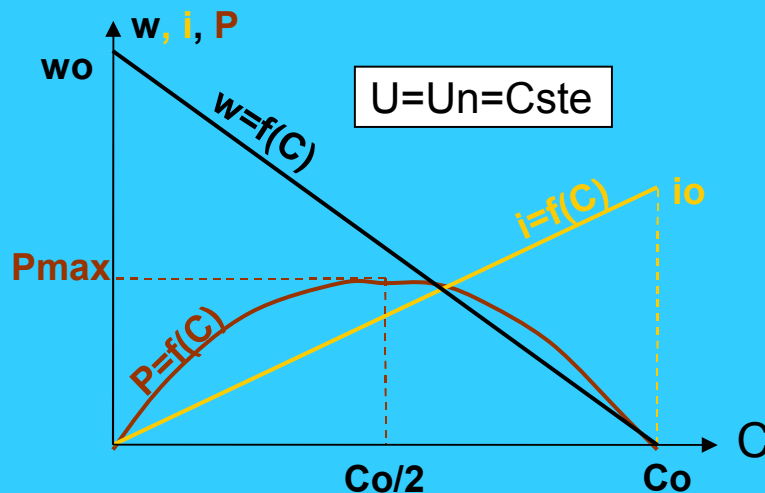
r: résistance d'induit (ohm)

λ_v : constante de vitesse (v/rd/s)

λ_c : constante de couple (N.m/A)

(A)

Courbes en fonction du couple moteur à tension **U** constante



La vitesse **w** diminue linéairement quand le couple augmente.

Le courant d'induit **i** est proportionnel au couple.

$w_0 = U_n / \lambda_v$ (vitesse à vide pour $C=0$)

$i_0 = U_n / r$ (courant de démarrage pour $w=0$)

$C_0 = \lambda_c . i_0$ (couple de démarrage pour $w=0$)

Remarque inattendue et incroyable:

$\lambda_v = \lambda_c$ (dans le système Si: λ_v en v/rd/s et λ_c en N.m/A)

La puissance mécanique **$P=C.w$** que peut fournir le moteur passe par un maximum pour **$C_0/2$** .

A la puissance max P_{max} :

Le terme **ri** (terme ohmique ou terme de couple) est égal au terme **$\lambda_v.w$** (terme de vitesse) ce qui signifie que la moitié de la tension **U** sert à maintenir le couple, l'autre moitié sert à maintenir la vitesse.

La puissance électrique **$U.i$** fournie au moteur est alors égale à **$2.P_{max}$** donc le rendement énergétique n'est que de 50%.

Les phénomènes thermiques dans le moteur

La puissance **P_j** dissipée dans le moteur élève sa température. Et la température du rotor ne doit pas dépasser une valeur limite de l'ordre de 100°C à 125°C.

Pour les types de moteurs utilisés pour Eurobot, les ordres de grandeur des paramètres qui définissent les échanges thermiques sont les suivants:

Résistance thermique rotor stator **R_{thr}**= 3°C/W

Résistance thermique stator ambiant **R_{ths}**= 10°C/W

Constante de temps thermique rotor 20s

Constante de temps thermique stator 700s

Les lois d'ohm thermiques donnent en régime permanent:

$$T_r - T_s = P_j \cdot R_{thr}$$

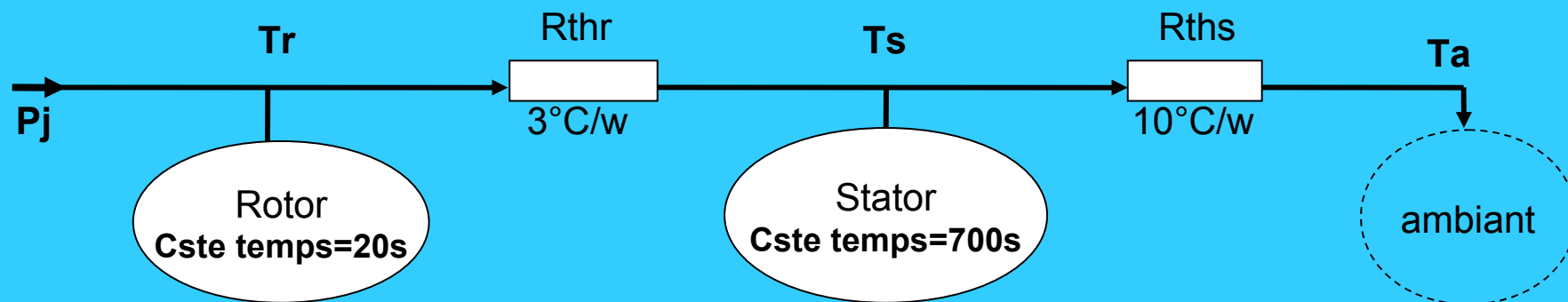
T_r : température du rotor

$$T_s - T_a = P_j \cdot R_{ths}$$

T_s : température du stator

$$T_r - T_a = (R_{ths} + R_{thr}) \cdot P_j$$

T_a : température ambiante



Durée de vie d'un moteur en cas de blocage de la roue

Le calcul qu'on va présenter peut être considéré comme théorique. En fait il ne l'est pas tant que ça:

On suppose un robot asservi en position, en train de se déplacer. On va provoquer brusquement un blocage d'une roue (par un procédé quelconque qui ne nous intéresse pas pour l'instant). On suppose par ailleurs que le robot est dépourvu d'un système logiciel de détection de blocage.

Essayons d'évaluer la durée de vie du moteur associé à la roue bloquée.

L'asservissement va réagir au blocage en augmentant la tension de commande jusqu'à saturation c'est-à-dire la tension d'alimentation. Par conséquent, le courant d'induit va augmenter jusqu' à sa valeur i_{max} .

$i_{max} = V_{cc}/r$ (On néglige la chute de tension dans le pont en H)

$P_j = r.i_{max}^2$ puissance dissipée au rotor du moteur.

La température du stator n'a pas le temps de varier étant donné la valeur de sa constante de temps thermique (700s par exemple).

Par contre, la température du rotor va augmenter très rapidement, étant donné sa constante de temps thermique de l'ordre de 20s.

Prenons l'exemple du moteur RE025 en version 24v:

$r = 2.34\text{ohm}$ $R_{th}=3^{\circ}\text{C/w}$ cste de temps thermique rotor= 20s

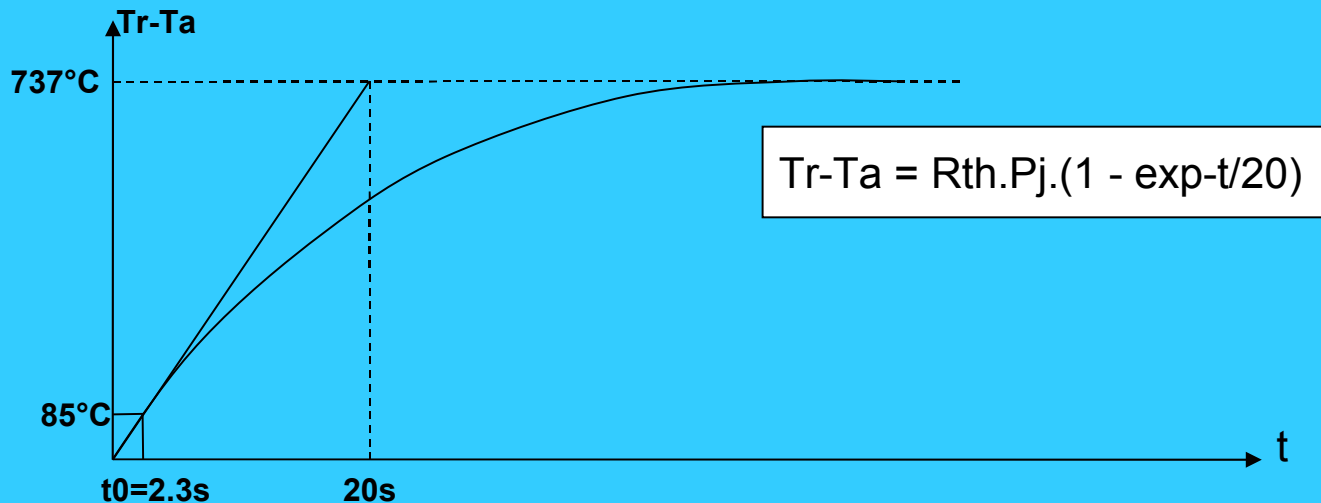
$V_{cc}=24\text{v}$ $T_{rmax}=110^{\circ}\text{C}$ $T_a=25^{\circ}\text{C}$

$$I_{max} = V_{cc}/r = 24/2.34 = 10.25\text{A}$$

$P_j=r.I_{max}^2 = 246\text{ w}$ puissance dissipée au rotor

$$T_r - T_a = R_{th}.P_j = 737^{\circ}\text{C}$$

Bien entendu il s'agit d'une valeur asymptotique qui ne sera jamais atteinte car le rotor va partir en fumée au delà de $T_r=110^{\circ}\text{C}$, soit $T_r-T_a = 85^{\circ}\text{C}$



En approximant l'exponentielle avec sa tangente ça donne une durée de vie t_0 :

$$t_0 = 20 \cdot 85/737 = 2.3\text{ s}$$

La durée de vie du moteur après blocage de la roue est de 2.3 s

(A moins que l'ampli de puissance serve de fusible et lâche avant ☺)

Inquiétant n'est-ce pas.

Chapitre 5

Condition de glissement en cas de blocage du robot

On examine le cas de blocage sur un obstacle.

On en déduit la condition de glissement qui permet de déterminer le réducteur.

Cas de blocage du robot

On envisage maintenant un blocage du robot (et non plus un blocage de la roue).

En cas de blocage sur obstacle (bordure ou adversaire par exemple), se pose le problème de l'échauffement. L'asservissement va réagir en augmentant la tension **U** jusqu'à saturation. Alors **$U = V_{sat} = V_{cc} = r.i_0$** (le terme de vitesse est nul puisque le robot est bloqué) **et 2 cas sont alors possibles:**

->Le moto réducteur est bien calculé et le glissement des roues va se déclencher avant que la tension d'induit n'atteigne sa valeur de saturation **V_{sat}**

C'est le cas favorable car si le robot glisse, la force de traction chute brutalement. Ceux qui on déjà poussé une armoire connaissent le phénomène. La force de poussée nécessaire pour mettre l'armoire en mouvement est supérieure à la force suffisante pour maintenir son glissement. Le robot se met donc à patiner face à la bordure mais ce phénomène va le sauver car dans l'équation **$V_{sat} = r.i + \lambda v.w$** le terme de vitesse qui apparaît fait diminuer le terme **$r.i$** donc le terme **$r.i^2$** .

->le moto réducteur est sous dimensionné en couple et la tension **U** va atteindre la tension **V_{sat}** sans que le glissement se produise. Alors le courant **i** devient égal au courant de démarrage **i_0** , la température du rotor grimpe jusqu'à des sommets interdits et une fumée noire va apparaître rapidement. Il s'agit du cas étudié précédemment.

Cherchons la condition limite au glissement avant saturation en cas de blocage:

Calculons le couple moteur Cm1 nécessaire pour déclencher le glissement:

$$2.F_{x\max} = k_a.F_z$$

La force de traction maximum $2.F_{x\max}$ en limite de glissement est proportionnelle à l'appui F_z du robot sur l'essieu et à la valeur du coefficient d'adhérence du pneu. (Cette valeur $k_a.F_z$ est exactement égale au poids du sceau dans la méthode de mesure par sceau suspendu présentée au chapitre1).

$$C_r = F_{x\max} \cdot (D/2) \quad \text{couple à la roue}$$

$$C_{m1} = C_r / (K.R_d)$$

Calculons le couple maximum Cm2 que peut fournir le moteur:

$$U = V_{\text{sat}}$$

$$i = V_{cc} / r$$

$$C_{m2} = \lambda_c \cdot i = \lambda_c \cdot V_{cc} / r$$

En fait pour des raisons de sécurité et d'expérience personnelle sur ce problème, il est apparu qu'une marge de 20% était nécessaire par rapport à la limite théorique (Il faut tenir compte du fait que k_a peut varier d'un terrain à l'autre et aussi que le glissement doit être franc)

$$C_{m2} \geq 1,2 \cdot C_{m1}$$

**Cette condition assure un glissement certain en cas de blocage du robot .
Pour un moteur donné, on peut en déduire le rapport minimum du réducteur**

Des équations précédentes, on tire:

$$K_{min} = 1,2.(k_a.F_z).D.r / 4.\lambda_c.V_{cc}.R_d$$

k_a coefficient d'adhérence

F_z : appui du robot sur l'essieu moteur (N)

D : diamètre des roues motrices (m)

r : résistance d'induit du moteur (ohm)

λ_c : constante de couple du moteur (N.m/A)

V_{cc} : tension batterie (v)

R_d : rendement mécanique du réducteur

Et on veut $K > K_{min}$ pour déclencher le glissement si blocage

Remarque sur la détermination du terme $k_a.F_z$:

→ $k_a.F_z$ est égal au poids du sceau suspendu exprimé en Newton dans la méthode de mesure de k_a .

→ Ou bien on connaît k_a (ou on l'estime) et on mesure F_z :

Si l'essieu est central et robot symétrique $F_z = M.g$

Si l'essieu est décalé $F_z = M.g.d/2$ (voir chapitre2)

Noter que K_{min} augmente si:

-> $k_a.F_z$, D , r augmentent

-> λ_c , V_{cc} diminuent

Ce qui semble tout à fait logique.

Choix du réducteur pour un moteur donné

Prenons l'exemple de 2 moteurs, donnés pour des puissances nominales différentes .

Données robot:

$M=15\text{kg}$ masse du robot à essieu central ($F_z=M.g$)

$D= 6\text{cm}$ diamètre des roues

$k_a=1$ coefficient d'adhérence

Batterie de 24v

Moteur puissance 10w 24v

$r=7.55\text{ ohm}$

$\lambda_c=43.8\text{ mN.m/A}$

Moteur puissance 20w 24v

$r=2.34\text{ ohm}$

$\lambda_c=23.5\text{ mN.m/A}$

Détermination du réducteur: (On utilise la formule page précédente)

Pour moteur 10 w

$K_{\min}=28$

On trouve au catalogue **$K=36$**

Pour moteur 20 w

$K_{\min}=16$

On trouve au catalogue **$K=20.25$**

Chapitre 6

Choix de la vitesse et de l'accélération

On va s'imposer un fonctionnement des moteurs sans saturation et en déduire les performances du robot en terme de vitesse et accélération

Evaluation des performances sans saturation

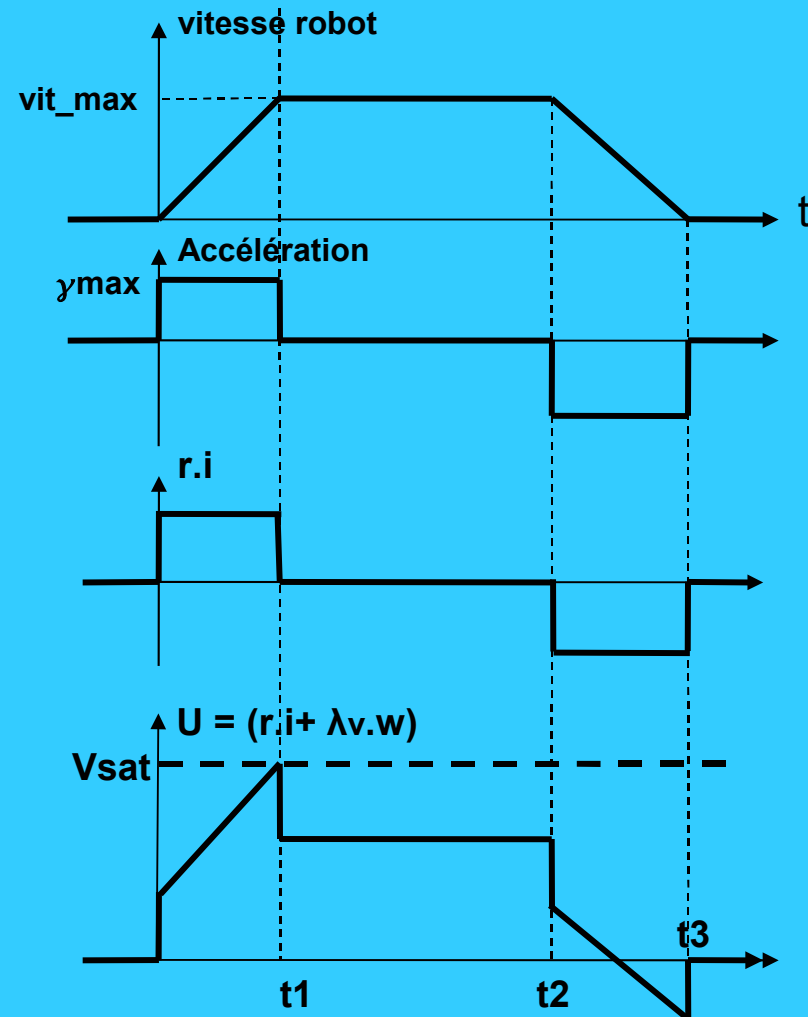
On s'impose un fonctionnement de l'asservissement sans saturation.

La tension U d'alimentation des moteurs doit par conséquent rester inférieure à tout instant à sa tension de saturation V_{sat} .

Dans un fonctionnement sans blocage, cherchons à quel moment la tension U va passer par son maximum.

Dans le raisonnement qui va suivre on revient au profil trapézoïdal de vitesse, en rappelant qu'il s'agit d'un profil souhaité c'est-à-dire qu'il correspond à un profil de consigne de vitesse. Afin de simplifier le problème, on supposera que ce profil correspond au profil de vitesse effective. Ce qui revient à négliger les écarts de boucle dans l'asservissement.

Fonctionnement normal du robot sans blocage



On retrouve le profil trapézoïdal de vitesse.

L'accélération du robot est constante = γ_{max} pendant les phases accélération et freinage.

Si l'accélération est constante, le couple moteur donc le courant sont constants.

On retrouve que U est la somme du terme ohmique et du terme de vitesse.
De 0 à t_1 , le terme ohmique est constant, le terme de vitesse est proportionnel à la vitesse robot.
 U est maximum à l'instant t_1 .

Si on veut tirer la quintessence du moto réducteur, il faut choisir γ_{max} et vit_max de façon à ce que cette valeur max de U corresponde à la tension de saturation V_{sat} .

Ce qui signifie qu'on se place en limite de saturation à l'instant t_1 le plus critique.

Les limites de fonctionnement sans saturation sont donc données par l'équation:

$V_{cc} = r.i + \lambda v.w_m$ (1) équation valable à l'instant t_1 (en fin de phase accélération)

$i = C_m / \lambda_c$ courant d'induit (A)

$C_m = C_r / (K.R_d)$ couple moteur (N.m)

$C_r = F_x.D/2$ couple roue (N.m)

$2F_x = M.\gamma$ force de traction (N)

$w_m = K.w_r$ w_m : vitesse angulaire moteur; w_r : vitesse angulaire roue (rd/s)

$v = 2.w_r/D$ vitesse linéaire du robot (m/s)

L'équation (1) devient si on exprime i en fonction de γ et w_m en fonction de v_{max}

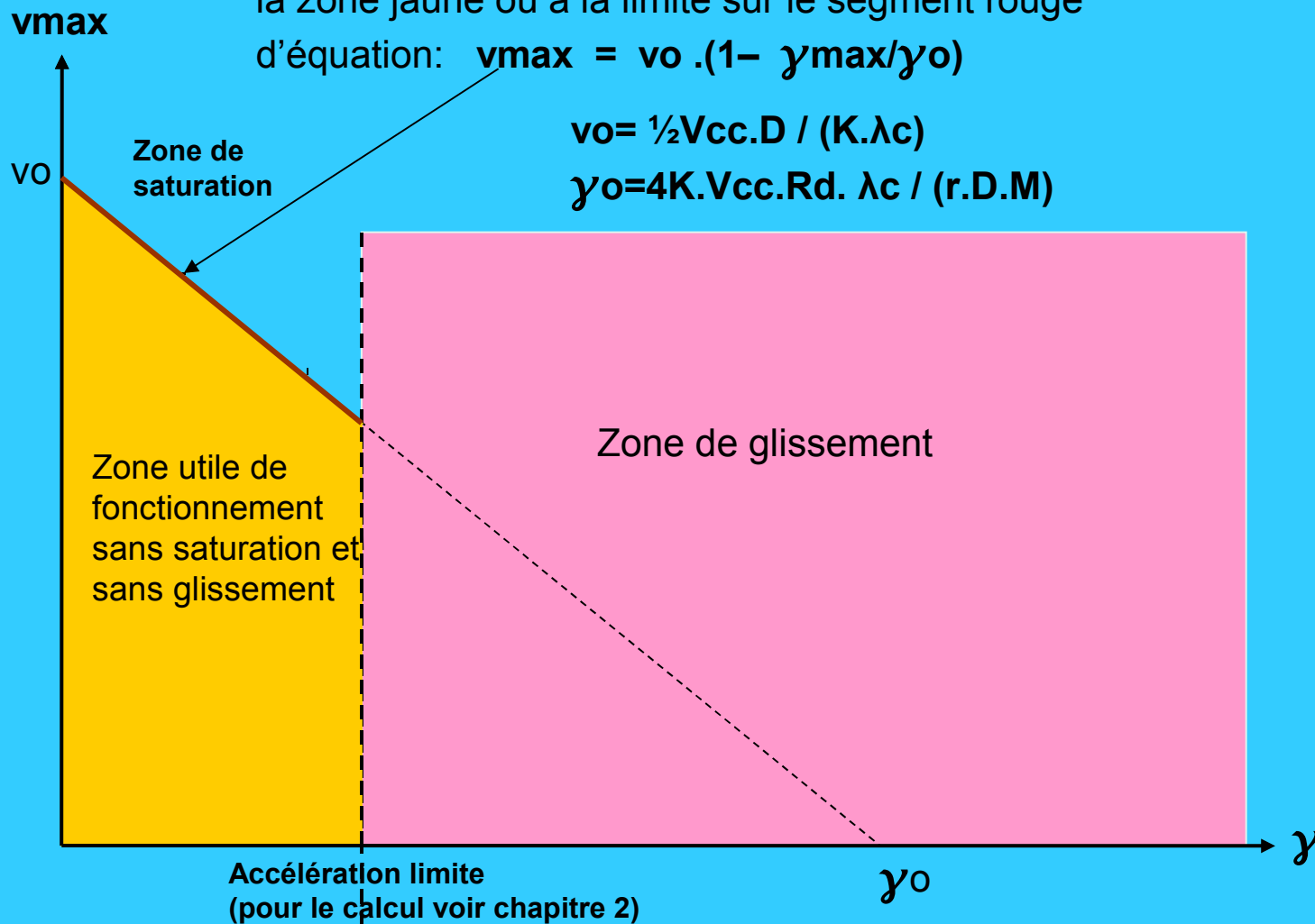
$V_{cc} = [(r + r_a).D.M / (4.K.R_d.\lambda_c)].\gamma + [2.\lambda_v.K/D].v_{max}$

Equation de la forme:

$V_{cc} = a.\gamma + b.v_{max}$

Equation d'une droite si on représente **v_{max}** en fonction de γ

Le couple de valeur (γ_{\max} , v_{\max}) doit être choisi dans la zone jaune ou à la limite sur le segment rouge d'équation: $v_{\max} = v_o \cdot (1 - \gamma_{\max} / \gamma_o)$



K: rapport de réduction du réducteur Rd: rendement du réducteur	Données réducteur
D: diamètre des roues motrices (m) M: masse du robot (kg)	Données Robot
λ_c : constante de couple (N.m/A) r : résistance d'induit (ohm)	Données moteur

Reprenons les 2 moteurs donnés en exemple au chapitre précédent

Données robot:

$M=15\text{kg}$ masse du robot
 $D=6\text{cm}$ diamètre des roues
 $k_a=1$ coefficient d'adhérence

Batterie de 27v

Moteur puissance 10w 24v

$r=7.55\text{ ohm}$
 $\lambda_c=43.8\text{ mN.m/A}$
vitesse limite 5500tr/mn

Réducteur $K=36$

Moteur puissance 20w 24v

$r=2.34\text{ ohm}$
 $\lambda_c=23.5\text{ mN.m/A}$
vitesse limite 11000tr/mn

Réducteur $K=20.25$

L'application des formules page précédente donne:

Moteur puissance 10w

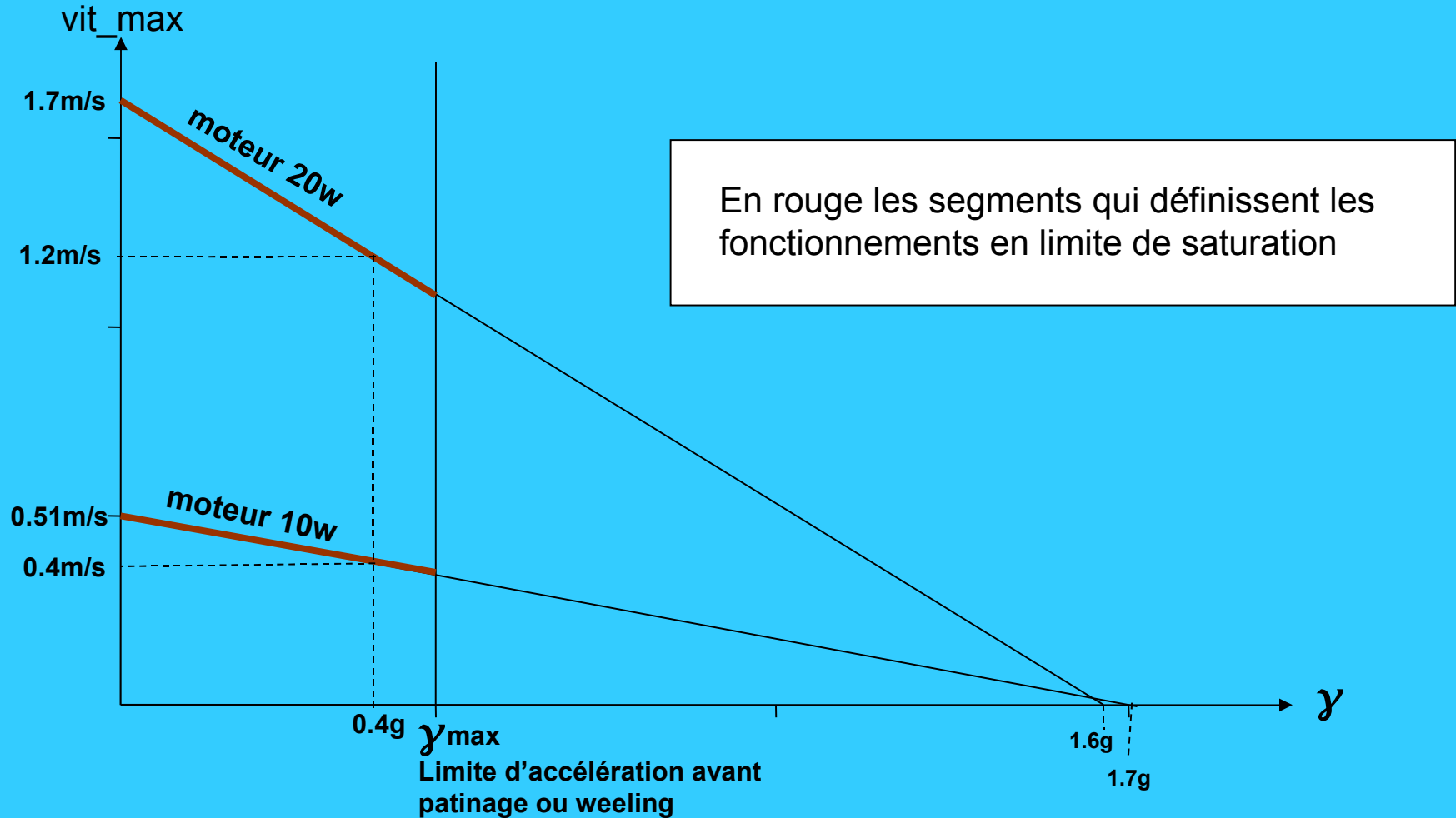
$v_o=0.51\text{m/s}$
 $\gamma_o=1.7\text{g}$

Moteur puissance 10w

$v_o=1.7\text{m/s}$
 $\gamma_o=1.6\text{g}$

Soit les droites de fonctionnement:

Vitesse et accélération maximum pour nos 2 moto réducteurs



Exemple:

Si on se fixe une accélération de **0.4g**:

Avec le moteur 20w, la vitesse ne doit pas dépasser **1.2m/s**

Avec le moteur 10w, la vitesse ne doit pas dépasser **0.4 m/s**

Chapitre 7

Essais avec enregistrements

Il s'agit de vérifier la validité des calculs précédents et en particulier s'il est bien vrai que la tension d'induit passe par un maximum en fin d'accélération, ce qui représente l'instant le plus critique en terme de saturation.

Essais avec enregistrements

Les essais ont été réalisés dans les conditions suivantes

Robot 2007 légèrement modifié:

M = 12.7 kg

Moteurs RE025 avec réducteur de rapport **20.25**

Valeurs de consigne:

Distance= 80cm

Accélération= 0.5g

Asservissement de position avec correcteur dérivé à peu près optimisé

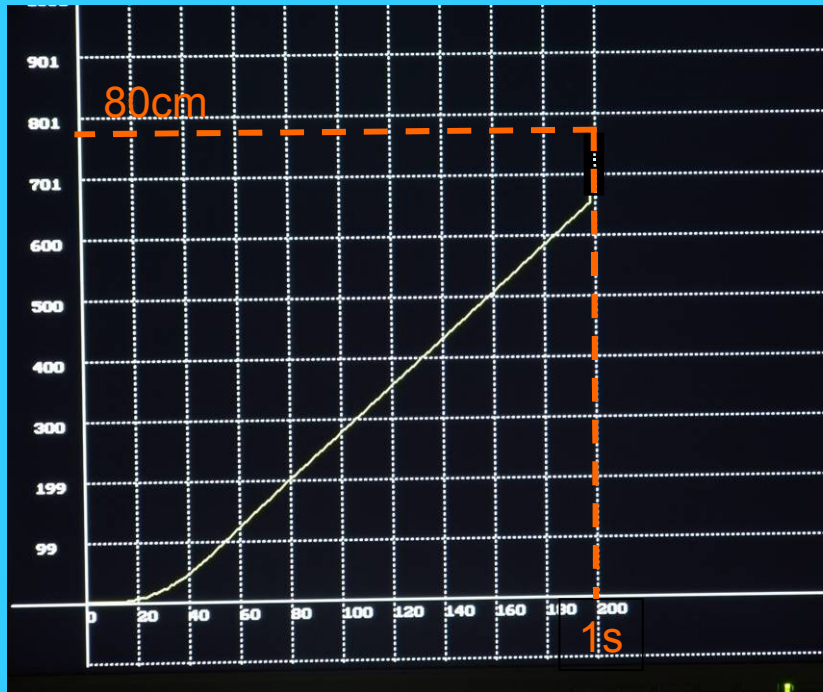
Essai de 2 vitesses: **0.8m/s et 1.4m/s**

Par application de la formule qui donne la vitesse max en fonction de γ , on trouve **$v_{\max}=1.5 \text{ m/s}$** pour l'accélération choisie de **0.5g** (Fonctionnement en limite de saturation).

Pour l'essai à 0.5g à la vitesse de 1.4m/s, ça bombarde sérieux 😊

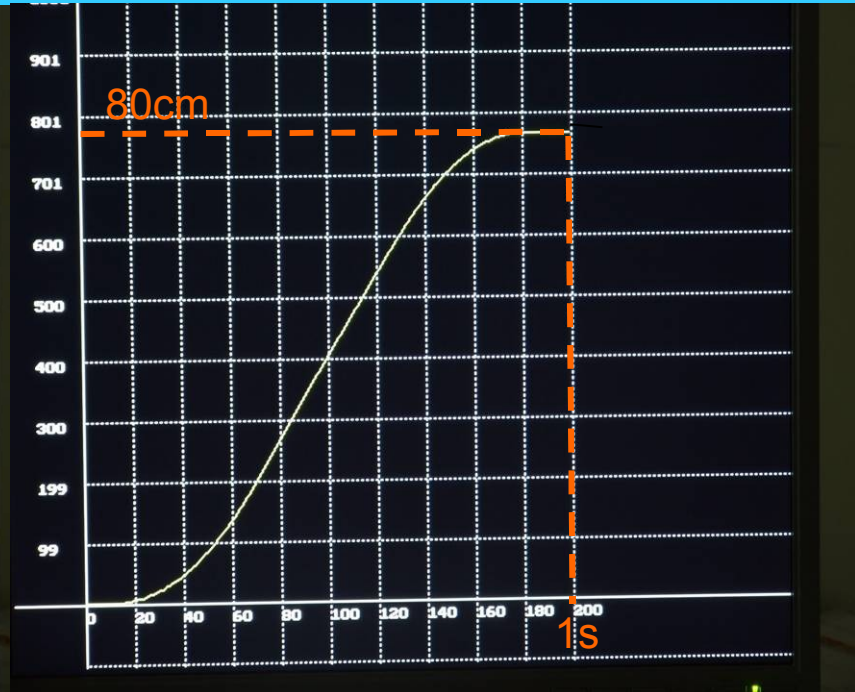
Distance parcourue fonction du temps

Toutes ces courbes ne sont pas des simulations, mais correspondent à des enregistrements qui utilisent un simple débiter écrit en C graphique.



Vitesse=0.8m/s

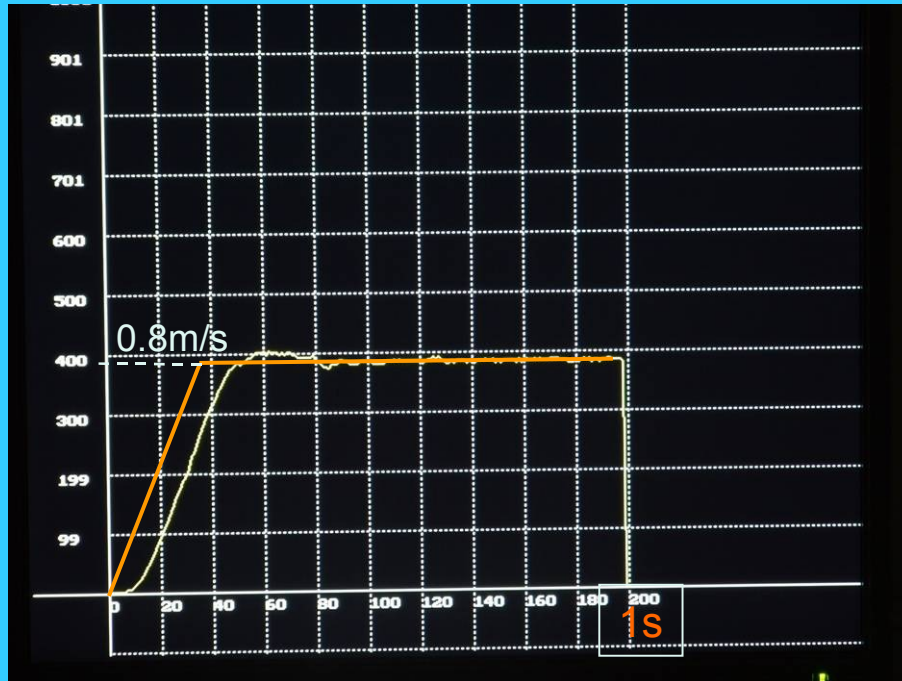
La distance a été parcourue en 1.2s
L'enregistrement s'arrête à 1s.



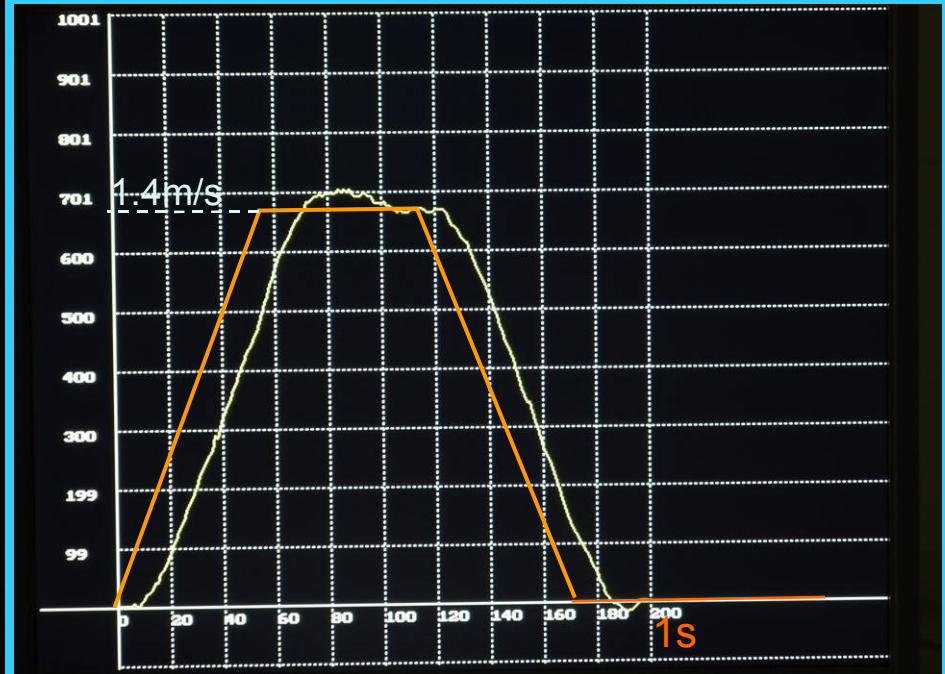
Vitesse=1.4m/s

Départ et freinage en douceur.
Pas de dépassement perceptible en fin de freinage
(En fait, il existe un très léger dépassement de quelques mm, invisible ici à cette échelle)
80 cm parcourus en à peine 1s !!

Évolution de la vitesse



Vitesse de 0.8m/s



Vitesse de 1.4m/s

En rouge, le profil trapézoïdal de consigne de vitesse (Rapporté à la main sur les photos)

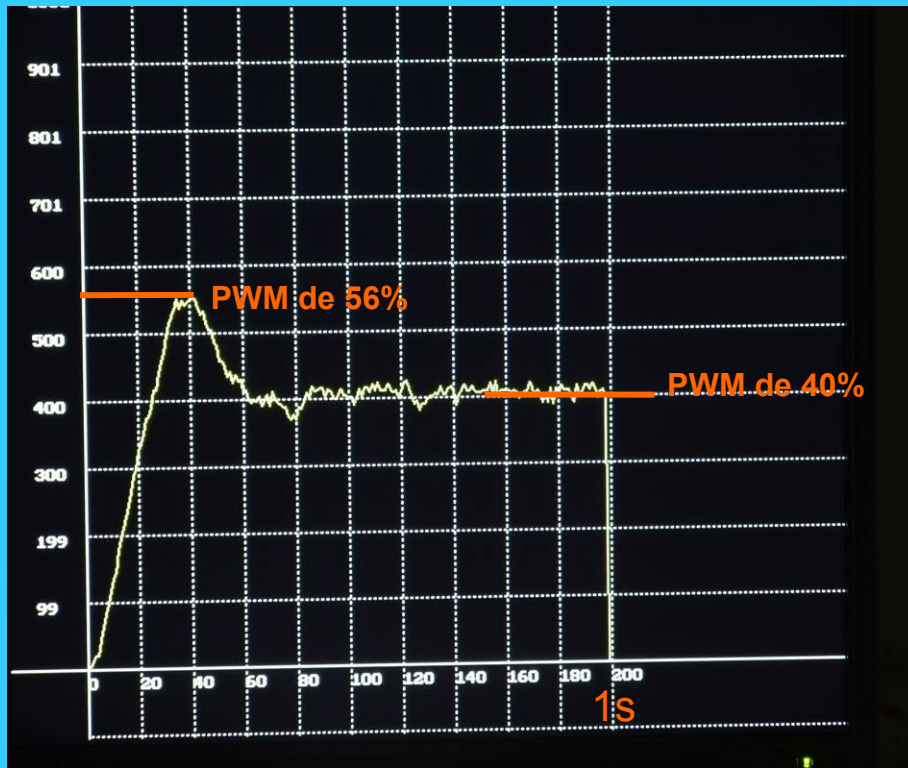
On remarque:

Une erreur de traînage pendant les phases accélération et freinage.

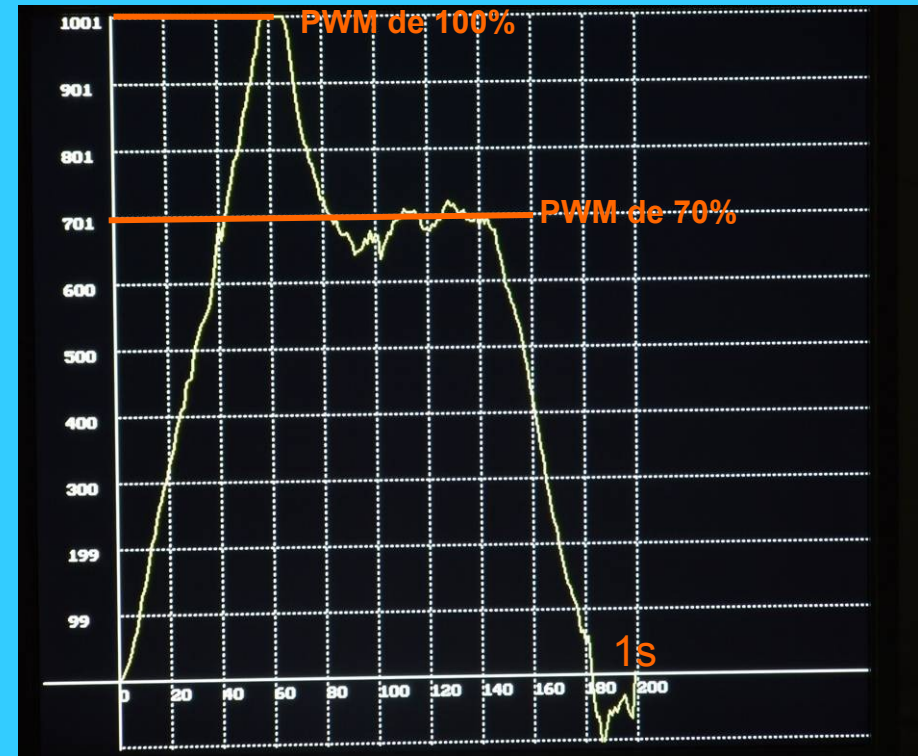
Un écart nul pendant la phase à vitesse constante.

Un léger dépassement de la vitesse en fin d'accélération et un très léger dépassement en fin de freinage

Evolution de la commande des moteurs



Vitesse de 0.8 m/s



Vitesse de 1.4m/s

Les essais confirment que la tension d'induit passe bien par son maximum à la fin de la phase accélération.

A 1.4 m/s, on commence à saturer alors qu'il était prévu 1.5m/s (m'enfin).

Le bruit sur la commande pendant la phase à vitesse constante est inéluctable (dû en partie au bruit de quantification du terme dérivé). et sans conséquence sur la distance (filtrage par la constante de temps mécanique).

Chapitre 8

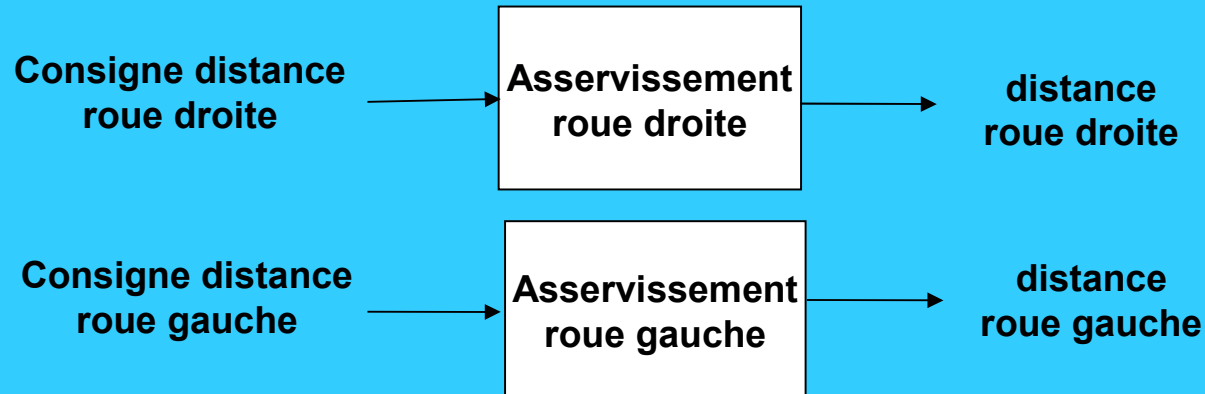
Asservissement

L'essentiel sur le sujet a été largement évoqué à l'occasion d'échanges à travers le forum et d'articles disponibles sur les sites d'équipes participantes.

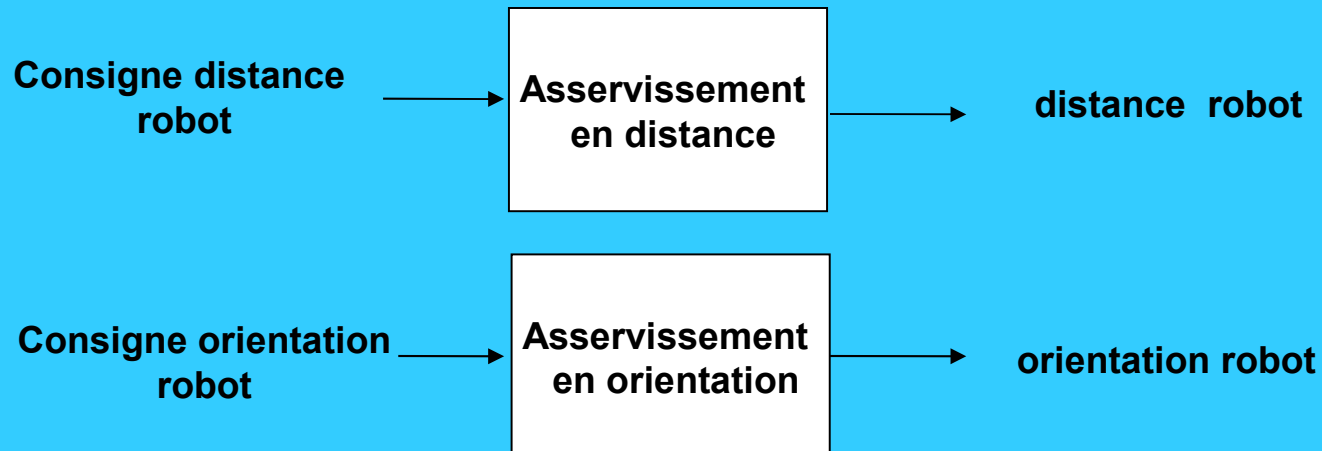
On se contentera de reprendre certains de nos documents déjà publiés sur le sujet, d'insister sur certains points et de commenter quelques résultats expérimentaux.

Les 2 principes de l'asservissement de position d'un robot

Principe1 (asservissement par roue)



Principe2 (asservissement polaire)



On ne revient pas sur les mérites de l'asservissement polaire, mais il faut tempérer l'idée qui consisterait à croire que ce choix est indispensable pour atteindre un bon niveau de performance.

Un robot utilisant l'asservissement de type 1 bien réglé, sera toujours supérieur en performances et fiabilité à un robot en asservissement polaire mal maîtrisé.

Et il faut tenir compte du fait que des composants du genre **LM629** permettent de réaliser un asservissement de type 1 clef en main, ce qui soulage le concepteur de cette tâche en lui permettant de se consacrer davantage sur le reste.

A l'époque des PMI (Petits Mobiles Intelligents), autorisés par le règlement, nous utilisions cette technique avec succès. Certains anciens au passé glorieux se souviennent de PMI traversant le terrain à 2m/s ! (pas apprécié par tous 😊)

De toute façon, que l'asservissement soit intégré dans un composant ou développé par logiciel, il reste un problème commun aux 2 techniques, c'est le choix des paramètres qui conditionnent l'asservissement. A savoir les gains et les seuils d'écrtage éventuels des correcteurs PID. Il est clair q'un LM629 ne va pas inventer ces réglages et il faudra lui fournir ces valeurs.

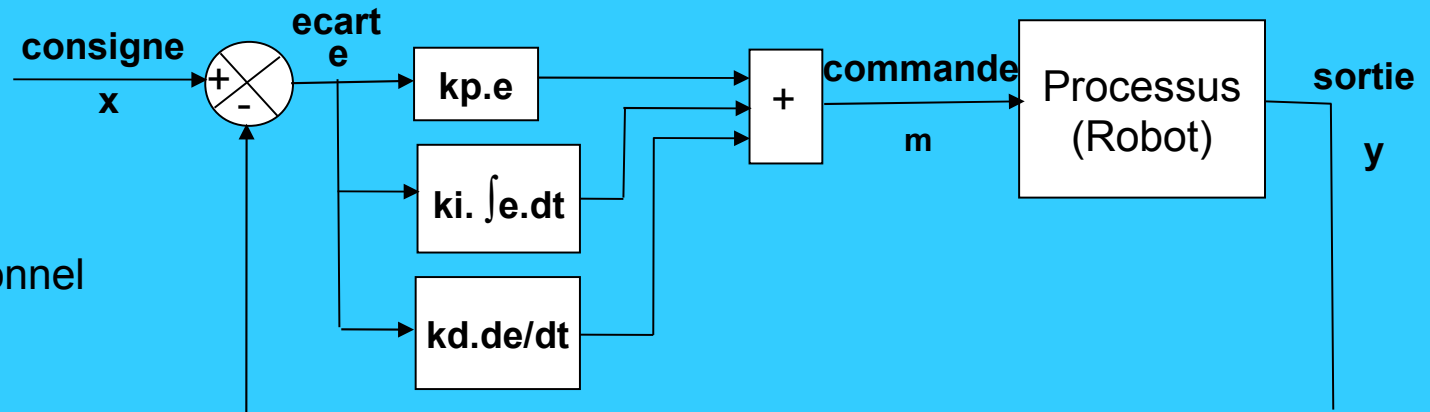
Dans la présentation qui suit, les principes évoqués sont généraux et valables dans les 2 techniques mais les exemples sont pris en asservissement polaire.

Asservissement analogique avec correcteur PID

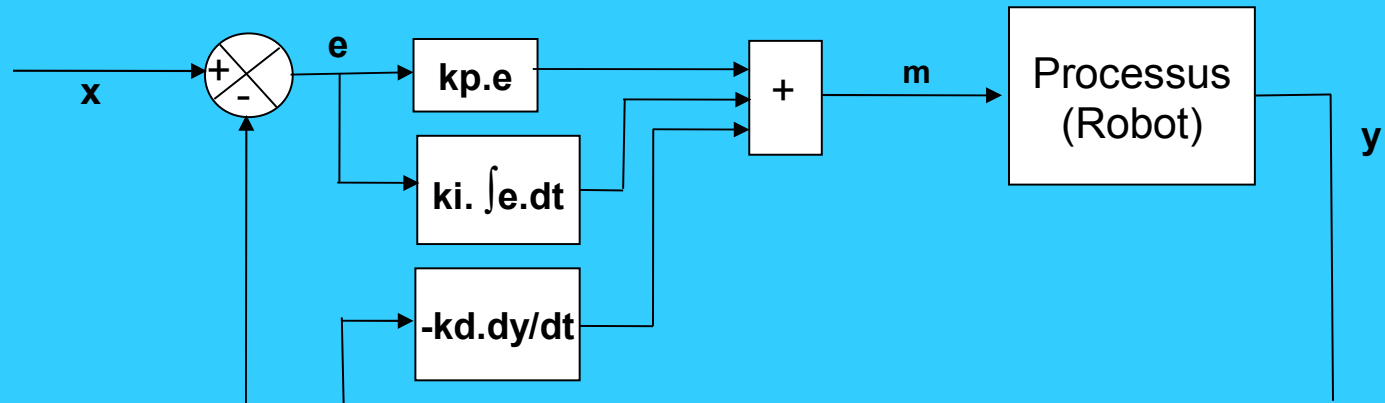
Présentons les 2 structures possibles du correcteur PID en introduisant le vocabulaire

PID classique

kp: gain proportionnel
ki: gain intégral
kd: gain dérivé



PID avec contrôle dérivé de la sortie

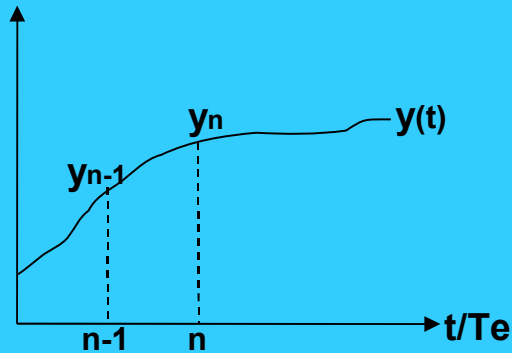
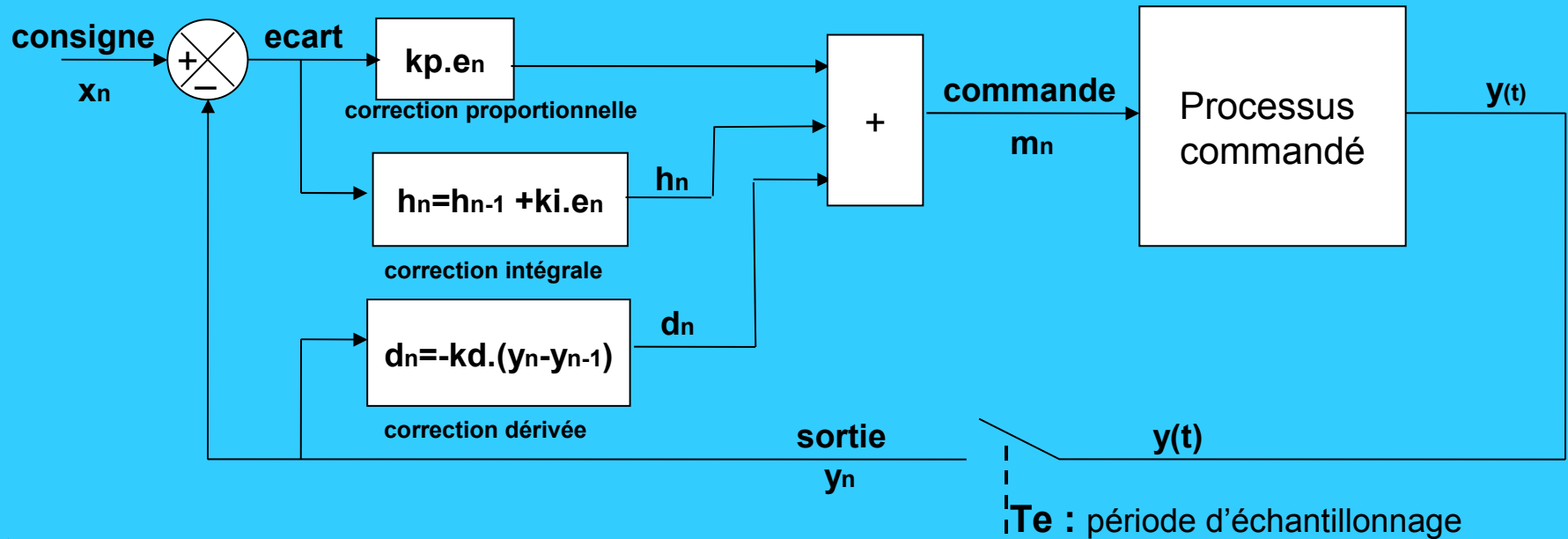


Dans le PID classique, terme dérivé = $kd.de/dt = kd.(dx/dt - dy/dt)$

Dans le PID modifié, terme dérivé = $-kd.dy/dt$ (On oublie dx/dt)

Asservissement échantillonné avec correcteur PID numérique

(présentation avec contrôle dérivé de la sortie)



commande:

terme proportionnel:

terme intégral:

terme dérivé:

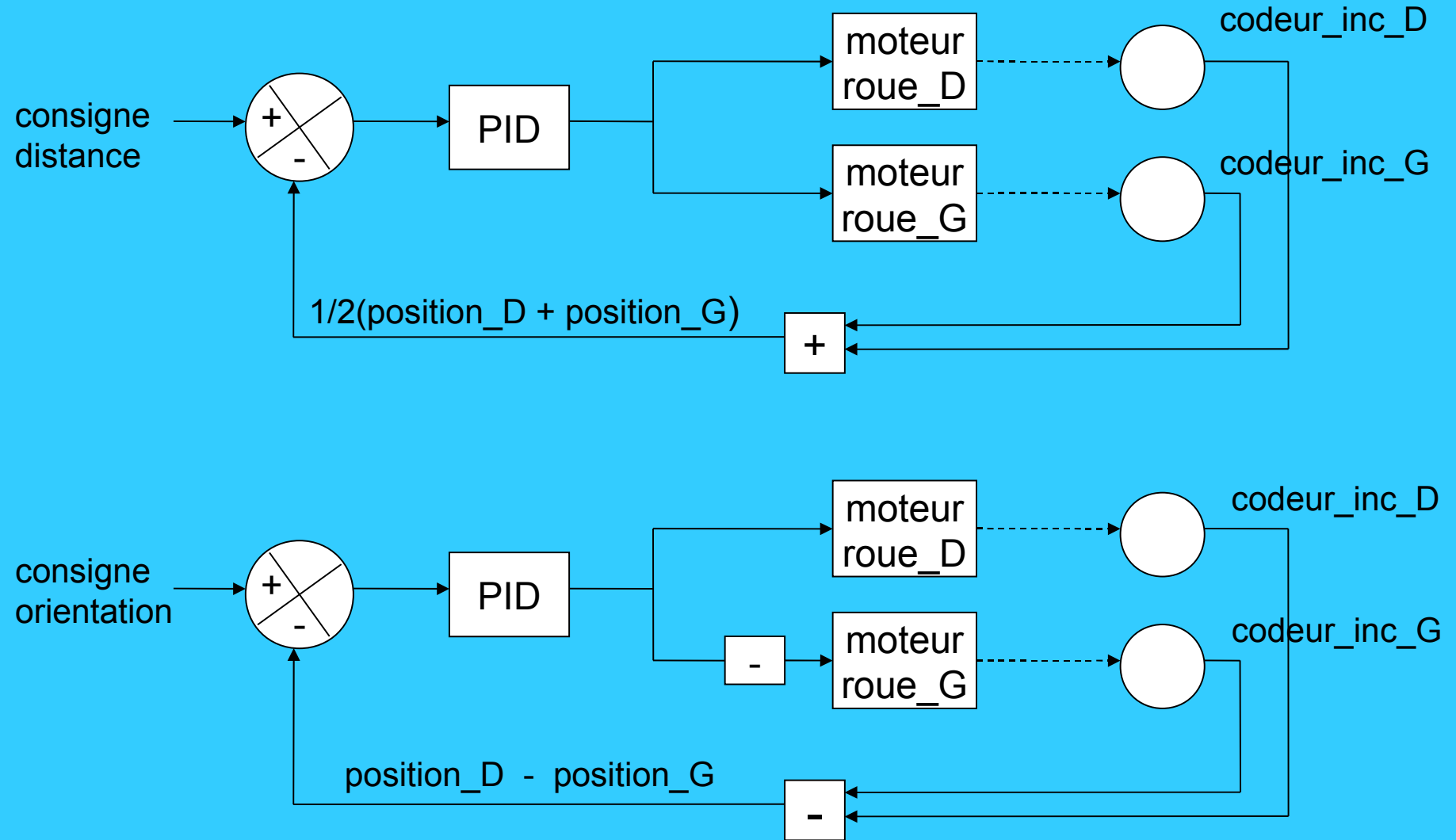
$$m_n = kp.e_n + h_n + d_n$$

$$kp.e_n$$

$$h_n = h_{n-1} + ki.e_n$$

$$d_n = -kd.(y_n - y_{n-1})$$

Principe de l'asservissement polaire



Asservissement en distance

Pour connaître la distance parcourue par le robot, on va sommer la distance effectuée par les deux roues codeuses. De cette façon, on obtient la distance parcourue par le centre de l'essieu.

L'asservissement en distance consiste à envoyer à chaque période d'échantillonnage une commande aux moteurs fonction de l'écart entre la distance réelle et la distance désirée (appelée consigne_distance)

Algorithme de l'asservissement en distance

Sans terme intégral et avec contrôle dérivé de la sortie

```
distance = (roue_d + roue_g) / 2
vitesse = (vitesse_roue_d + vitesse_roue_g) / 2
ecart = consigne_distance - distance
commande = ecart * GAIN_PROPORTIONNEL_DISTANCE
commande_distance = commande - GAIN_DERIVE_DISTANCE * vitesse
commande_roue_D = commande_distance
commande_roue_G = commande_distance
```

Asservissement en orientation

L'orientation du robot est obtenue par différence de la distance parcourue par les 2 roues codeuses.

A chaque période d'échantillonnage, cette orientation est comparée à la consigne orientation.

A partir de l'écart correspondant, on calcule la commande orientation qui est envoyée aux 2 moteurs (avec changement de signe sur le moteur gauche).

Algorithme de l'asservissement en orientation

```
orientation = roue_D – roue_G  
vitesse_orientation=vitesse_roue_D – vitesse_roue_G  
ecart = consigne_orientation - orientation  
commande = ecart * GAIN_PROPORTIONNEL_ROTATION  
commande_rotation = commande - GAIN_DERIVE_ROTATION*vitesse_orientation  
commande_roue_D= commande_rotation  
commande_roue_G= - commande_rotation
```

Algorithme complet en asservissement polaire

```
distance = (roue_d + roue_g) / 2
vitesse = (vitesse_roue_d + vitesse_roue_g) / 2
ecart = consigne_distance - distance
commande = ecart * GAIN_PROPORTIONNEL_DISTANCE
commande_distance = commande - GAIN_DERIVE_DISTANCE * vitesse

orientation = roue_D - roue_G
vitesse_orientation = vitesse_roue_D - vitesse_roue_G
ecart = consigne_orientation - orientation
commande = ecart * GAIN_PROPORTIONNEL_ROTATION
commande_rotation = commande - GAIN_DERIVE_ROTATION * vitesse_orientation

commande_roue_D = commande_distance + commande_rotation
commande_roue_G = commande_distance - commande_rotation
```

(Des écrêtages éventuels sont à prévoir)

Changement de système d'unité

Système d'unité SI (Système International)

Distance:	d	distance parcourue:	(m)
Vitesse:	vit :	distance parcourue par seconde	(m/s)
Accélération:	acc :	variation de vit par seconde	(m/s ²)

Système d'unité robot

Distance:	d_rob :	nombre d'impulsions codeur
Vitesse:	vit_rob :	nombre d'impulsions par période Te
Accélération:	acc_rob :	variation de vit_rob par période Te

Formules de passage

$$\begin{aligned}d_{\text{rob}} &= K * d \\ vit_{\text{rob}} &= (K * Te) * vit \\ acc_{\text{rob}} &= (K * Te^2) * acc\end{aligned}$$

$$K = (N * Mult) / (\pi * D)$$

N: nb d'impulsion du codeur

Mult: coefficient multiplicateur (1 ou 2 ou 4)

D: Diamètre roue codeuse

Te: période d'échantillonnage

Exemple

N=1000

Mult=4 (utilisation de tous les fronts)

D=6 cm

Te=5 ms

K= 21220

K*Te = 106

K*Te²= 0.53

Reprenons l'exemple précédent

N=1000

Mult=4

D=6 cm

Te=5 ms

K= 21220

K*Te = 106

K*Te²= 0.53

d_rob = 21220*d

vit_rob = 106*vit

acc_rob= 0.53*acc

Si par exemple on veut une vitesse de 1m/s avec une accélération de 0.3g ça donne:

vit_rob = 106 soit une variation de 106 impulsions codeur pendant 5 ms

acc_rob= 0.53*3= 1.6 soit une variation de vit_rob de 1.6 pendant 5 ms

Cet exemple montre qu'il va falloir travailler en variables flottantes ce qui peut poser des problèmes de temps de calcul, à moins d'approximer 1.6 par 1 ou 2 soit une approximation de 25 % sur la valeur de l'accélération.

Une solution pour rester en variables entières est d'introduire dans le logiciel un coefficient multiplicateur sur la constante K par exemple 8. Les formules deviennent:

d_rob = 169760*d

vit_rob = 848*vit

acc_rob = 4.24*acc

Si on reprend notre exemple avec une accélération de 0.3g, ça donne:

acc_rob = 4.24*3 = 12.72 qu'on pourra approximer par **12**, sans état d'âme cette fois.

Transposition des fonctions du temps

Il s'agit de transposer les fonctions du temps distance, vitesse, accélération d'un système d'unité à l'autre.

Pour passer du système SI au système robot, il suffit de remplacer t par n

Pour passer du système robot au système SI, il suffit de remplacer n par t

($n=t/T_e$: nombre de périodes d'échantillonnage)

Exemple: Pour les phases accélération et freinage:

Système SI

$$\begin{aligned}d &= \frac{1}{2} \cdot \text{acc} \cdot t^2 \\v &= \text{acc} \cdot t \\v_2^2 - v_1^2 &= 2 \cdot \text{acc} \cdot d\end{aligned}$$



Système robot

$$\begin{aligned}d_{\text{rob}} &= \frac{1}{2} \cdot \text{acc}_{\text{rob}} \cdot n^2 \\v_{\text{rob}} &= \text{acc}_{\text{rob}} \cdot n \\v_{\text{rob}2}^2 - v_{\text{rob}1}^2 &= 2 \cdot \text{acc}_{\text{rob}} \cdot d_{\text{rob}}\end{aligned}$$

Phase à vitesse constante

$$d = v \cdot t$$



$$d_{\text{rob}} = v_{\text{rob}} \cdot n$$

Quelques résultats expérimentaux

Les tests sont effectués avec le robot dans la version 12.7 kg.

La fonction utilisée pour les tests est la suivante:

tout_droit_avec_freinage(50*COEF_D, 0.8*COEF_V, 4.2*COEF_ACC);

Ce qui impose les consignes cinématiques suivantes:

distance à parcourir: **50 cm**

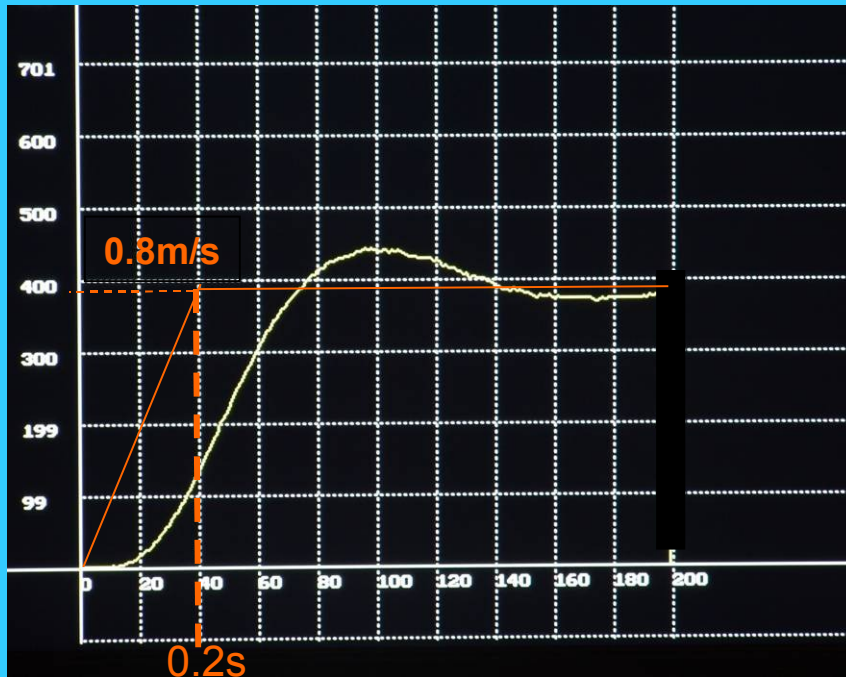
vitesse: **0.8 m/s**

accélération: **4.2 m/s²**

Le correcteur d'asservissement est de type proportionnel et dérivé. (Pas de terme intégral).

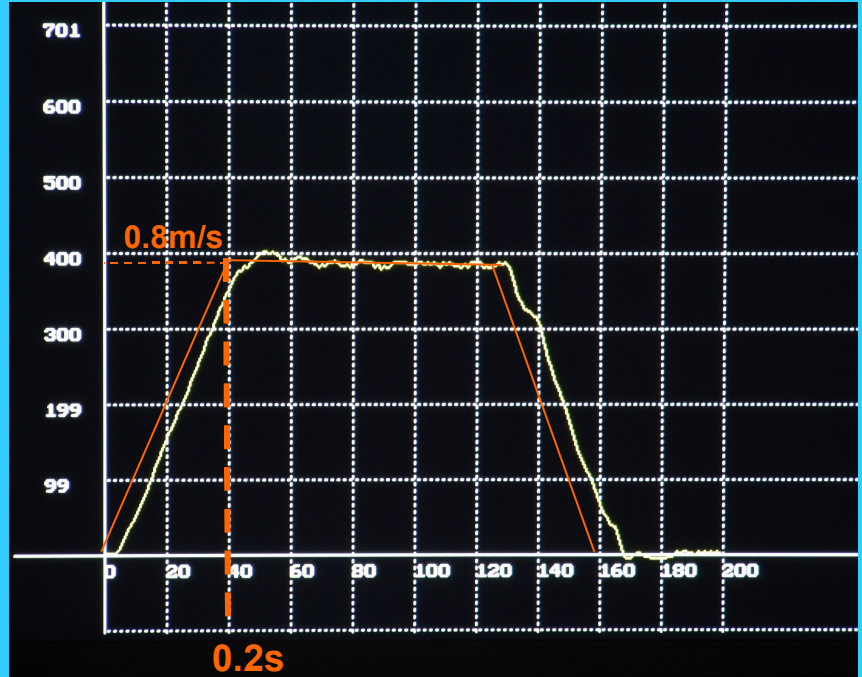
L'intérêt du terme dérivé

On représente ici, l'évolution de la vitesse que l'on compare à sa consigne trapézoïdale.



Correcteur proportionnel simple

$k_p=0.1$



Correcteur proportionnel et dérivé

$k_p=0.5$ $k_d=7$

L'intérêt du terme dérivé apparaît de façon spectaculaire.

Noter le **facteur 5** sur la valeur du gain proportionnel lorsqu'on ajoute le terme dérivé.

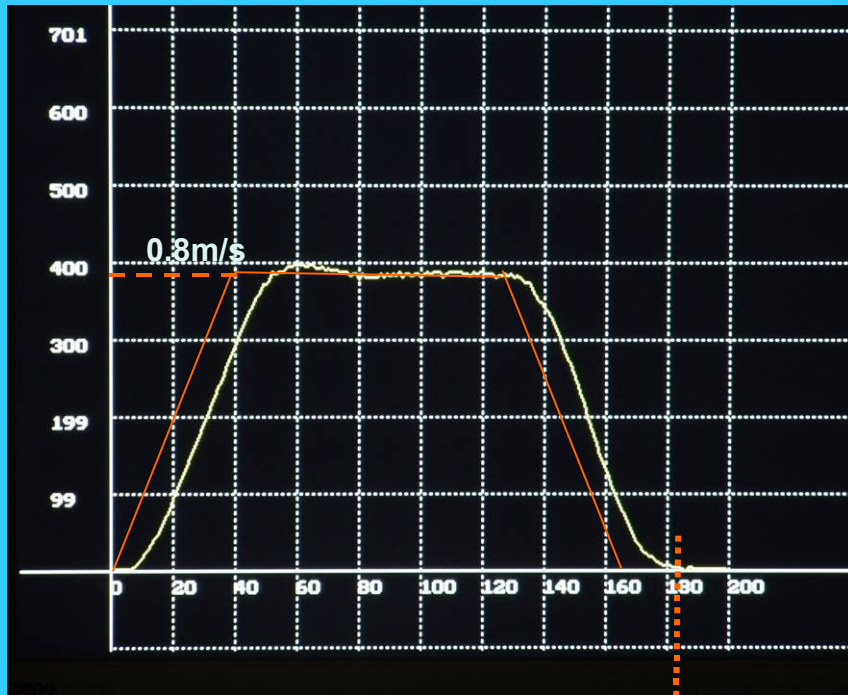
Il faut signaler que l'échelle des temps est la même dans les 2 cas.

(La distance de déplacement a due être rallongée avec le correcteur proportionnel du fait de son temps de montée, ce qui explique qu'on ne voit pas le freinage)

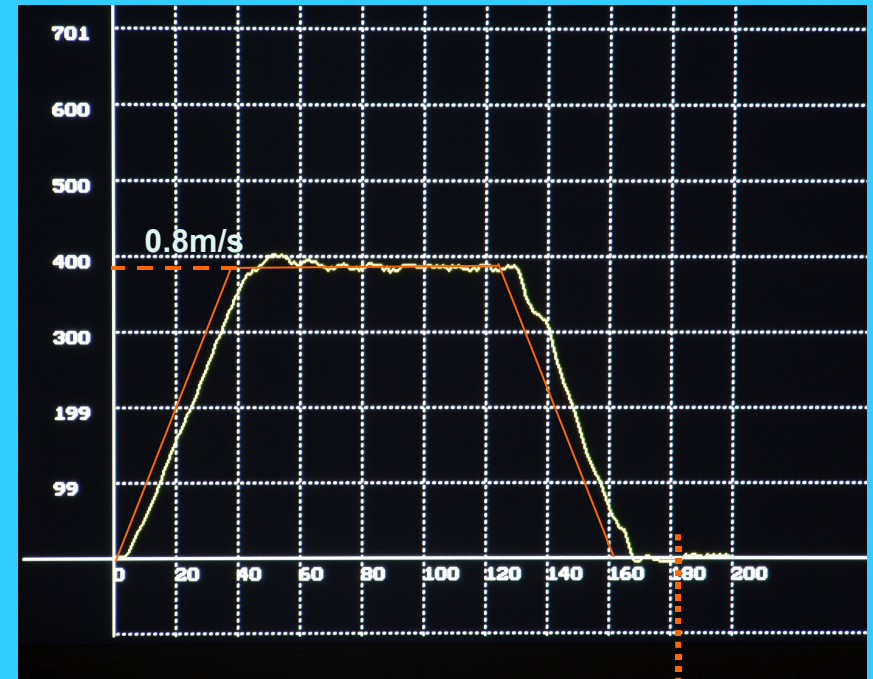
Comparaison entre correcteur avec contrôle dérivé de la sortie et correcteur proportionnel-dérivé classique.

On essaie les 2 correcteurs dans les mêmes conditions, chacun des 2 correcteurs ayant été optimisé en termes de gains proportionnel et dérivé.

Courbes de vitesse comparatives



sortie de la fonction à 0.8s



Sortie de la fonction à 0.8s

Correcteur avec contrôle dérivé de la sortie

Réglages du correcteur : $k_p=0.7$ $k_d=5.2$

Correcteur proportionnel et dérivé classique

Réglages du correcteur : $k_p=0.5$ $k_d=7$

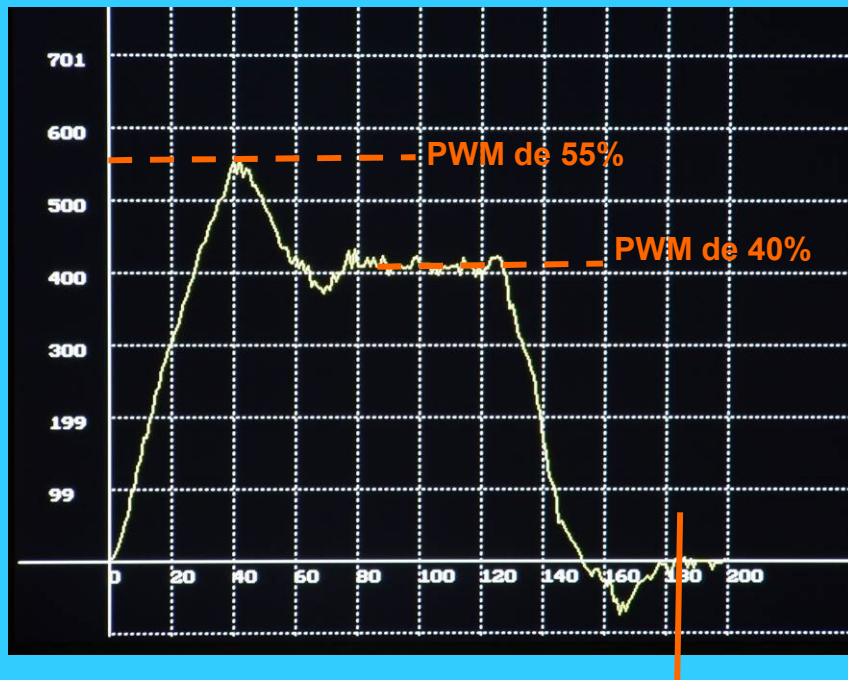
Le correcteur par contrôle dérivé de la sortie permet une commande plus en douceur.

Le correcteur classique semble plus performant en terme d'asservissement avec des erreurs de traînage plus faibles. Par contre la vitesse est plus bruitée particulièrement en fin de freinage.

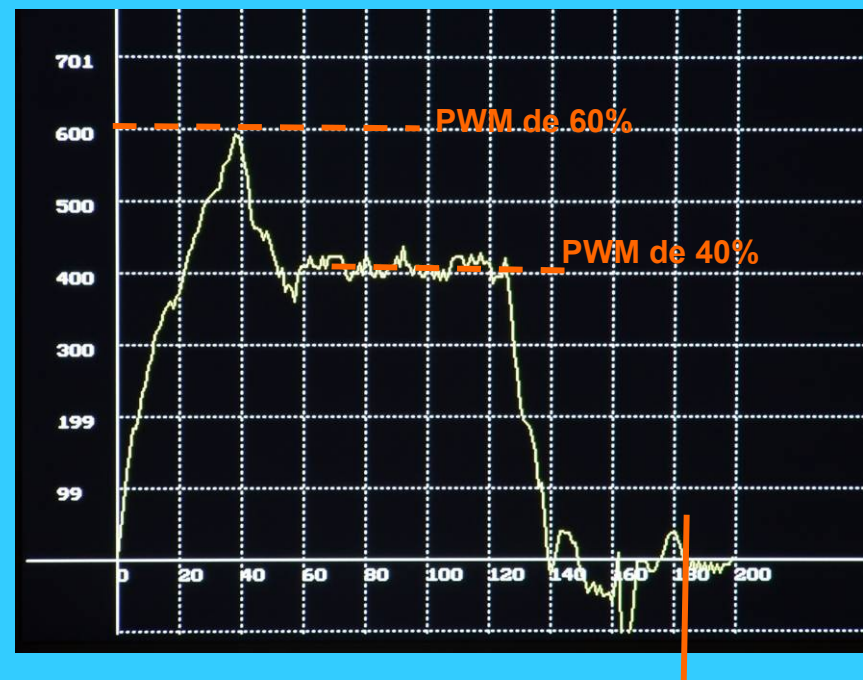
Comme la sortie de la fonction attend que la vitesse soit stabilisée à zéro, les durées de déplacement sont rigoureusement égales.

Courbes de commande comparatives

Ces courbes sont représentatives des tensions appliquées aux induits des moteurs



Sortie de fonction: 0.8s



Sortie de fonction: 0.8s

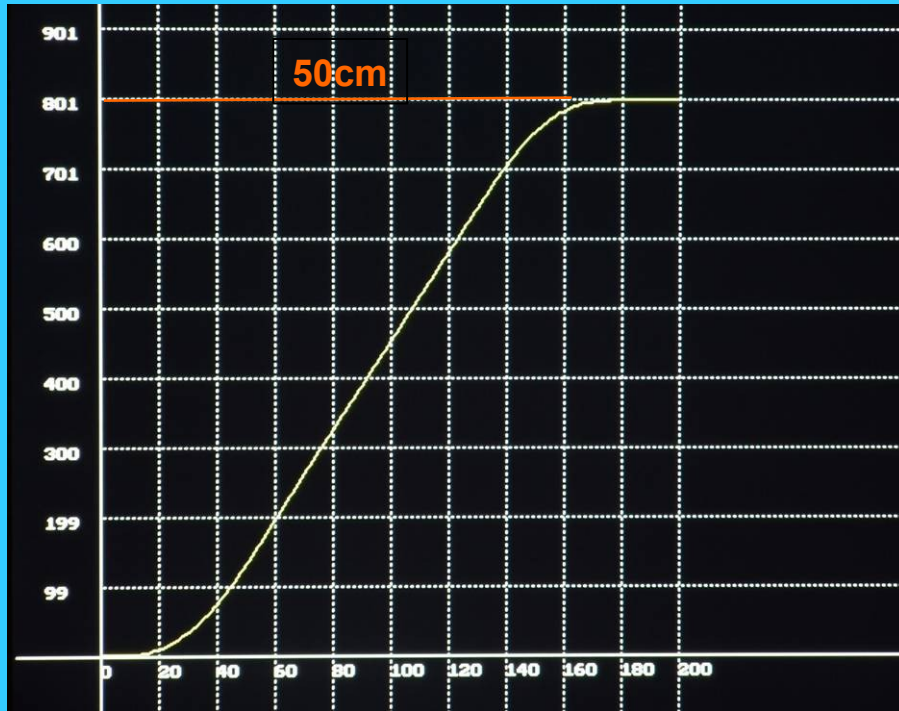
Correcteur avec contrôle dérivé de la sortie

On retrouve le caractère plus bruité du correcteur classique. En fin de freinage ça chahute pas mal.

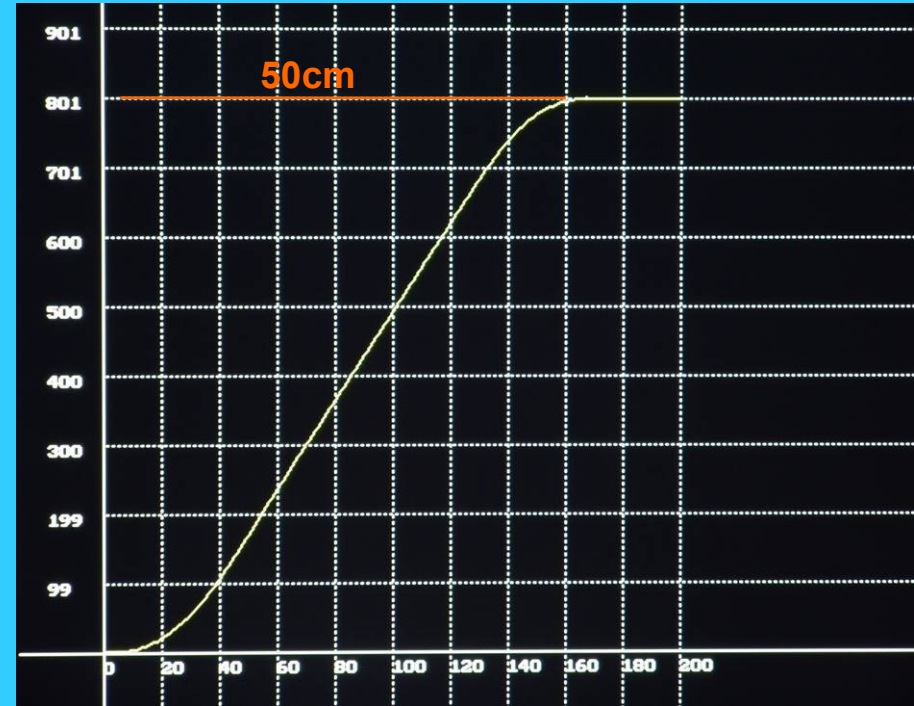
Le niveau de commande maximum est légèrement supérieur avec le correcteur classique. Ce qui paraît logique car l'asservissement, plus nerveux demande plus de tension.

Correcteur PD classique

Courbes de distance comparatives



Correcteur avec contrôle dérivé de la sortie

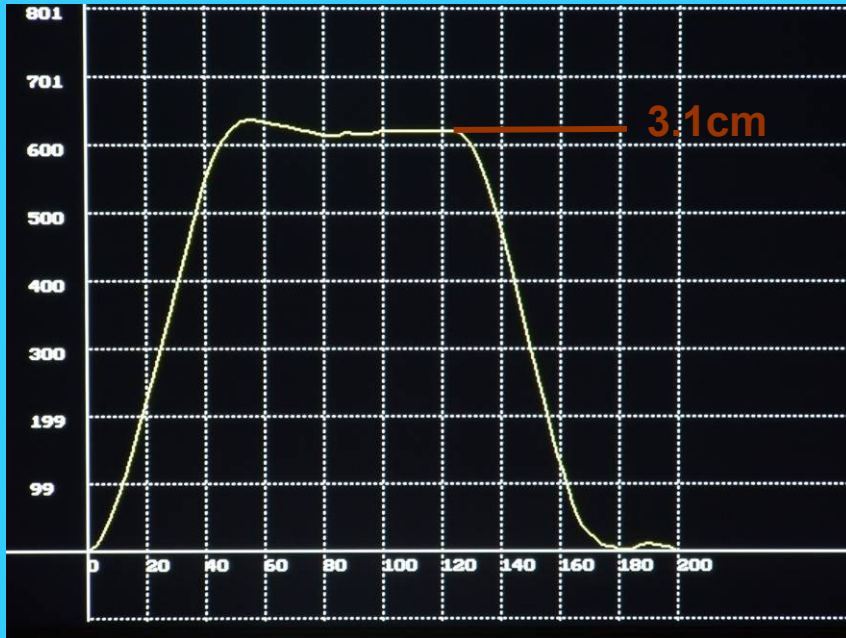


Correcteur PD classique

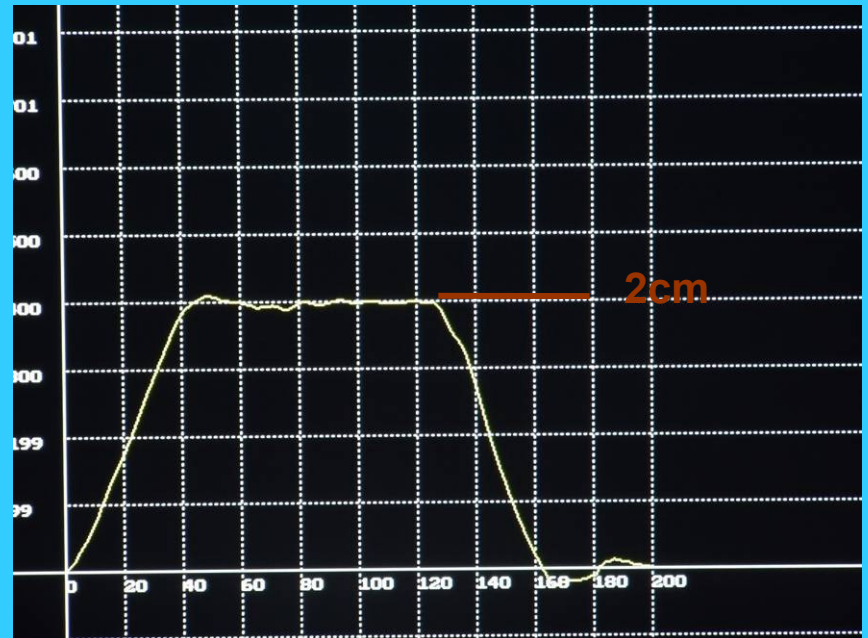
On retrouve des phases accélération et freinage un peu plus rapides avec le correcteur classique. Et pourtant la consigne accélération est la même (4.2 m/s^2).

Le léger chahut en fin de freinage pour le correcteur classique n'est pas visible à cette échelle. Ca joue sur quelques mm et effectivement on perçoit un léger frémissement par observation directe du robot.

$$\text{ecart} = \text{consigne_distance} - \text{distance}$$



Contrôle dérivé de la distance



Contrôle dérivé de l'écart

A propos du terme intégral

Tout a été dit sur le forum à ce sujet et liberté est laissée à chacun de faire son choix.

Ce qu'il faut retenir d'un point de vue théorique:

Les vertus du terme intégral:

- > améliore la précision en régime établi
- > réagit efficacement aux perturbations

A mettre au passif:

- > tendance à déstabiliser la boucle
- > introduit le phénomène de windup (largement évoqué sur le forum)

Il se trouve qu'il est très prisé par les industriels dont les processus fonctionnent plus souvent en régulateur qu'en suiveur et ses vertus face aux perturbations sont précieuses dans ces conditions.

Dans un robot EUROBOT, son emploi est plus discutable.

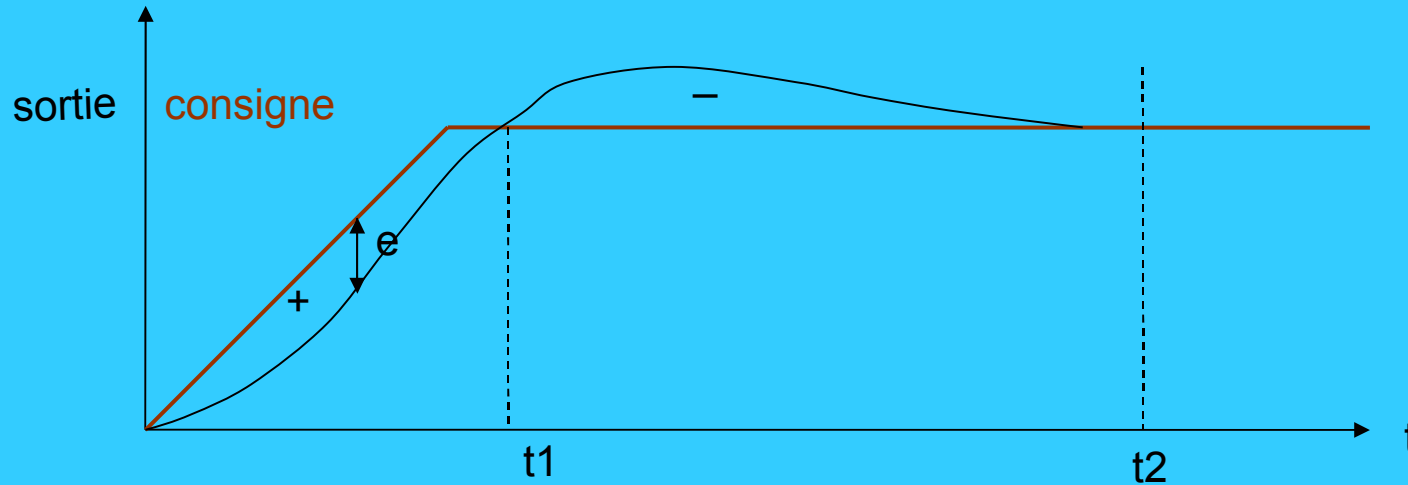
Vous connaissez notre point de vue sur le sujet:

→ Le windup a tendance à créer des réactions brutales et incontrôlées quand cesse la perturbation. C'est vrai qu'il existe des systèmes antiwindup.

→ Quand on parle de perturbations à l'Eurobot, il s'agit de blocage (adversaire ou obstacle). Et si le moto réducteur est bien choisi (voir le chapitre qui évoque le problème), le terme intégral n'apporte rien de plus.

→ Quand à l'effet déstabilisant, il semble inéluctable, et un raisonnement très simple peut le démontrer:

On suppose un profil trapézoïdal pour la distance afin de simplifier la figure



$e = \text{consigne} - \text{sortie}$ (e: écart de boucle)

$h = k_i \int e \cdot dt$ (h: terme intégral)

Supposons que l'écart s'annule en régime établi, robot à l'arrêt. (Ce qui est le cas dans un robot Eurobot.)

Si pour $t > t_2$, l'écart de boucle est nul, le terme intégral h est nécessairement nul, sinon une tension est appliquée aux moteurs et le robot n'est pas à l'arrêt.

La valeur de h à l'instant t_2 est donc nulle. Ce qui suppose que les 2 aires représentées par les signes + et - sur la figure s'annulent.

Comme de 0 à t_1 la sortie est inférieure à la consigne, à partir de t_1 , la sortie devient supérieure à la consigne, d'où un dépassement inéluctable.

Dans beaucoup de processus industriels les dépassements ne sont pas forcément gênants, (voir recherches). Mais dans un robot Eurobot, un dépassement en fin de freinage, signifie que le robot va reculer. ☹

Chapitre 9

Quelques questions réponses:

A la relecture après quelques temps de récupération de l'effort, je me suis glissé dans la peau du lecteur en essayant d'anticiper sur d'éventuelles questions.

C'est tellement plus simple de répondre aux questions quand on se les pose soi-même. 😊
Ce qui n'empêche pas de rester ouvert à de vraies questions posées par de vrais lecteurs.

Question 1

Dans les 7 premiers chapitres, il est toujours question de déplacements en distance. Pourquoi les problèmes de rotation n'ont pas été abordés?

Réponse 1

Il y a une bonne et une mauvaise raison.

La mauvaise raison, c'est que l'étude cinématique de la rotation est infiniment plus complexe que la translation.

L'énergie mécanique d'un robot en translation correspond à son énergie cinétique égale à $\frac{1}{2}M.v^2$. Pour un robot en rotation, son énergie cinétique vaut $\frac{1}{2}J.w^2$.

Toute la différence est là. La masse M , tu peux facilement l'évaluer, il suffit d'une balance. Pour le moment d'inertie $J = \sum m.r^2$ c'est un autre problème. Il n'existe pas de balance à moment d'inertie ☺. Et puis le comportement dynamique du robot, si on s'intéresse aux transferts de masse devient un vrai casse-tête.

La bonne raison, car il faut bien se donner bonne conscience, c'est que les rotations dans un robot Eurobot posent beaucoup moins de problèmes que les déplacements.

Le robot se trouve placé dans un environnement hostile. Il doit contrôler en permanence des obstacles fixes (bordures, totem, bac à pile...) et un obstacle mobile (l'adversaire). La vulnérabilité du robot face à ces dangers potentiels est beaucoup plus grande en déplacement qu'en rotation. En déplacement un robot va devoir adapter sa vitesse en permanence. On n'aborde pas une bordure à la même vitesse que lorsqu'on se déplace plein champ. (Quoique pour certains...). On n'aborde pas non plus l'adversaire à sa vitesse max (Quoique pour certains...). Pour la rotation les problèmes des risques de blocage sont réduits. Si le robot est cylindrique et tourne autour de son centre, les risques sont même nuls. On pourra en conséquence adopter une valeur de vitesse angulaire unique et valable pour toute la durée du match. Idem pour l'accélération. Ce qui simplifie les problèmes de choix pour la rotation.

Question 1:

Il est dit, diapo4, que $F_x=0$ quand l'accélération est nulle. Ce qui veut dire que le robot avance à vitesse constante et que la force de traction est nulle. J'en déduis que si les moteurs ne poussent plus le robot, ils ne servent plus à rien et on peut imaginer un robot à 1m/s sans moteur.

Réponse 2:

Déjà les moteurs ont permis d'accélérer le robot à cette vitesse de 1 m/s. Ensuite dans la phase à vitesse constante, effectivement la force de traction exercée par les roues est nulle (L'équation fondamentale de la mécanique $F_x=M.\gamma$ est incontournable) mais les moteurs doivent fournir un couple pour compenser les pertes par frottement (balais de collecteur, pignons de réducteur, roulements...) et on n' imagine pas un robot à 1m/s sans perte.

Question 3:

Diapo 5, à propos du coefficient d'adhérence, il est dit que sa valeur peut dépasser la limite théorique de 1. Alors les théoriciens se planteraient?

Réponse 3:

Ca c'est déjà vu ☺ , mais en l'occurrence ce n'est pas le cas. En fait la limite $k_a=1$, s'applique à des solides indéformables. Dans le cas de pneus sur bitume ou bois peint, apparaît un phénomène d'indentation. Le pneu en contact avec le sol se déforme et s'engrène dans les rugosités du terrain, d'autant plus que le degré shore du pneu diminue. Ceci explique cela.

Question 4:

Dans la mesure du coefficient d'adhérence par la méthode du sceau suspendu, tu m'as fait peur avec cette histoire de température moteur. Si pendant que je charge le sceau, je maintiens un doigt sur l'un des moteurs et si j'arrête quand ça brûle, qu'est-ce que t'en penses?

Réponse 4:

J'en pense que tu vas commettre une erreur fatale. La constante de temps thermique de la carcasse de quelques 700s va restée froide alors que la température du rotor peut dépasser 110 °C et ton rotor peut partir en fumée. (Ton moteur peut griller en restant froid!). La sécurité dans cette manip c'est de bloquer mécaniquement les roues.

Question 5:

En diapo 26, il est dit que la puissance mécanique que peut fournir le moteur est maximum quand la tension V_{cc} se partage également sur les 2 termes ohmique et vitesse. D'où ça sort et quel rapport avec la puissance nominale donnée pour le moteur

Réponse 5:

$$V_{cc} = r.i + \lambda v.w \quad (1)$$

$$C = \lambda_c.i \quad (2)$$

$P_m = C.w$ (3) représente la puissance fournie par le moteur

Des équations 1, 2 et 3 tu déduis

$$P_m = V_{cc}.C - (r/\lambda_c).C^2$$

Le maximum de P_m en fonction de C s'obtient pour $dP_m/dC=0$ soit après dérivation:

$$C = \frac{1}{2} \lambda_c.V_{cc}/r = \frac{1}{2} \lambda_c.i_o = \frac{1}{2} C_o$$

i_o représentant le courant de démarrage et C_o le couple de démarrage

Le maxi de P_m correspond donc à $C = \frac{1}{2}C_o$ et $w = \frac{1}{2}w_o$, ce qui prouve que les termes $r.i$ et $\lambda v.w$ sont égaux (V_{cc} se partage également sur les 2 termes) et

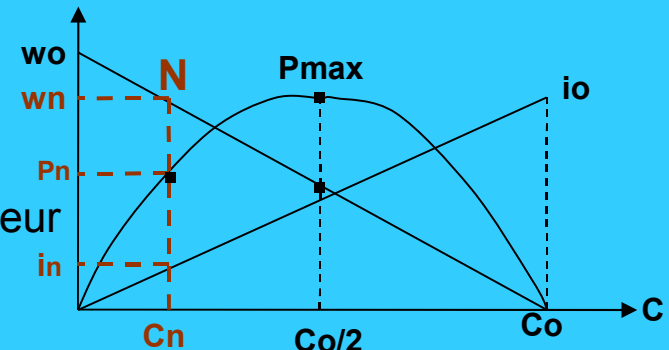
$$P_{max} = \frac{1}{4} C_o.w_o \quad (C_o \text{ couple de démarrage, } w_o \text{ tension à vide})$$

Si on prends l'exemple du moteur RE025 en 24v, ça donne:

$$C_o = 241 \text{ mNm}$$

$$w_o = 9550 \text{ tr/mn} = 1000 \text{ rd/s}$$

$$P_{max} = 60 \text{ W} \text{ à comparer à la puissance nominale donnée pour } 20 \text{ W}$$



La puissance nominale P_n est donnée comme une puissance en régime permanent supportable en terme de température rotor. Elle correspond aux valeurs rouges sur le graphe et on est bien en dessous de la puissance max.

Question 6:

C'est quoi cette histoire de $\lambda c = \lambda v$. T'es sûr de toi?

Réponse 6:

J'ai pris plusieurs exemple de moteurs et ça colle au poil. C'est tellement vrai que ça doit se démontrer mais là j'avoue mon incompetence. Tout au plus quelques réminiscences des temps anciens et là je fais appel à ma mémoire reptilienne et quelques vieilles formules reviennent à la surface comme:

$$e = d(\text{FLUX})/dt \quad \text{et} \quad C = \text{FLUX}.i$$

FLUX : Flux magnétique créé par un champ magnétique B

e: fem induite par une variation du FLUX qu'on pourrait écrire $e = \text{FLUX}.w$

C: couple induit par la force de Laplace.

Si on compare $C = \lambda c.i$ à $C = \text{FLUX}.i$ et $e = \lambda v.w$ à $e = \text{FLUX}.w$

ça semblerait coller et montrer que finalement

λc et λv seraient homogènes à un FLUX magnétique. (Celui créé par les aimants du stator)

L'unité de FLUX étant le Weber qui s'exprime en $[v].[s]$, pour λv qui s'exprime en $V/rd/s$ ça semble coller.

Pour λc , c'est moins évident mais finalement j'ai bien vérifié que des **N.m/A** donne des **$[v].[s]$**

Question 5 bis:

Mais alors ça sert à quoi d'avoir 2 coefficients?

Réponse 5 bis:

Je pense que c'est pour des raisons pratiques. Quand tu raisones sur le couple il vaut mieux utiliser λc qui fournit des N.m. quand tu raisones sur la vitesse, il vaut mieux utiliser λv qui fournit une tension en volts pour une vitesse donnée en rd/s.

Question 7:

Dans les diverses formules, apparaît toujours la tension batterie Vcc. Normalement elle doit être égale à la tension nominale du moteur ? Non?

Réponse 7:

C'est quasiment impossible d'avoir une tension batterie égale à la tension nominale du moteur. Tout au plus, on peut essayer de s'en approcher.

Pour une batterie LIPO, chaque élément fournit une tension 3.7v en moyenne et 4.2v en pleine charge (sortie du chargeur) et la tension batterie sera un multiple de cette valeur.

Pour un moteur 24v: 6 éléments LIPO donnent 22v moyen et 25.2v max

7 éléments LIPO donnent 26v moyen et 29.4v max

Pour du NiMH, c'est le même problème avec des variations importantes de la tension suivant l'état de charge.

Si on part du principe qu'avant chaque match, on part avec une batterie à bloc, on connaît alors la tension batterie Vcc effective (25.2v avec une batterie LIPO à 6 éléments par exemple).

Ce qu'il faut savoir c'est que dépasser la tension nominale du moteur est parfaitement possible à condition de ne pas exagérer.

Il existe 2 causes de destruction d'un moteur:

→ Dépassement de la température rotor autorisée: destruction du rotor par échauffement

→ Dépassement de la vitesse angulaire autorisée: destruction du rotor par sursrégime.

Si la tension batterie dépasse trop la valeur nominale, on risque dans les 2 cas.

Le risque par échauffement est limité si on respecte les conditions de ce document en particulier la condition de glissement en cas de blocage.

Par contre, un sursrégime est toujours possible en cas de bug logiciel car alors toute la tension batterie peut être appliquée au moteur et celui-ci risque fort de passer en sursrégime.

Question 8:

C'est bien gentil toutes ces formules, mais que faire si j'utilise des moto réducteurs de récupération sans aucune donnée technique.

Réponse 8:

Si t'es croyant, tu peux prier. ☺

Peut-être que tu connais quand même sa tension nominale. C'est un minimum.
Tu peux estimer sa résistance interne r en mesurant la résistance aux bornes.
Si tu connais le rapport de réduction du réducteur, t'es sauvé sans faire appel aux puissances divines:

La démarche est la suivante et s'appuie sur la formule $U = r.i + \lambda_v.w$

Tu appliques une tension U . (Par exemple la moitié de la tension nominale).

Le moteur tourne.

Tu mesures i . Sa valeur est faible car le moteur tourne à vide.

Tu comptes le nombre de tours sur une minute de l'arbre de sortie. Connaissant le rapport de réduction, tu en déduis w , vitesse angulaire du moteur. Ca te permet de calculer λ_v

$$\lambda_v = (U - r.i) / w$$

Sachant que $\lambda_c = \lambda_v$, tu connais finalement:

r , λ_c , λ_v et ça doit suffire à ton bonheur. Tu peux même en déduire:

$i_o = V_{cc} / r$: courant de démarrage

$C_o = \lambda_c.i_o$: couple de démarrage

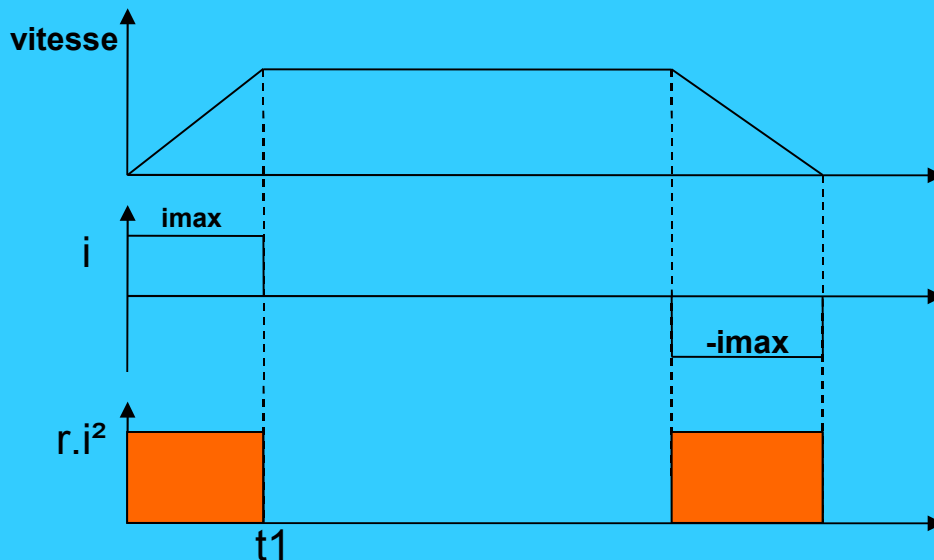
w_{max} : vitesse angulaire max. c'est à peu près la vitesse à vide pour la tension nominale appliquée.

Question 9:

J'ai l'impression que c'est pendant l'accélération que le moteur chauffe le plus car alors la commande U appliquée au moteur est la plus forte.

Réponse 9:

Le moteur chauffe autant pendant le freinage que pendant l'accélération.
En valeur absolue si les accélérations sont égales, les couples sont égaux donc les courants sont égaux.



Pendant l'accélération:

$$U = r.i_{max} + \lambda v.w$$

Pendant le freinage:

$$U = -r.i_{max} + \lambda v.w$$

Donc effectivement la tension U est plus grande pendant l'accélération mais l'énergie thermique dépensée égale à $r.i^2.t_1$ (aire en rouge) est la même pendant accélération et freinage.

Question 10:

Si j'ai bien compris, la diapo 40, pour un moto réducteur donné, le choix de l'accélération et de la vitesse max correspondante se fait en fonction de l'équation:

$$v_{max} = v_0 \cdot (1 - \gamma_{max}/\gamma_0)$$

Donc si j'augmente l'accélération, je dois diminuer la vitesse max correspondante.

Réponse 10:

T'as bien compris.

Question 11:

Et comment je choisis ce couple de valeurs. Laquelle de ces 2 grandeurs faut-il favoriser?

Réponse 11:

Tout dépend de la distance à parcourir.

Pour les courts trajets, on a intérêt à avoir une accélération forte (inférieure bien sûr à l'accélération max qui déclenche le glissement ou le weeling).

Pour les longs trajets (une traversée du terrain par exemple), on a intérêt à avoir une vitesse forte.

On peut imaginer d'optimiser par logiciel l'accélération et la vitesse max en fonction de la distance à parcourir. Ce n'est pas compliqué à écrire.

Question 12:

Je résume. J'ai choisi mon moteur et réducteur afin d'avoir un couple suffisant pour déclencher un glissement en cas de blocage.

J'ai choisi ensuite vitesse max et accélération afin d'éviter la saturation des amplis tout en m'assurant, en fonctionnement sans blocage, que l'accélération ne déclenche ni glisse ni weeling.

Mais étant donné que les moteurs chauffent pendant accélération et freinage, qui me prouve que même si les conditions ci-dessus sont respectées, les moteurs ne vont pas dépasser leur température autorisée en 1mn30 de match. Et je pourrais poser la même question pour les amplis de puissance.

Réponse 12:

Aparté: La perfidité de l'auteur ne vous aura pas échappé. Vous avez tous compris que si je me pose cette question c'est que j'y ai réfléchi et que je pense pouvoir y répondre. Ma réponse pourrait être dans un 1er temps, histoire de vous montrer que je sais aussi manier l'humour à 3 balles: ☺

Tu veux peut-être aussi l'âge du capitaine?

Et pourquoi pas histoire de me donner de l'importance: ☺

Ta question est complexe mais très intéressante. On va essayer d'y répondre.

Le côté humilité de la réplique, dans le « On va essayer... », ne vous aurait pas trompé. ☺

La réponse:

La température prise par les moteurs et amplis de puissance sur la durée d'un match va dépendre du facteur de marche. A motorisation et poids de robot égal, un robot hyper actif va chauffer davantage qu'un robot qui se promène. Mais on peut toujours envisager le pire des cas.

Le plus simple pour répondre à la question est de faire un bilan énergétique:

En cours de fonctionnement du robot, s'établissent des échanges entre énergie électrique, énergie thermique et énergie mécanique.

L'énergie électrique **E_e** est fournie par la batterie. L'énergie thermique **E_j** est dissipée par effet joule dans les moteurs et amplis de puissance et aussi par frottements. L'énergie mécanique **E_c** correspond à l'énergie cinétique du robot.

Phase accélération: La batterie fournit une énergie qui produit de l'énergie cinétique au robot avec des pertes par effet joule.

$$E_e = E_j + E_c$$

Phase freinage: Le robot restitue son énergie cinétique qui s'ajoute à une éventuelle contribution E_e de la batterie. Le tout est dissipée en chaleur dans les moteurs et les amplis.

$$E_c + E_e = E_j$$

Phase à vitesse constante: La batterie fournit une énergie pour compenser les pertes par effet joule essentiellement les frottements.

$$E_e = E_j$$

Robot à l'arrêt:

$$E_e = E_j = E_c = 0$$

Bilan pendant la phase accélération:

A la fin de l'accélération, le robot a acquis une énergie cinétique:

$$E_c = \frac{1}{2} M \cdot v_{\max}^2$$

Remarquer que cette énergie acquise ne dépend pas de l'accélération c'est à dire du temps qu'a mis le robot pour atteindre cette vitesse.

Exemple:

M = 14 kg
K = 20 rapport du réducteur
r = 2.34ohm résistance d'induit des moteurs
 $\lambda_c = 23.5$ mNm constante de couple
D = 6cm Diamètre des roues motrices

vit_max = 1.2 m/s
acc = 0.4g

$E_c = \frac{1}{2} * 14 * 1.2^2 = 10$ joules soit l'équivalent de 2.4 calories

Ca peut paraître ridicule comparé à votre ration quotidienne de 2000c que vous ingurgitez sous la forme de pizzas ou autres saloperies, bande de goinfres.

Mais calculons le temps mis par le robot pour atteindre cette vitesse:

$$t_1 = \text{vit_max} / \text{acc} = 0.3\text{s}$$

Ce qui correspond à une puissance mécanique moyenne pendant la phase accélération:

$$P_m = E_c / t_1 = 33 \text{ w}$$

Ca paraît déjà plus raisonnable.

Calculons l'énergie thermique dissipée dans les moteurs. Comme l'accélération est constante, le couple donc le courant le sont aussi. Compte tenu des données, le calcul du courant d'induit moteur donne: ($2F_x = M \cdot \text{acc}$; $C_r = F_x \cdot D / 2$; $C_m = C_r / (K \cdot R_d)$; $i = C_m / \lambda_c$)

i = 2.5A courant d'induit par moteur

$E_{j1} = 2 \cdot r \cdot i^2 \cdot t_1 = 8.8$ j énergie dissipée par effet joule dans les 2 moteurs

Il faut ajouter l'énergie perdue dans les amplis de puissance (Pour LM18200 $r_a = 0.6\text{ohm}$)

$$E_{j2} = 2 \cdot r_a \cdot i^2 \cdot t_1 = 2.25 \text{ j}$$

$E_{j1} + E_{j2} = 11$ j énergie totale perdue par effet joule

Soit l'énergie électrique fournie par la batterie (On néglige les frottements)

$$E_e = E_c + E_{j1} + E_{j2} = 21 \text{ j}$$

Au total à chaque accélération la batterie fournit 21j, dont 10j mécaniques utiles pour propulser le robot à sa vitesse max et 11j perdus par effet joule.

Phase freinage

On a vu que les pertes dans les moteurs sont identiques à l'accélération et au freinage.
Soit

$E_{j1} = 8.8j$ perdus par effet joule dans les moteurs.

Admettons qu'il en est de même pour les amplis

$E_{j2} = 2.25j$

Soit au total, une énergie perdue par effet joule:

$E_{j1} + E_{j2} = 11j$

Le robot fournit une énergie mécanique égale à son énergie cinétique perdue:

$E_c = 10j$

Cette énergie est dissipée dans moteurs et amplis de puissance.

11j perdu pour 10j fourni . Donc la batterie fournit le complément soit 1j

$E_e + E_c = E_{j1} + E_{j2}$

Au total à chaque freinage, le robot fournit 10j, la batterie fournit 1j

8.8j sont perdus par effet joule dans les moteurs et 2.25j perdus dans les amplis.

Pendant la phase à vitesse constante, les pertes par effet joule sont négligeables.
Le bilan total d'une séquence accélération freinage conduit donc à:

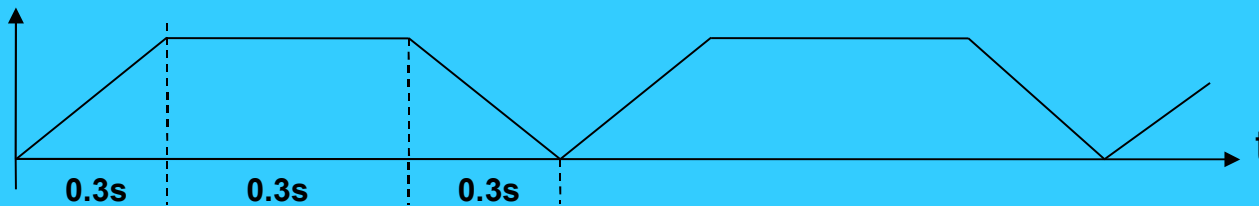
Séquence accélération freinage

$E_{j1} = 2 \times 8.8 = 17.6 \text{ j}$ perdus par effet joule dans les moteurs

$E_{j2} = 2 \times 2.25 = 5.5 \text{ j}$ perdus par effet joule dans les amplis

$E_e = 21 + 1 = 22 \text{ j}$ fournis par la batterie.

Revenons à la question de connaître la température des moteurs après 1mn30 de match.
Elle va dépendre du facteur de marche:



Prenons un cas extrême d'un robot jamais à l'arrêt avec une suite de déplacements de 40cm ce qui donne avec notre exemple un facteur de marche de 2/3.

(0.6s pour accélérer et freiner sur 0.9s au total pour le déplacement de 40cm)

Soit:

$P_{j1} = E_{j1}/0.9 = 20 \text{ w}$ environ de puissance moyenne dissipée dans les 2 moteurs

$P_{j2} = E_{j2}/0.9 = 6 \text{ w}$ environ de puissance moyenne dissipée dans les amplis

Donc la puissance moyenne dissipée dans chaque moteur vaut:

$P_j = 10\text{w}$

Reprenons les constantes thermiques du moteur:

$R_{thr} = 3^\circ\text{C/w}$ résistance thermique rotor-stator

$R_{ths} = 10^\circ\text{C/w}$ résistance thermique stator-ambient

Constante de temps rotor = 20s

Constante de temps stator = 700s

Elévation de la température du stator:

$P_j \cdot R_{ths} = 10 \cdot 10 = 100^\circ\text{C}$ écart de température asymptotique entre stator et ambient.

Du fait de la constante de temps stator de 700s et en approximant exponentielle et tangente ça donne après 90s de match:

$T_s - T_a = 100 \cdot 90/700 = 13^\circ\text{C}$

Avec $T_a = 40^\circ\text{C}$ (température Ferté en finale ☺)

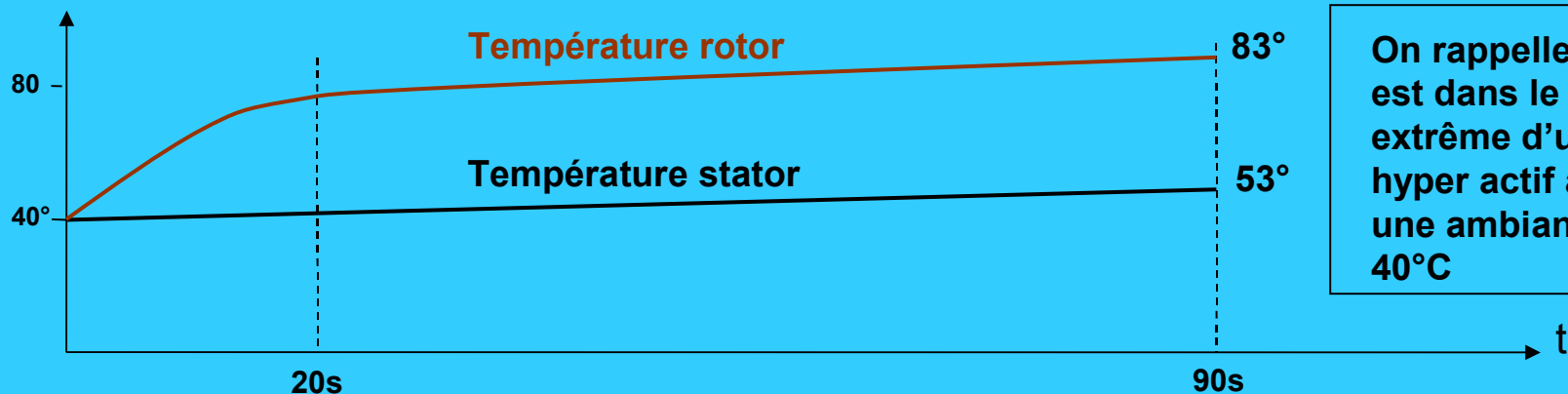
$T_s = 53^\circ\text{C}$

Elévation de température du rotor

$T_r - T_s = P_j \cdot R_{thr} = 10 \cdot 3 = 30^\circ\text{C}$ écart de température asymptotique entre rotor et stator

Cet écart sera atteint après 20s de match environ soit en fin de match:

$T_r = 30 + 53 = 83^\circ\text{C}$



On rappelle qu'on est dans le cas extrême d'un robot hyper actif avec une ambiance à 40°C

Question 13:

L'erreur de traînage, écart entre la vitesse et sa consigne qu'on peut constater sur les relevés graphiques n'est-elle pas gênante pour la précision de l'asservissement.

Réponse 13:

Dans la phase à vitesse constante, la vitesse est égale à sa valeur de consigne. C'est déjà un premier point. Pendant les phases accélération et freinage la vitesse est effectivement en retard sur la consigne mais ça n'a pas d' incidence sur la précision du robot. C'est la distance qui nous intéresse, ce qui justifie le choix d'un asservissement en position. La vitesse n'a d'incidence sur les performances du robot que par le biais du contrôle dérivé du correcteur.

Par contre pendant accélération et freinage la distance est aussi en retard sur sa consigne et il faut en tenir compte dans la condition de sortie des fonctions déplacement. Quand la consigne est atteinte, le robot est encore en mouvement.

Question 14:

Sur les relevés graphiques, je suis surpris par le niveau de bruit sur la commande des moteurs et aussi à un degré moindre sur la vitesse.

Réponse 14:

Ce qui pourrait être préoccupant c'est le bruit sur la vitesse. Mais en fait il ne s'agit pas de la vitesse, il s'agit d'une mesure de la vitesse par un algorithme simpliste:

$$\text{vitesse}(n) = \text{distance}(n) - \text{distance}(n-1).$$

Ce qu'on observe est lié au bruit de quantification, et on peut imaginer que la vitesse réelle du robot du fait de la constante de temps mécanique n'est pas soumise à ces fluctuations.

On peut d'ailleurs réduire ce bruit en sous échantillonnant la vitesse à l'ordre k:

$$\text{vitesse}(n) = \text{distance}(n) - \text{distance}(n-k).$$

Mais il ne faut pas exagérer sur la valeur de k. Trop c'est trop et ça risque de dégrader le rôle prédictif du correcteur dérivé. On ne prédit pas l'avenir en remontant trop loin dans le passé. S'il est 17h et qu'on cherche à prévoir la météo pour 18h, on ne va pas chercher les conditions météorologiques d'il y a 3 jours mais plutôt celles de 16h.

Il est vrai que si le bruit de vitesse n'a pas d'incidence sur le comportement de l'asservissement, il faut être plus réservé par rapport à l'odométrie. Mais le sujet n'est pas abordé dans ce document.

Question 15:

Tu nous as rien dit sur la manière de régler le correcteur. Apparemment vous travaillez sur des relevés graphiques. Et si je ne dispose pas de l'outil correspondant, comment je procède.

Réponse 15:

Un conseil: Si tu ne disposes pas de debugger, fabrique le. Il y a des outils très simples à développer qui t'apporteront une aide précieuse voir indispensable au cours de ta phase de mise au point (normalement la phase la plus longue sur la durée du projet).

Sans visualisation graphique, il y a toujours un moyen de t'en sortir mais ça risque d'être moins précis.

Quant à la procédure de réglage, elle a été largement évoquée sur le forum.

En gros, on dégrossit l'asservissement en commande proportionnelle puis on introduit le terme dérivé. Et pour les inconditionnels, on finit par le terme intégral.

Bien sûr en asservissement polaire, on décompose en réglant d'abord un paramètre puis l'autre. C'est mieux de commencer par l'orientation .

Une des difficultés réside dans le fait que pour régler l'asservissement avec précision, il faut faire bouger le robot donc avoir écrit les séquences de rotation et de déplacement en ligne droite. Or pour mettre au point ces séquences, il faut que l'asservissement soit à peu près réglé. Donc on tourne en rond.

Voilà un moyen très simple de s'en sortir:

Le plus simple des déplacements, c'est l'absence de déplacement.

Dans un 1er temps, on va régler le correcteur en asservissant le robot sur une position fixe.

Pas de profil trapézoïdal à programmer mais simplement asservir le robot sur
consigne_distance=0.

Le principe est d'imposer une condition initiale non nulle à l'asservissement et d'observer pour $t>0$, le retour du robot vers sa position d'équilibre.

A: Réglage de l'asservissement en rotation (commande_distance=0)

1. On se met en commande proportionnelle ($k_d=0$)

On part d'une valeur **kp** à priori faible et on vérifie la stabilité de l'asservissement en essayant d'écarter le robot de sa position d'équilibre et en relâchant la pression. Le robot doit tranquillement revenir à sa position d'équilibre.

Puis on augmente progressivement le gain proportionnel **kp**.

On voit d'abord apparaître un retour à l'équilibre oscillatoire amorti.

On continue à augmenter le gain jusqu'à l'oscillation amortie sur 1 à 2s. On est alors juste avant la limite de l'oscillateur.

(Sur notre robot, on trouve $k_p= 0.35$)

2. On introduit le terme dérivé.

On augmente progressivement le gain dérivé **kd**, toujours avec le même procédé.

On passe d'abord par une phase en retour oscillatoire amorti puis par un parfait retour apériodique sans dépassement.

(Sur notre robot, on trouve $k_d=2$)

On peut considérer que l'asservissement en rotation est largement dégrossi.

B: Réglage de l'asservissement en distance

Le robot étant asservi en rotation, on introduit la commande distance qui a été annulée précédemment.

La procédure est la même que pour l'asservissement en orientation

1. On se met en commande proportionnelle ($k_d=0$)

On augmente **kp** jusqu'à la limite de l'oscillation maintenue. L'oscillation doit être amortie sur un temps de l'ordre de 1s à 2s environ.

(Sur notre robot, on trouve $k_p=0.5$)

2. On introduit le terme dérivé, et on augmente **kd jusqu'au retour impeccable sans dépassement.**

(Sur notre robot on trouve $k_d=4$)

On peut considérer à ce stade que notre correcteur proportionnel et dérivé est dégrossi.

Remarque générale sur cette méthode de réglage:

Elle permet de dégrossir les réglages avant d'avoir mis au point les séquences de déplacement.

Certains pourront critiquer son caractère sauvage. Ils n'ont pas tort. Car on doit forcer le robot à quitter sa position d'équilibre puis tout lâcher.

On retombe sur le problème de blocage du robot évoqué dans un chapitre précédent et le robot va s'opposer farouchement au méchant perturbateur. Sa force de réaction augmente avec la valeur de k_p et aussi avec l'amplitude du décalage par rapport à sa position d'origine.

Au-delà d'une certaine amplitude de décalage, le glissement des roues risque d'apparaître. Mais il est conseillé de ne pas exagérer sur les amplitudes. Par exemple:

5 à 10 degrés pour la rotation

5 cm pour la distance

Si cette méthode inquiète, il est possible de procéder d'une manière plus soft:

Elle consiste à lancer le programme sans valider la puissance des moteurs

On écarte le robot de sa position initiale sans la puissance (Le robot n'oppose aucune résistance cette fois). Le retour à la position d'équilibre va se faire dès validation de la puissance.

Cette méthode ne permettant que d'approcher les gains optimums, on peut chercher à l'améliorer:

En partant du couple de valeurs k_p et k_d déterminé dans un 1er temps, on augmente k_p , par exemple de 20% et on cherche à récupérer la stabilité en augmentant k_d . Et ainsi de suite jusqu'au moment où le terme dérivé ne peut plus récupérer la stabilité.

Mais ne pas trop en faire par cette méthode qui doit rester une méthode de 1ère approche. Si on veut finaliser ces valeurs, il faut ensuite introduire des déplacements en rotation et distance avec consignes trapézoïdales classiques, ce qui suppose bien sûr que ces fonctions soient parfaitement mises au point avec en particulier un freinage bien maîtrisé. C'est là que la visualisation graphique apporte un avantage certain. Mais attention à ne pas imputer au correcteur d'asservissement des défauts de comportement qui pourraient provenir d'une mauvaise programmation de la séquence des consignes.

Illustration de la méthode par l'image:

Réglage du correcteur d'asservissement en rotation

Film1: Commande proportionnelle.

Kp réglé pour une réponse oscillatoire avec amortissement sur 1 à 2 sec

Kp=0.35

Film2: Commande proportionnelle et dérivé (dérivée de la sortie)

Kd réglé pour une réponse sans dépassement

Kd= 2

Les gains ont été ensuite optimisés à partir de rotations et déplacements sur des consignes trapézoïdales classiques.

Valeurs optimisées:

correcteur en rotation

Kp=0.5

Kd=3

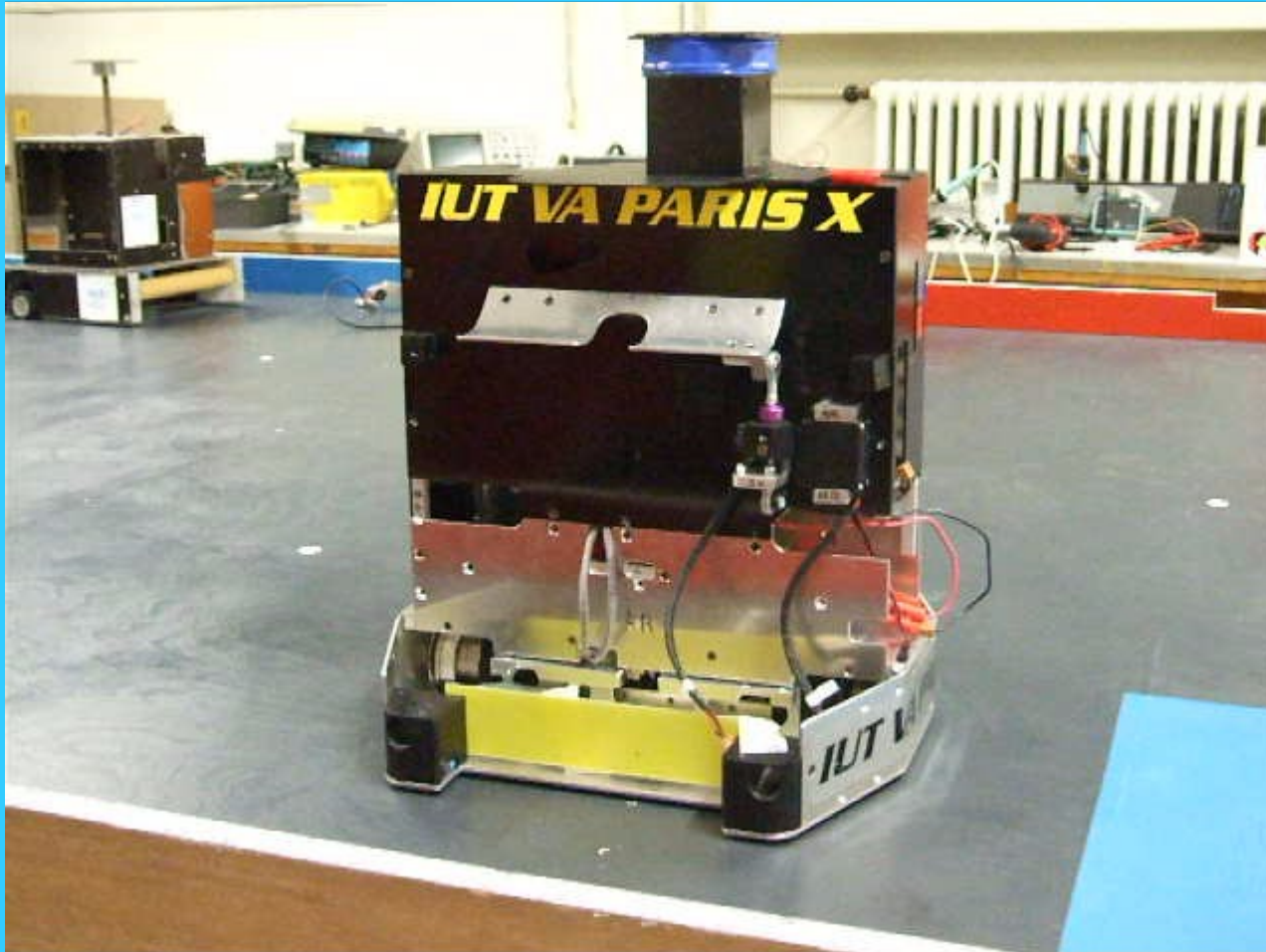
correcteur en distance

Kp=0.7

Kd=5.2

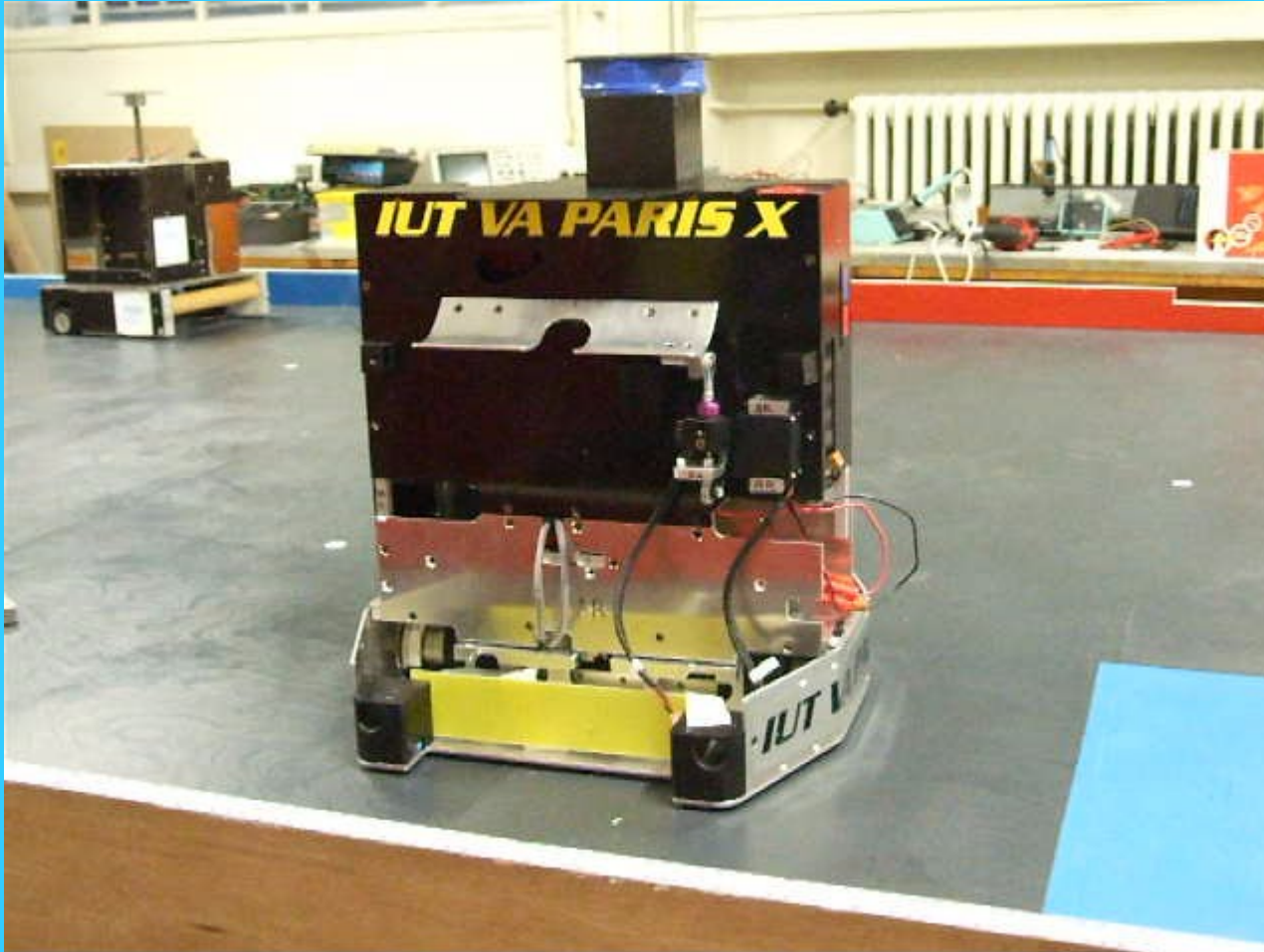
Film3: Une avance, un 360 degrés, un recul avec vitesse et accélération sportives.

Asservissement polaire avec asservissement en rotation seule
Correcteur proportionnel sans terme dérivé. ($K_p=0.35$)
Gain proportionnel ajusté pour un asservissement en limite de stabilité



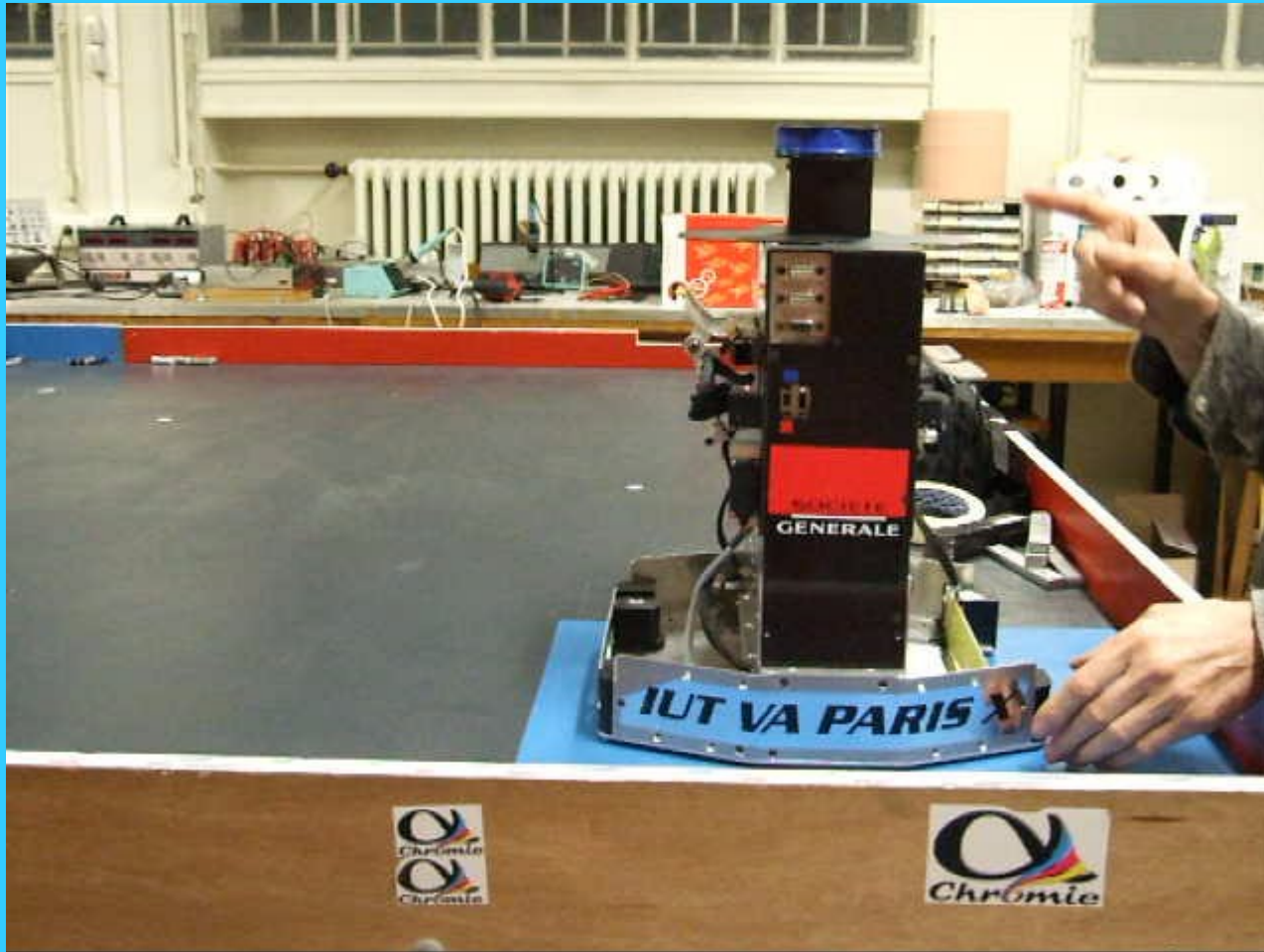
[Lien de la vidéo YouTube](#)

Asservissement polaire en rotation seule
Correcteur proportionnel et dérivé ($K_p=0.35$; $K_d=2$)
Le terme dérivé a été ajusté pour un retour sans dépassement



[Lien de la vidéo YouTube](#)

Gains optimisés: (vitesse de 1.3m/s; accélération de 0.5g; robot version allégée)
Avance d'un mètre
Tourne de 360 degrés
Reculé d'un mètre



[Lien de la vidéo YouTube](#)

Rendez-vous à la Ferté en 2008

Et bon courage

