



DOSSIER PEDAGOGIQUE

1 OBJECTIF DU TP	1
1.1 DRONE DE PRISE DE VUE AERIEENNE EQUIPE D'UNE NACELLE	1
1.2 ENVIRONNEMENT RECREE	2
1.3 OBJECTIF DU TP	2
2 ANALYSE DU SYSTEME ET MISE EN EVIDENCE D'UN CRITERE D'EVALUATION DE LA PERFORMANCE	4
3 EVALUATION DE L'ECART GLOBAL SUR UN SUIVI	6
3.1 HYPOTHESE SUR CET ECART ET CONSEQUENCE ANALYSABLE EN REPONSE A UNE RAMPE:	7
3.2 MESURE DE L'ECART YMES	7
3.2.1 Protocole expérimental	7
3.2.2 Résultats obtenus	8
3.3 CAUSES POSSIBLES DE CET ECART	9
4 PREMIERE SOURCE DE L'ECART : TRAITEMENT D'IMAGE	10
4.1 MODELISATIONS DES BLOCS	11
4.2 MESURE DE L'ECART ϵ_1 POUR UNE CIBLE EN MOUVEMENT	13
4.2.1 Protocole expérimental	13
4.2.2 Traitement des résultats	13
4.2.3 Analyse des résultats	14
5 SECONDE SOURCE DE L'ECART : COMPORTEMENT DE LA NACELLE	16
5.1 PROTOCOLE EXPERIMENTAL	16
5.2 RESULTATS OBTENUS	18
5.3 CONSEQUENCES SUR L'ECART DE SUIVI	18
6 SYNTHESE	19



DOSSIER PÉDAGOGIQUE

Vérification des
performances de suivi vidéo

Corrigé

CPGE

Ce TP est proposé en ilot.

Le format pourra par exemple être le suivant :

- 2 séances de TP de 2h30 + 1 séance de présentation
- Equipes de 4 élèves :
 - 2 élèves expérimentateurs,
 - 1 élève modélisateur,
 - 1 élève modélisateur/chef de projet.

1 OBJECTIF DU TP

1.1 Drone de prise de vue aérienne équipé d'une nacelle

La prise de vue aérienne par drone est un secteur en plein essor.

Beaucoup de télé-pilotes se lancent sur ce segment avec un cadrage basé sur nacelle 2 ou 3 axes. Cette technique permet de réaliser des images intéressantes, avec des manœuvres sur des vues en oblique ou en courbe.

L'utilisation de drones pour filmer une scène (événements sportifs, publicité, actions militaires...) est de plus en plus répandue car elle permet d'avoir des angles de vues plus intéressants et au plus proche de l'action, en s'affranchissant d'éventuels obstacles (foule, obstacles naturels,...).

La fonctionnalité « **suivi de cible** » permet de placer systématiquement et automatiquement le sujet à filmer (par exemple le véhicule en tête d'une course automobile) au centre de l'image.

Le drone, mobile, est en général piloté à l'aide d'une télécommande par une personne au sol. La position et l'orientation du drone est variable, d'autant plus qu'il est soumis à des actions extérieures aléatoires (vent, trous d'air ...).

La nacelle permet de déplacer la caméra en l'orientant autour de 2 ou 3 axes. Elle est actionnée par des moteurs, dont les positions sont commandées à partir des données de vols issues d'une centrale inertielle qui mesure la position du drone par rapport à l'horizontale ainsi que son accélération, sa vitesse. Ceci permet par exemple d'imposer à la caméra de garder une position horizontale quelle que soit la position du drone.

Dans le cas du suivi de cible, le retour d'image fourni par la caméra permet de connaître les mouvements de la cible dans l'image et d'en déduire les déplacements à imposer à la nacelle afin de recentrer automatiquement la cible sur l'image.



1.2 Environnement recréé

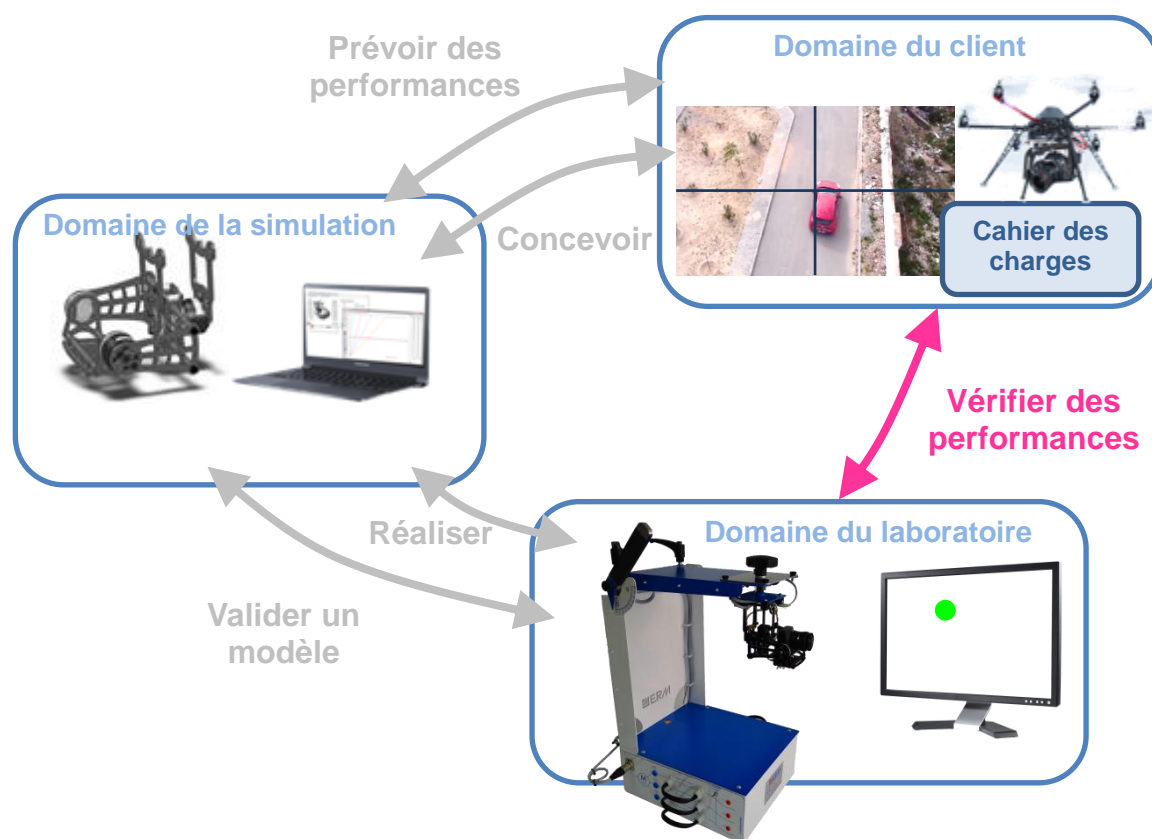
Le support d'étude dans cette activité est la nacelle de Drone associée à sa caméra dans un environnement recréé.

Dans la configuration du TP, la nacelle ne peut corriger que la position verticale de la cible dans l'image. La position horizontale de la cible dans l'image ne pourra être corrigée qu'en pilotant le drone lui-même. Le cadre de l'étude est limité au suivi de cible réalisé par la nacelle : le drone sera donc considéré fixe et on s'intéressera uniquement au suivi sur un axe vertical Y.

Pour effectuer des mesures, on dispose : de la nacelle équipée d'une caméra de prise de vue, d'un logiciel de commande et de visualisation des grandeurs physiques mesurées, et d'un écran de projection permettant de simuler le déplacement de la cible.

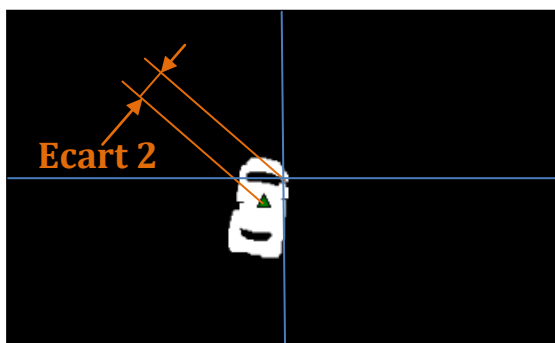
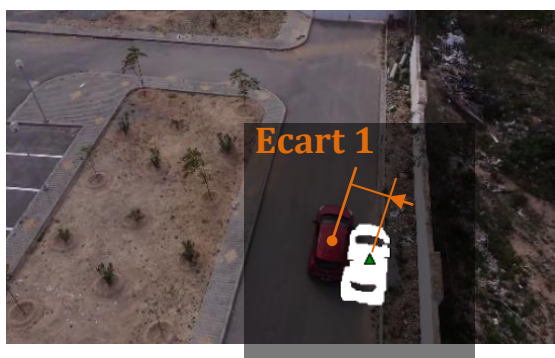


1.3 Objectif du TP

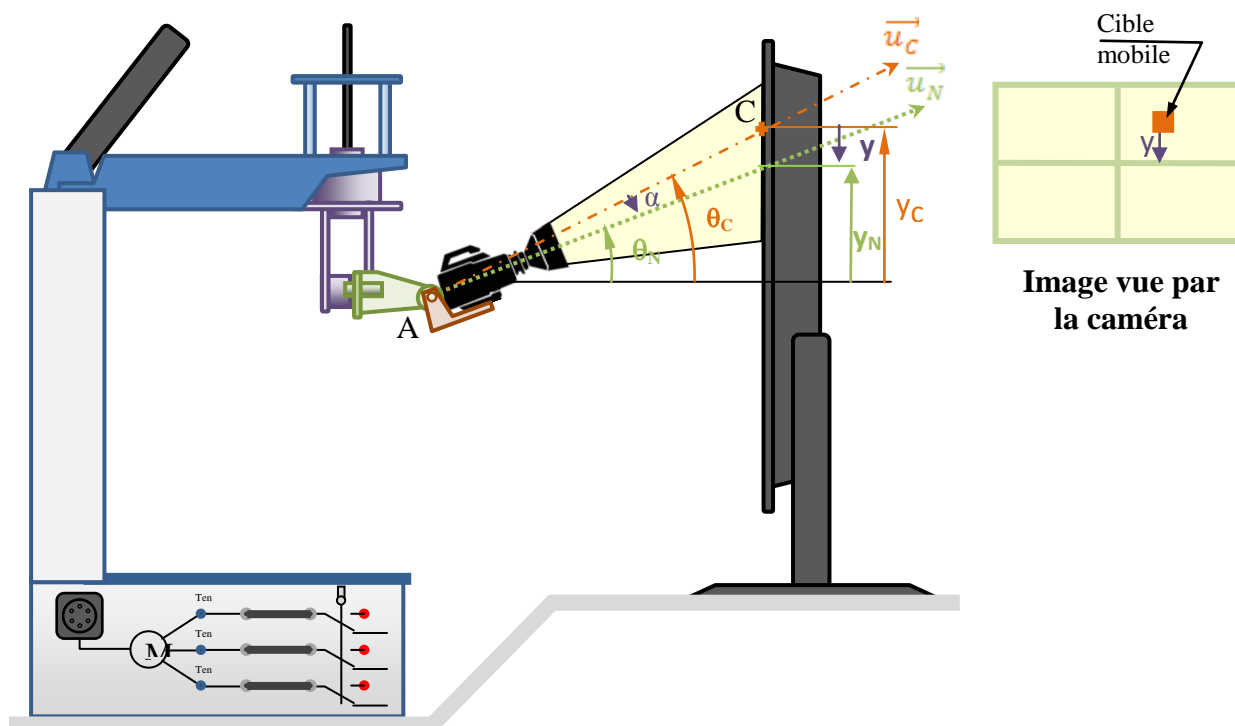


L'objectif du TP est :

- d'évaluer les performances de suivi de cible du système {nacelle + caméra} en mesurant l'écart entre les performances attendues et performances réalisées
- d'estimer la part du traitement d'image et du comportement de la nacelle dans cet écart.



2 ANALYSE DU SYSTEME ET MISE EN EVIDENCE D'UN CRITERE D'EVALUATION DE LA PERFORMANCE



A : point situé sur l'axe de tangage

C : point situé au centre de la cible visée

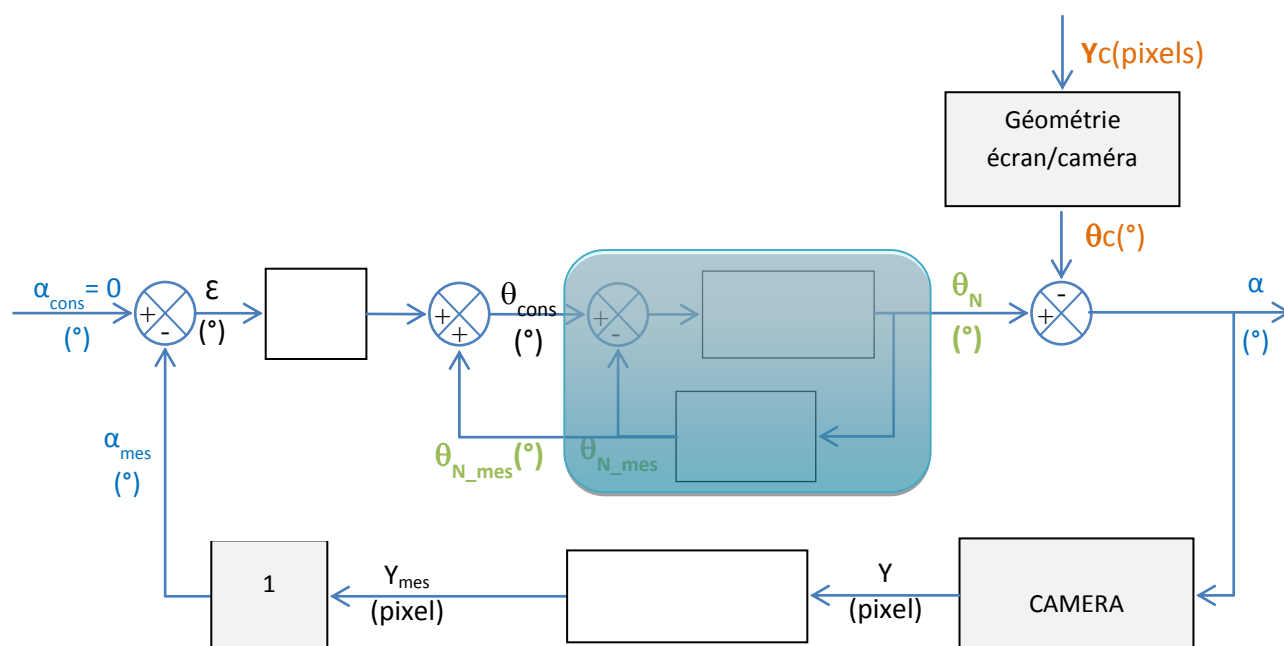
(A, \vec{u}_C)	Axe défini par la droite (AC), droite « nacelle-cible »
(A, \vec{u}_N)	Axe de la caméra (ligne de visée de la caméra)

$\alpha = (\vec{u}_C, \vec{u}_N)$	Angle entre l'axe de la caméra et la droite (AC)
α_{cons}	Consigne d'angle α : nulle dans le cas d'un suivi
α_{mes}	Image de l'angle α , issue de la mesure par traitement d'image

Y	Position réelle de la cible dans l'image caméra
Y_{mes}	Position mesurée de la cible dans l'image caméra, position obtenue par traitement d'image en pixels de l'image caméra

θ_N	Position angulaire de la nacelle
$\theta_{N_{mes}}$	Position angulaire de la nacelle mesurée par la plateforme inertielle
θ_{cons}	Consigne d'angle θ_N , envoyée à la nacelle pour corriger l'écart angulaire α

θ_c	Position de la cible donnée en angle (angle entre l'horizontale et la droite (AC))
Y_c	Position de la cible dans l'écran de projection



Chaîne de retour

L'angle α est mesuré à l'aide d'une caméra, associée à un algorithme de traitement d'image qui permet de reconnaître le centre de la cible sur l'image filmée.

En théorie, il faut un bloc d'adaptation, pour construire à partir de la position de la cible mesurée Y_{mes} , l'angle α_{mes} correspondant. Ce bloc dépend de la géométrie de l'ensemble drone/caméra/cible et ne peut pas être calculé.

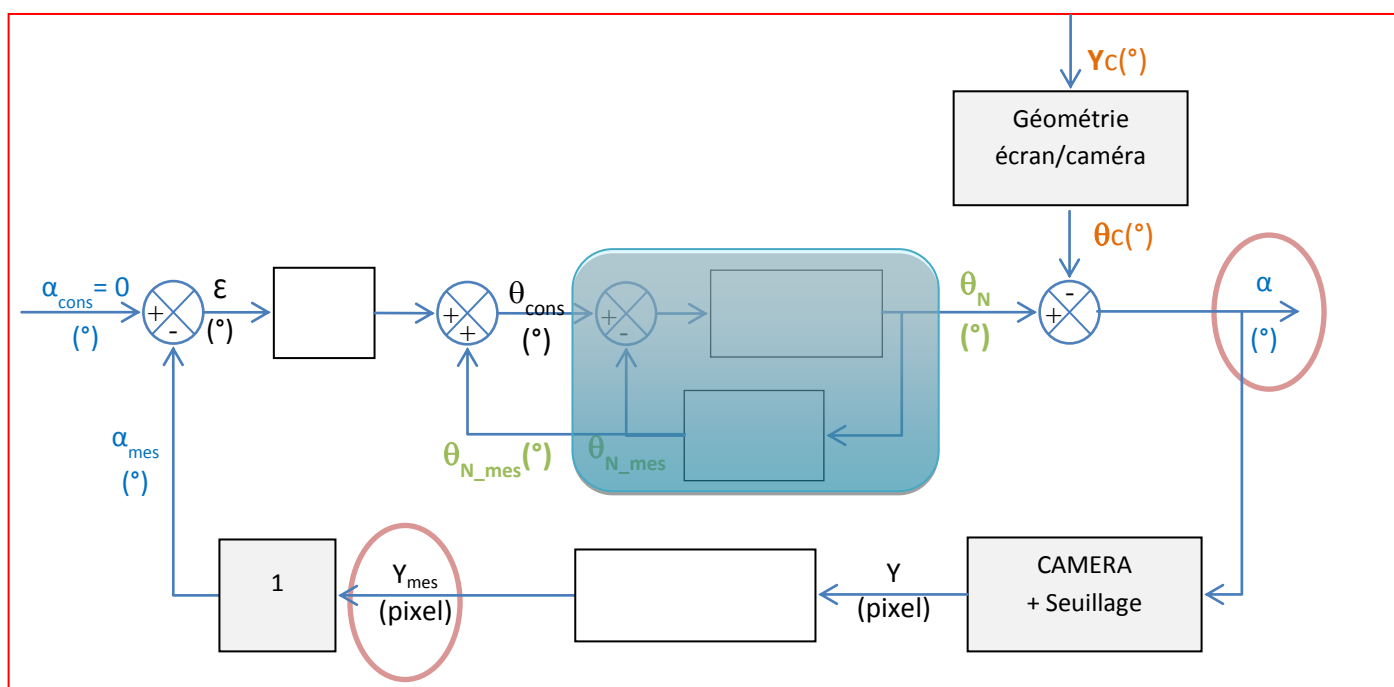
Le choix a donc été fait de le prendre égal à 1 et d'utiliser une compensation éventuelle dans le bloc PID.

Comme l'angle de consigne α_{cons} est toujours nul, cette manipulation n'a pas d'impact.

Chaîne directe

Le bloc PID est un correcteur de type proportionnel/intégral/dérivé. À l'issue de ce bloc est générée une consigne angulaire qui est envoyée à la nacelle. La nacelle possède son propre asservissement à l'aide notamment d'une plateforme inertielle (bloc GYRO).

Groupe modélisateur	Groupe expérimentateur
Donner la fonction à remplir par le système dans le cas d'un suivi de cible.	Analyser les moyens de mesures présents sur le système.
Analyser le schéma fonctionnel, et repérer les éléments sur le système.	Repérer, parmi les grandeurs présentes sur le schéma fonctionnel, celles qui sont mesurables.
Proposer un critère quantifiable permettant d'évaluer la performance de suivi.	Repérer le type de consignes qu'il est possible d'imposer au système.
En confrontant vos analyses, proposer un moyen de mesurer l'écart entre performance attendue et performance réalisée. Préciser la grandeur à mesurer.	



La performance attendue est de suivre la cible en annulant l'angle formé entre l'axe de la caméra, et la droite nacelle/cible (angle α).

Le moyen utilisé pour quantifier cet angle est de mesurer la position de la cible dans l'image filmée (quantité Y_{mes} qui résulte de Y par traitement d'image). C'est cette quantité qui sera utilisée pour évaluer la performance de suivi.

Y_{mes} est donnée en pixel. Il s'agit de la position du centre de la forme reconnue par rapport au centre de l'image. Y_{mes} est nulle quand la cible est au centre de l'image (performance parfaitement atteinte).

3 EVALUATION DE L'ÉCART GLOBAL SUR UN SUIVI

Groupe modélisateur	Groupe expérimentateur
<p>Prévoir les conséquences sur le suivi d'une cible se déplaçant à vitesse constante dans les 2 cas suivants :</p> <ul style="list-style-type: none"> • L'erreur est constante • L'erreur est de type retard <p>Prévoir aussi l'évolution de cette réponse suite à une variation de la vitesse de déplacement, et à une variation de la distance de la cible.</p>	<p>Mesurer l'écart entre performance obtenue et performance réalisée en faisant varier les paramètres ci-dessous :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Vitesse de déplacement de la cible • Distance de la cible à la caméra
<p>Après analyse des résultats expérimentaux obtenus conclure quant à l'influence des 2 paramètres (vitesse, distance) sur les performances.</p> <p>Formuler une hypothèse quant au type d'erreur qui semble être identifié (retard, constante)</p>	

3.1 Hypothèse sur cet écart et conséquence analysable en réponse à une rampe:

- cet écart peut provenir d'un retard
Dans ce cas $y_R(t) = y(t - T)$ avec T, temps de traitement de l'algorithme
- cet écart peut aussi provenir d'une erreur, qui peut être constant ou non ;
Dans l'hypothèse d'une erreur constante : $y_R(t) = y(t) + c$

Cas d'un retard pur	Cas d'une erreur constante
Relation entre $y_R(t)$ et $y(t)$ $y_R(t) = y(t - T)$	Relation entre $y_R(t)$ et $y(t)$ $y_R(t) = y(t) + c$
Effet sur la réponse à une rampe $y(t) = at$ $y_R(t) = y(t - T) = a(t - T) = y(t) - aT$	Effet sur la réponse à une rampe $y(t) = at$ $y_R(t) = y(t) + c = at + c$
Dépendance de l'écart vis-à-vis de la vitesse de déplacement de la cible <p>La vitesse de déplacement de la cible dans l'écran peut être supposée proportionnelle à α. L'écart devrait donc être proportionnel à la vitesse de la cible α. $\varepsilon = y_R(t) - y(t) = aT$</p> <p>Le retard T peut être obtenu à partir du coefficient de proportionnalité, à condition de connaître α.</p>	Dépendance de l'écart vis-à-vis de la vitesse de déplacement de la cible <p>L'écart est dans ce cas le même quelle que soit la vitesse de la cible. $\varepsilon = c$ Cet écart pourrait d'ailleurs être identifié cible immobile.</p>
Dépendance de l'écart vis-à-vis de la distance de l'écran <p>La distance de l'écran par rapport à la caméra a pour effet de modifier, pour une même vitesse de cible, la vitesse de la cible dans l'image filmée, et donc de modifier α.</p>	Dépendance de l'écart vis-à-vis de la distance de l'écran <p>Si l'écart ε est un écart pris dans l'image filmée (en pixels_image), alors la distance de l'écran ne devrait théoriquement pas avoir d'effet.</p>

3.2 Mesure de l'écart Ymes

3.2.1 Protocole expérimental

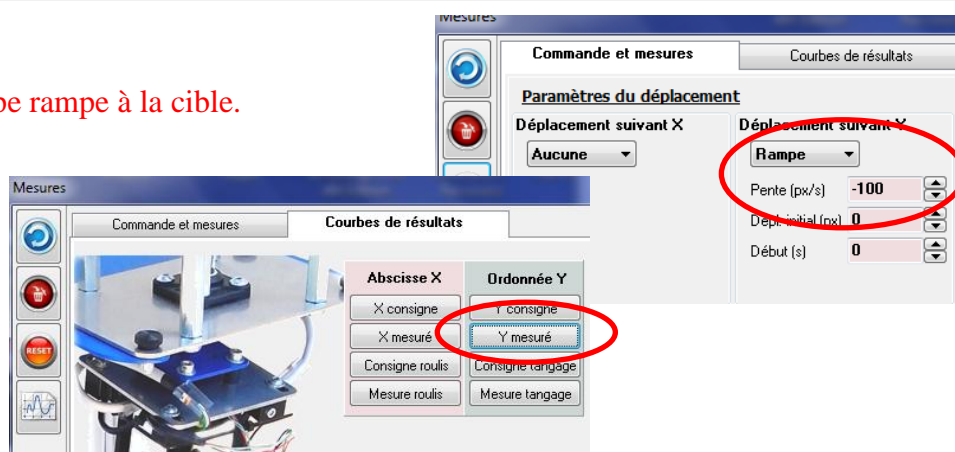
Préparation de la mesure

- L'écran est placé à une distance connue d (à plus ou moins 5mm), si possible centré sur le faisceau de la caméra
- La cible est placée à la limite haute de l'écran, mais de manière à être vue complètement
- Avant la mesure, on clique sur le bouton « viser » pour placer la cible au centre de l'image filmée (écart quasi nul au début de la mesure)

Mesure

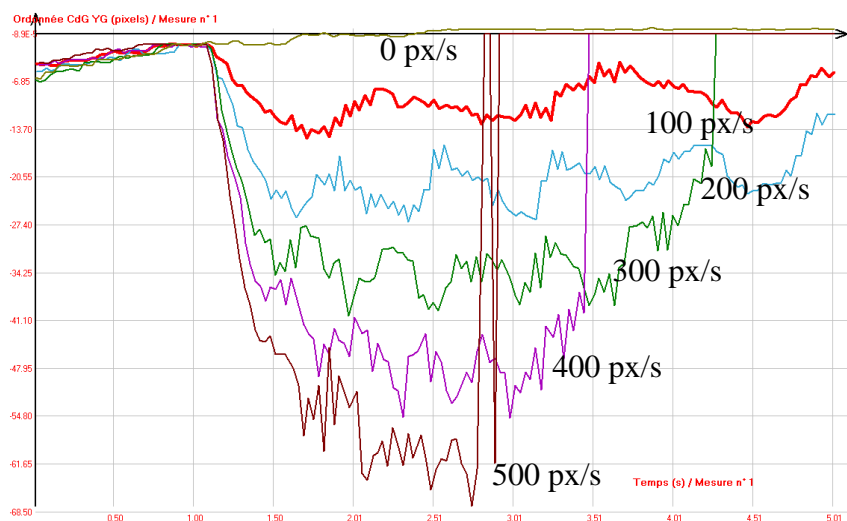
On sollicite avec des consignes de type rampe à la cible.

On trace en fonction du temps la position Y_{mes} .

**3.2.2 Résultats obtenus**

Variation de la vitesse de déplacement de la cible

Ce paramètre est modifié en faisant varier la pente de la rampe. L'écran est placé à une distance de 50cm.



vitesse de déplacement de la cible

Observations :

- En statique (pente de 0px/s) l'écart est quasi nul
- L'écart Y_{mes} semble converger vers une valeur Y_{moy} , même si elle n'est pas toujours observable à cause de la taille restreinte de l'écran (en plaçant l'écran à la verticale on peut améliorer ce point puisqu'on augmente la zone de déplacement possible de la cible)
- L'écart Y_{mes} augmente avec la

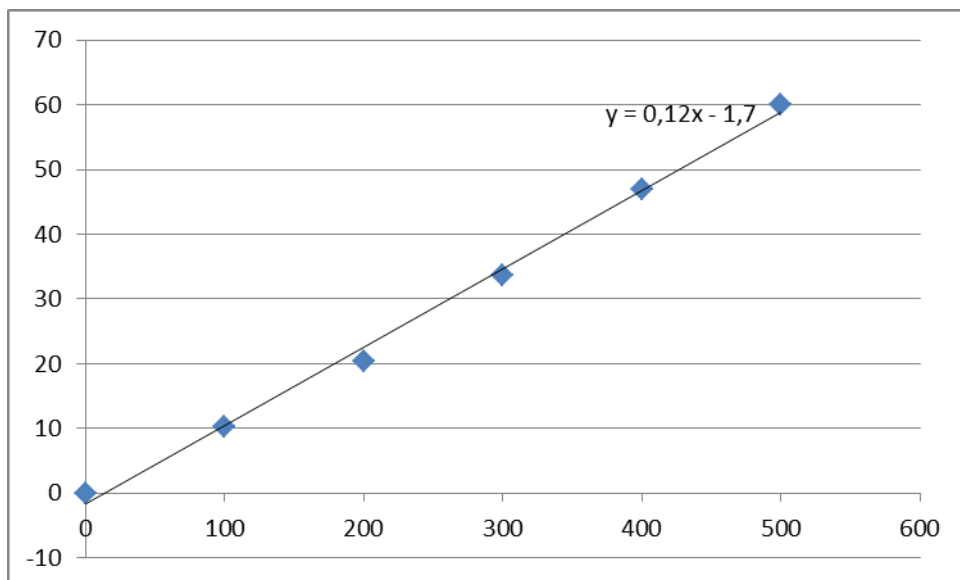
La valeur moyenne de l'écart en régime établi Y_{moy} (en valeur absolue) en fonction de la pente est tracée ci-contre.

On obtient une loi linéaire.

La performance de suivi dépend donc de la vitesse de déplacement de l'objet à suivre.

Ce type de comportement fait penser à un défaut de type « retard ».

On observe d'ailleurs qu'en statique cet écart est quasi nul.



On fera cette hypothèse par la suite.

Variation de la distance drone/cible

Ce paramètre est modifié en faisant varier la distance pivot caméra/écran.

On choisit une pente de 200 px/sec qui permet d'observer un écart, tout en étant compatible avec la course limitée de la cible consécutive à la taille de l'écran.

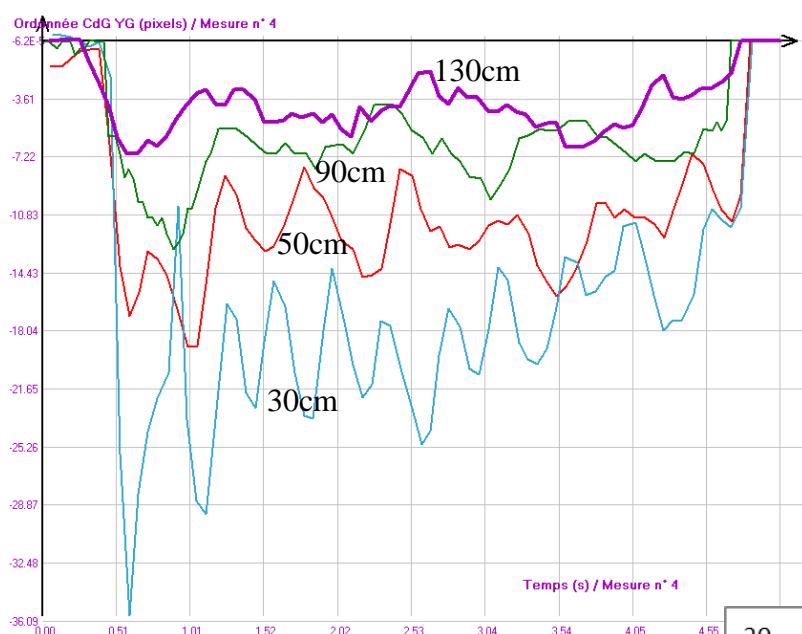
Observations :

L'écart diminue lorsque la distance de l'écran augmente.

La cible apparaît plus petite sur l'écran. La vitesse de déplacement de la cible dans l'image caméra est d'autant plus faible que l'écran est loin (pour une même valeur de pente).

Le comportement observé est donc cohérent avec les mesures précédentes.

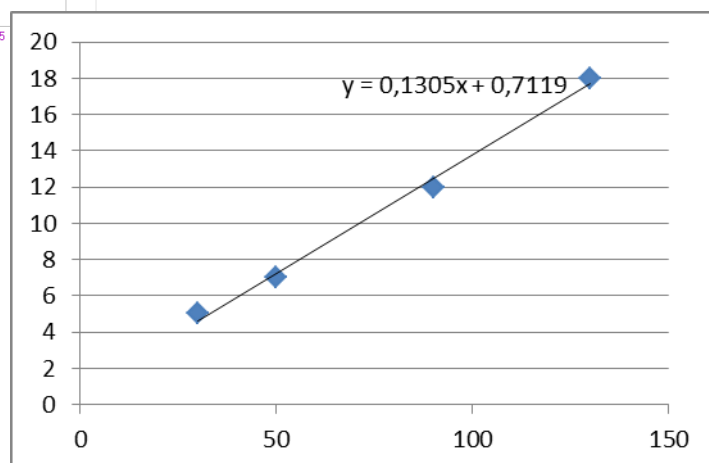
Cette manip devrait amener l'élève à se poser des questions quant à l'effet de la géométrie sur le comportement.



On trace la valeur moyenne de l'écart en régime établi Y_{moy} (en valeur absolue) en fonction de la distance de l'écran.

La loi semble linéaire.

La performance de suivi semble donc dépendre de la distance de l'écran.



3.3 Causes possibles de cet écart

Le moyen de mesure de l'écart (caméra + traitement d'image) pourrait être mis en cause, mais ce moyen de mesure fait aussi partie intégrante de la boucle d'asservissement, donc il est difficile d'imaginer qu'il est la seule cause de l'écart.

On peut identifier 2 éléments générateurs d'écart dans la boucle d'asservissement :

- **traitement d'image** : si le centre de la forme reconnue n'est pas confondu avec la forme réelle, la consigne d'angle donnée à la nacelle n'est pas cohérente, ce qui conduit à un défaut de centrage de la cible.
- **nacelle** : si l'angle atteint par la nacelle n'est pas conforme à la consigne qui lui est envoyée, on obtiendra aussi un défaut de centrage de la cible.

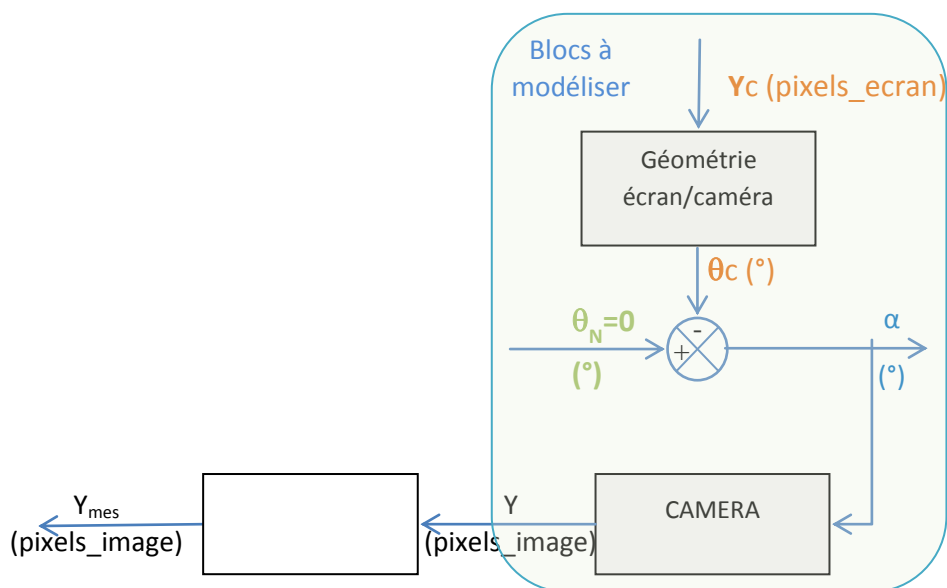
La suite du TP permet d'évaluer la part de chacun de ces éléments dans l'écart global.

4 PREMIÈRE SOURCE DE L'ÉCART : TRAITEMENT D'IMAGE

L'objectif de cette partie est d'évaluer uniquement la partie de l'écart provenant du traitement d'image.

Groupe modélisateur	Groupe expérimentateur
Imaginer un protocole expérimental permettant de ne mesurer que l'écart du au traitement d'image.	
<p>Réaliser le schéma fonctionnel simplifié associé.</p> <p>Proposer un modèle pour les blocs « caméra » et « géométrie écran/caméra ».</p>	<p>Proposer un protocole expérimental permettant de valider le modèle de la chaine « Géométrie écran /caméra », « Caméra ».</p> <p>Mettre en œuvre l'expérimentation.</p>
<p>Confronter modèle et comportement expérimental.</p> <p>Conclure sur la validité du modèle.</p>	
A l'aide des résultats expérimentaux obtenus, affiner votre modèle de la chaine « Géométrie écran /caméra», « Caméra ».	Mesurer l'écart provenant du traitement d'image pour différentes vitesses de déplacement de cible.

On suppose la nacelle fixe, afin de n'identifier que l'effet du traitement numérique de l'image sur l'écart.
 $\theta_N = 0$; donc $\alpha = -\theta_c$



Attention :

- La position de la cible dans l'écran de projection Y_c est donnée en pixel : il s'agit de pixels de l'écran de projection (noté pixels_ecran)
- La position de la cible dans l'image caméra (Y ou Y_{mes}) est aussi évaluée en pixels, mais il s'agit de pixels de l'image filmée par la caméra, (noté pixels_image).

Cet écart provient du traitement d'image et peut être quantifié par la quantité : $\varepsilon_1 = Y_{mes} - Y$

Il peut être mesuré en bloquant les moteurs (à l'aide des interrupteurs situés au niveau du socle de la nacelle) et en envoyant une consigne Y_c connue de type rampe à la cible. La grandeur mesurée est alors la position du centre de la forme reconnue dans l'image filmée (Y_{mes}).

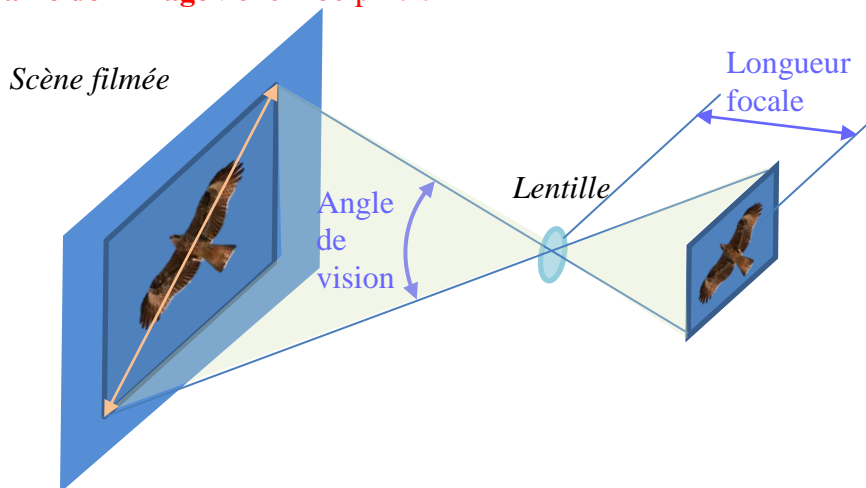
Pour comparer les grandeurs Y et Y_{mes} , il sera nécessaire de modéliser les 2 blocs (« Géométrie écran/caméra » et « Caméra »).

4.1 Modélisations des blocs

Modélisation du bloc caméra

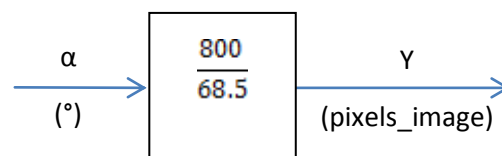
Angle caméra : 68.5° diagonale

Taille de l'image : 640*480 pixels



Longueur de la diagonale de l'image filmée (en pixels) : $\sqrt{640^2 + 480^2} = 800$ pixels

En faisant l'hypothèse de linéarité et en supposant le foyer optique sur l'axe de rotation de la nacelle on obtient :

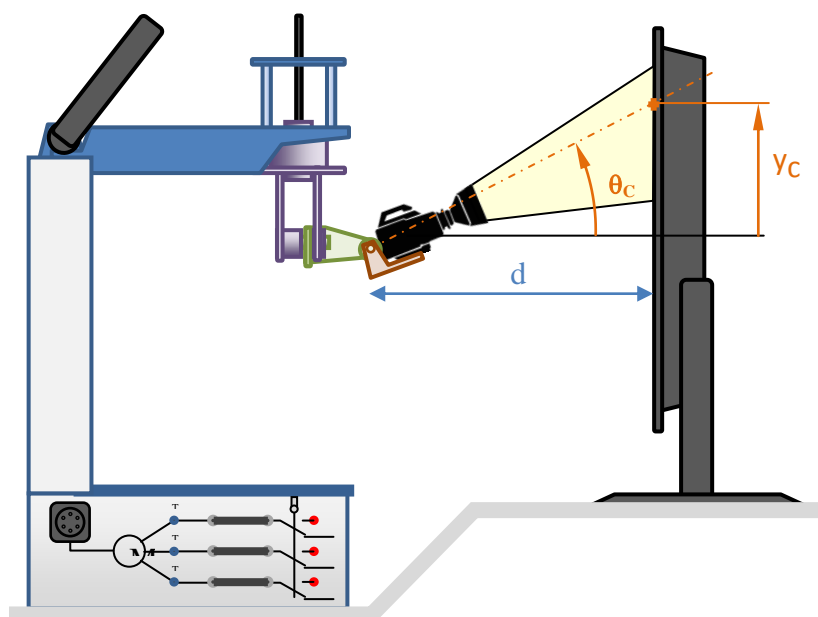


Modélisation de l'écran de projection de la cible

Dimension écran : 19'' ; 4/3 : hauteur 30 cm

Résolution écran : 1280*1024

Hauteur d'un pixel de l'écran cible : 0.29 mm

Modèle géométrique nacelle/écran

$$\tan(\theta_c) = \frac{Y_c}{d}$$

Hypothèse : angles petits

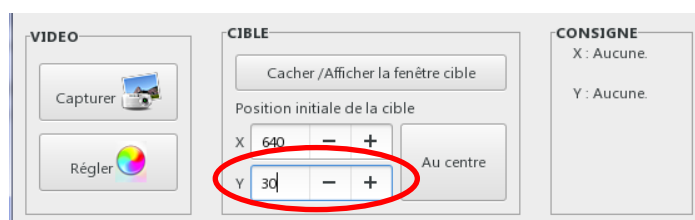
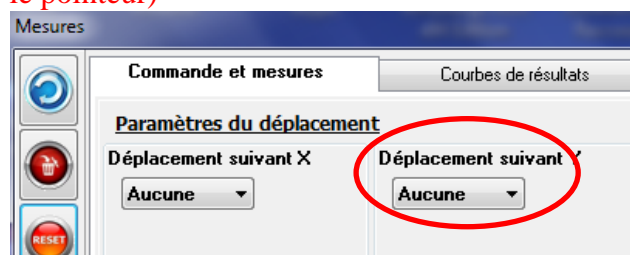
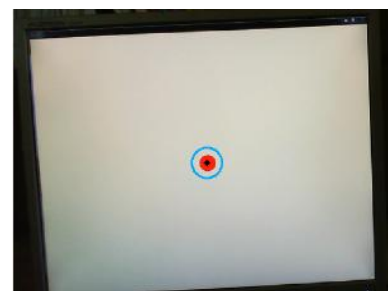
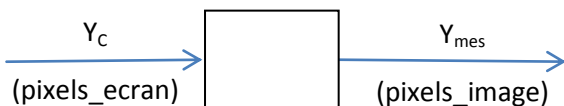
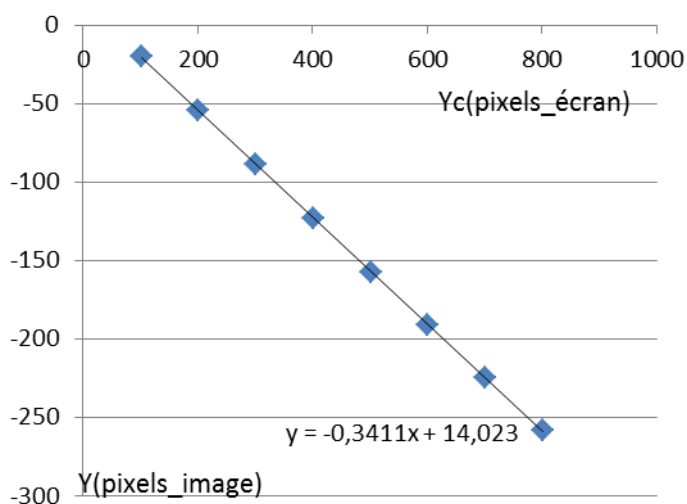
En linéarisant : $\theta_c = \frac{Y_c}{d}$

$$\begin{array}{c} Y_c \text{ (pixels_ecran)} \\ \downarrow \\ \frac{0.29180}{d \pi} \\ \downarrow \\ \theta_c (^\circ) \end{array}$$

Validation du modèle de la chaîne écran de projection – caméra (Yc- Y)

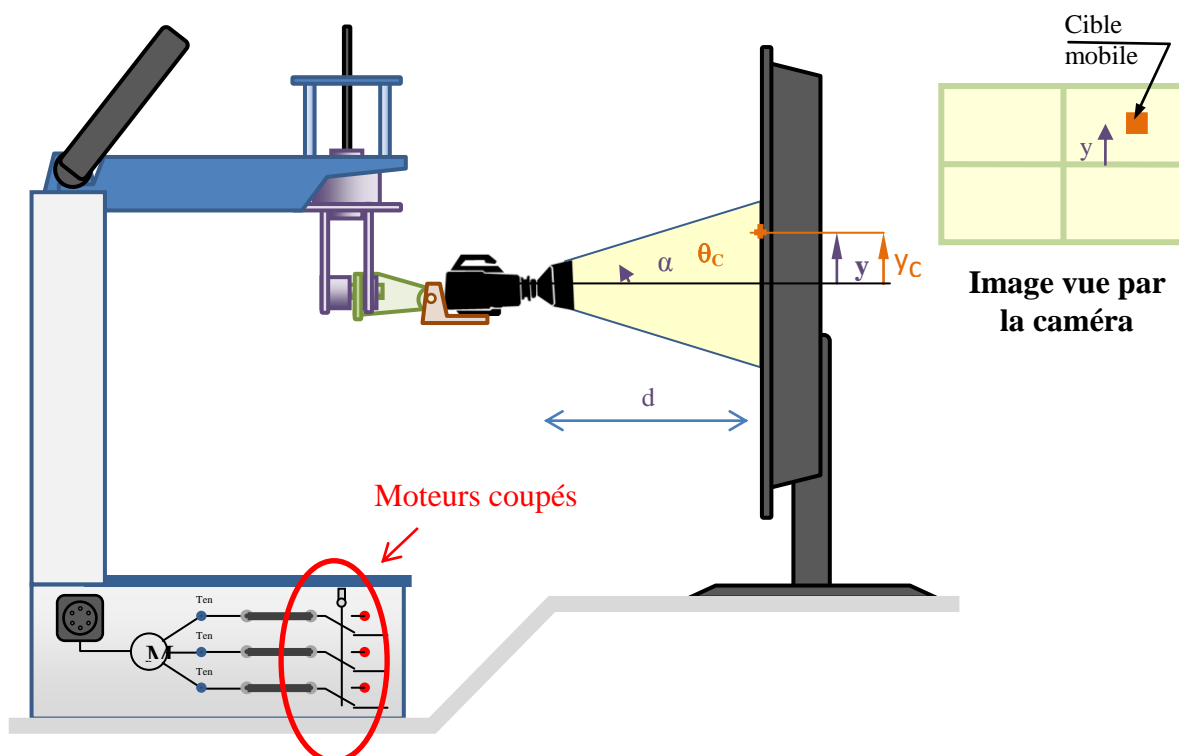
On peut valider ce modèle et notamment sa linéarité en statique, en traçant la position reconnue pour une position de cible donnée.

On effectue la mesure en statique, avec une cible de forme cercle, suffisamment petite de façon à pouvoir vérifier « visuellement » que le point reconnu est correct. (Vérification visuelle de la concentricité de la cible avec le pointeur)

**Loi théorique
(cf modèle ci-dessus)****Loi mesurée**

Conclusion :

- L'hypothèse de linéarité semble bien validée
- Le coefficient de 0.33 semble aussi validé (on peut affiner le modèle en utilisant le coefficient mesuré de 0.34)
- La hauteur de l'écran a aussi une influence sur la relation Y_c/Y_{mes} . Lors de la série de mesure la cible était placée au centre de l'écran pour $Y_c=501$. Elle se situait alors à envion 155 pixels dans l'image filmée.

4.2 Mesure de l'écart ε_1 pour une cible en mouvement**4.2.1 Protocole expérimental****Préparation de la mesure**

- Les moteurs sont coupés ; nacelle placée en position horizontale
- L'écran est placé à une distance connue d, si possible centré sur le faisceau de la caméra
- La cible est placée à la limite haute du champ de vision de la caméra

Mesure

On sollicite avec des consignes de type rampe à la cible. Il est préférable de démarrer la rampe après un certain temps (début = 1s par exemple), de façon à éviter un retard dû à la mise en action du logiciel.

On trace en fonction du temps les 2 grandeurs suivantes :

- Y consigne (consigne cible Y_c)
- Y mesuré (Y_{mes})

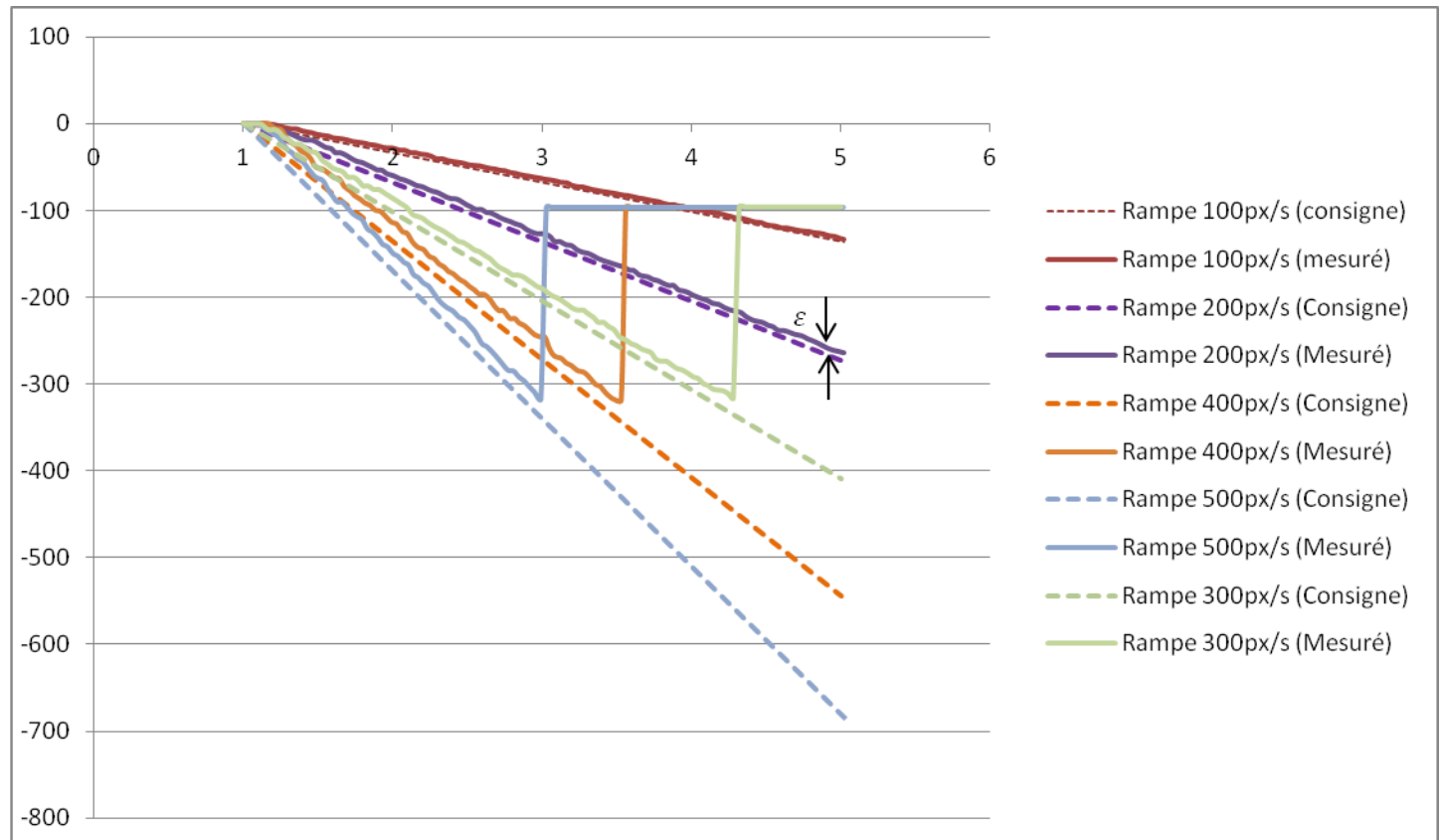
4.2.2 Traitement des résultats

Pour pouvoir comparer consigne cible Y_c et position mesurée Y_{mes} , il faut convertir la consigne de la cible en pixels sur l'image filmée, en utilisant le modèle de la chaîne effectué précédemment.

$$Y_c(\text{pixel_image}) = Y_c(\text{pixel_ecran}).0.34 + Y_0$$

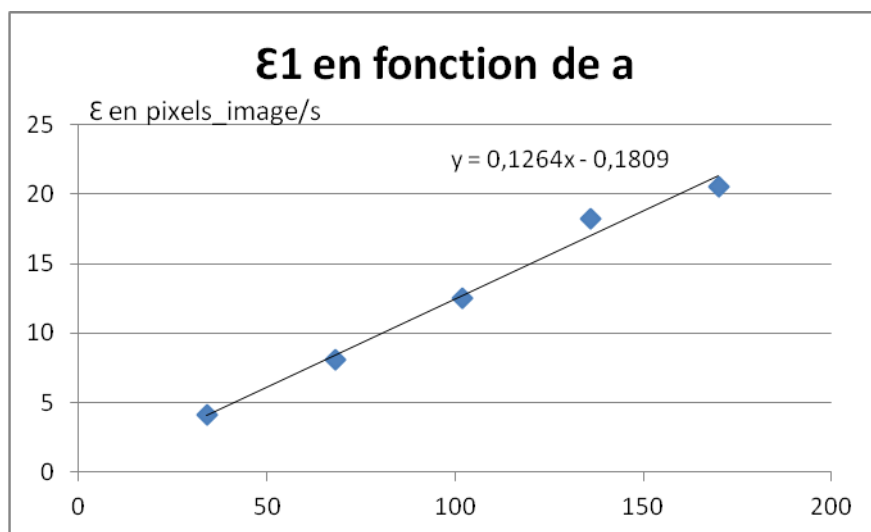
Un recalage d'origine (Y_0) est aussi nécessaire, car la position de départ dépend de la hauteur de l'écran et de la position initiale de la cible dans l'image. Pour cela, on fait toujours l'hypothèse qu'à l'instant de départ de la mesure position de la cible et position reconnue sont parfaitement confondues.

4.2.3 Analyse des résultats



L'écart ε_1 en régime établi est quasiment constant. Il est d'autant plus grand que la pente de la rampe est importante.

On trace cet écart en fonction de la pente de la consigne (a), exprimée en pixels_image.



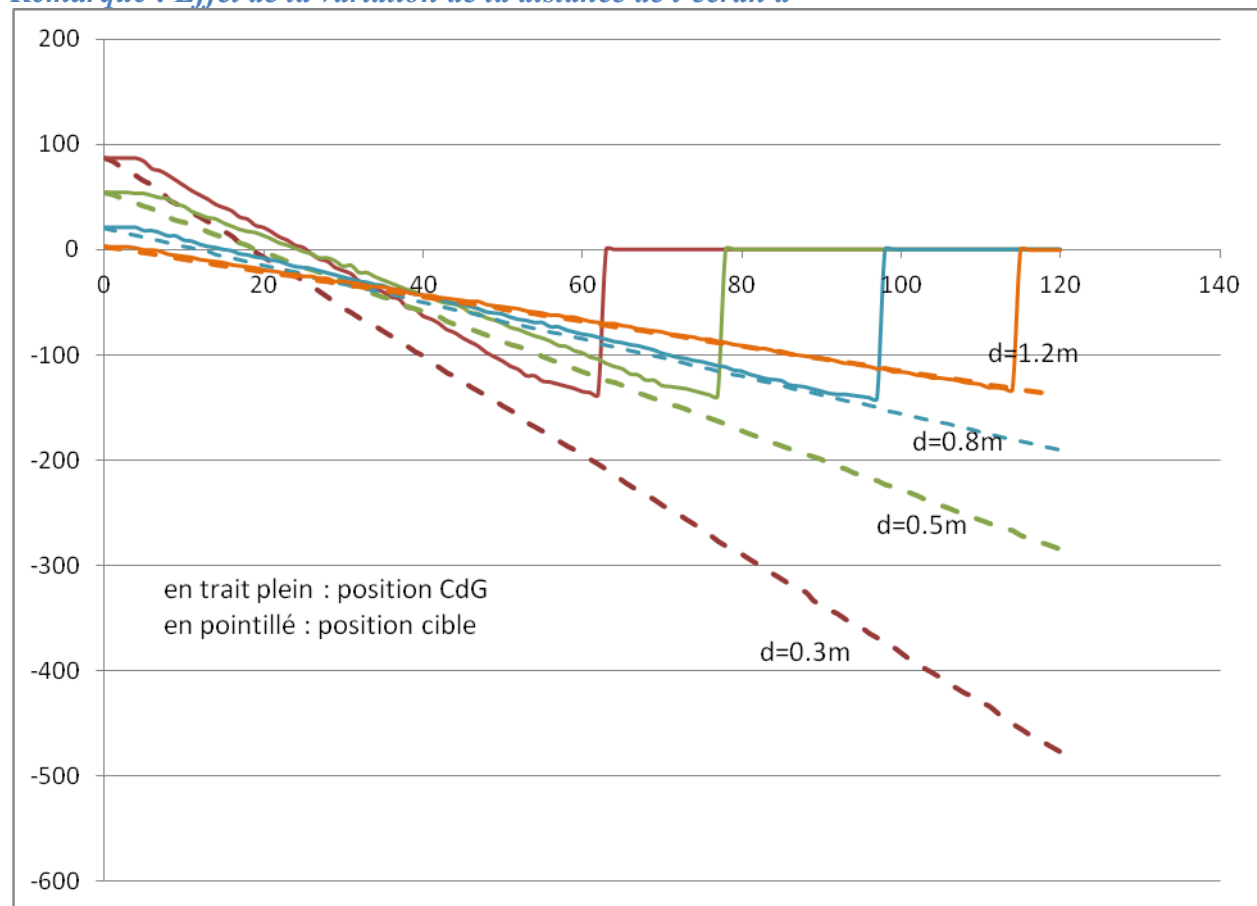
On obtient une droite, ce qui permet de conclure à un défaut de type retard pur.

$$\varepsilon_1 = y_R(t) - y(t) = aT$$

En analysant la pente de la droite on évalue ce retard à $T = 0.12s$.

Cette évaluation semble cohérente (la caméra donne 30 images/seconde, soit une image toutes les 0.03s, auquel il faut rajouter les temps de traitement, le temps de latence de l'écran, ...)

Remarque : Effet de la variation de la distance de l'écran d



Les courbes restent parallèles, ce qui fait penser plutôt à un écart de type retard.

L'écart augmente avec la distance mais ceci est dû à l'effet d'éloignement optique (un éloignement de l'écran conduit finalement à une diminution de vitesse).

5 SECONDE SOURCE DE L'ÉCART : COMPORTEMENT DE LA NACELLE

Pour cette partie on pourra utiliser le Viewer « Nacelle_NC10 ».

On rappelle que le Viewer vidéo utilise les paramètres suivants pour la chaîne d'asservissement de la nacelle (asservissement par plateforme inertielle) : $K_p=800$; $K_i=800$; $K_d=1500$.

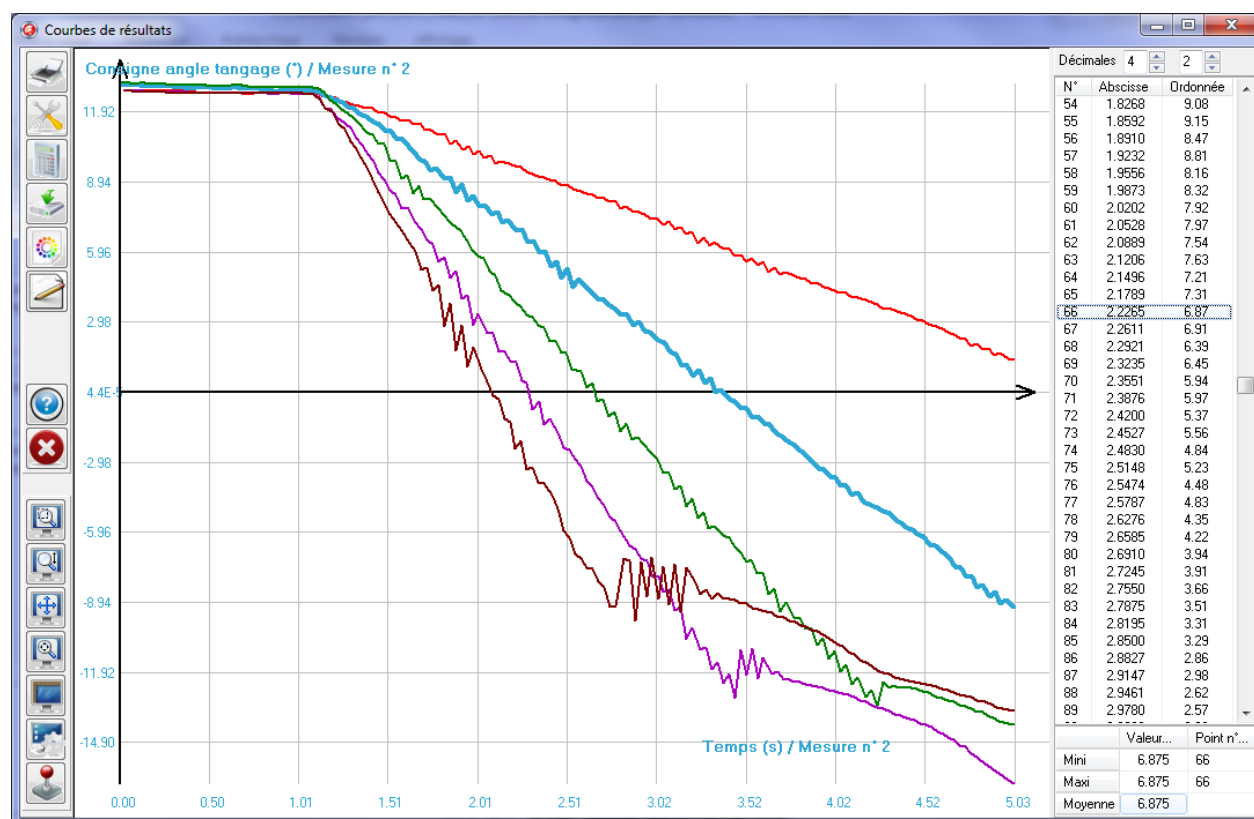
Groupe modélisateur	Groupe expérimentateur
Imaginer un protocole expérimental permettant de ne mesurer que l'écart du au comportement de la nacelle.	
Réaliser le schéma fonctionnel simplifié associé. Indiquer le type de consigne à imposer à la nacelle pour recréer les conditions de l'essai qui a permis d'obtenir l'écart global. Indiquer les traitements nécessaires pour convertir l'écart angulaire de positionnement en écart en pixel sur l'image filmée.	Mettre en œuvre l'expérimentation pour différentes vitesses de déplacement de la cible.
Traiter les résultats obtenus pour obtenir un écart en pixel sur l'image filmée comparable avec les écarts précédemment obtenus.	

5.1 Protocole expérimental

Pour évaluer cet écart, on sollicite la nacelle seule (en utilisant le viewer « Nacelle_NC10 ») avec des consignes de type rampe.

Attention : le réglage du PID de la nacelle doit être conforme à celui utilisé lors du pilotage vidéo : $K_p=800$; $K_i=800$; $K_d=1500$.

Pour obtenir la valeur des pentes des consignes, on utilise les mesures faites précédemment pour différentes vitesses de déplacement de cible, et on trace la consigne de tangage envoyée à la nacelle :



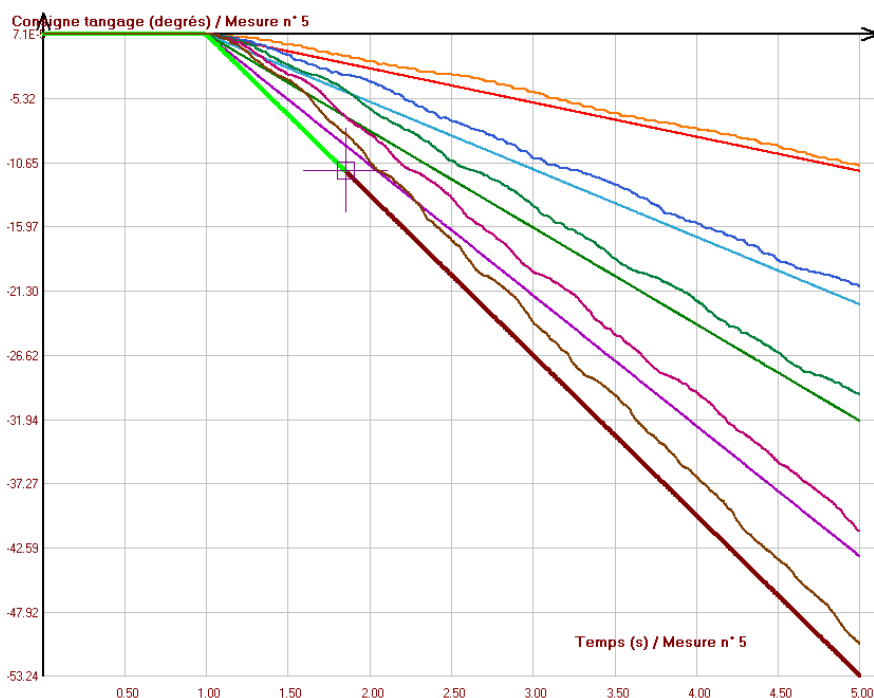
On relève les pentes des consignes angulaires :

penne rampe cible (px/s)	penne consigne angle nacelle (°/s)
100	-2,8
200	-5,6
300	-8,0
400	-10,8
500	-13,3

On relève ensuite l'écart angulaire obtenu : $\varepsilon_2(^{\circ}) = \theta_{cons} - \theta_{N_mes}$

Hypothèse : on néglige ici l'erreur de mesure faite sur θ_{N_mes} .

5.2 Résultats obtenus



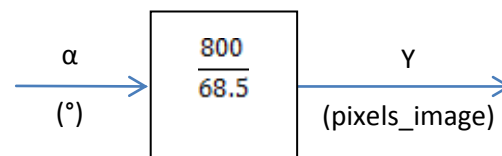
On observe aussi un écart $\varepsilon_2(^{\circ})$ qui est relativement constant, une fois le régime établi.

Cet écart augmente avec la pente.

pente rampe cible (px/s)	pente consigne angle nacelle ($^{\circ}$)	Ecart : $\varepsilon_2 (^{\circ})$
100	-2,9	0,44
200	-5,6	1,5
300	-8,0	2,2
400	-10,8	2,1
500	-13,38	2,6

5.3 Conséquences sur l'écart de suivi

En utilisant le bloc modélisé plus haut, on peut obtenir la conséquence de cet écart sur l'écart en pixel :



pente rampe cible (px/s)	pente consigne angle nacelle ($^{\circ}$)	Ecart $\varepsilon_2 (^{\circ})$	conséquence sur Y (pixel) ε_2 (pixel)
100	-2,8	0,44	5,1
200	-5,6	1,5	17,5
300	-8,0	2,2	25,6
400	-10,8	2,1	24,5
500	-13,3	2,6	30,3

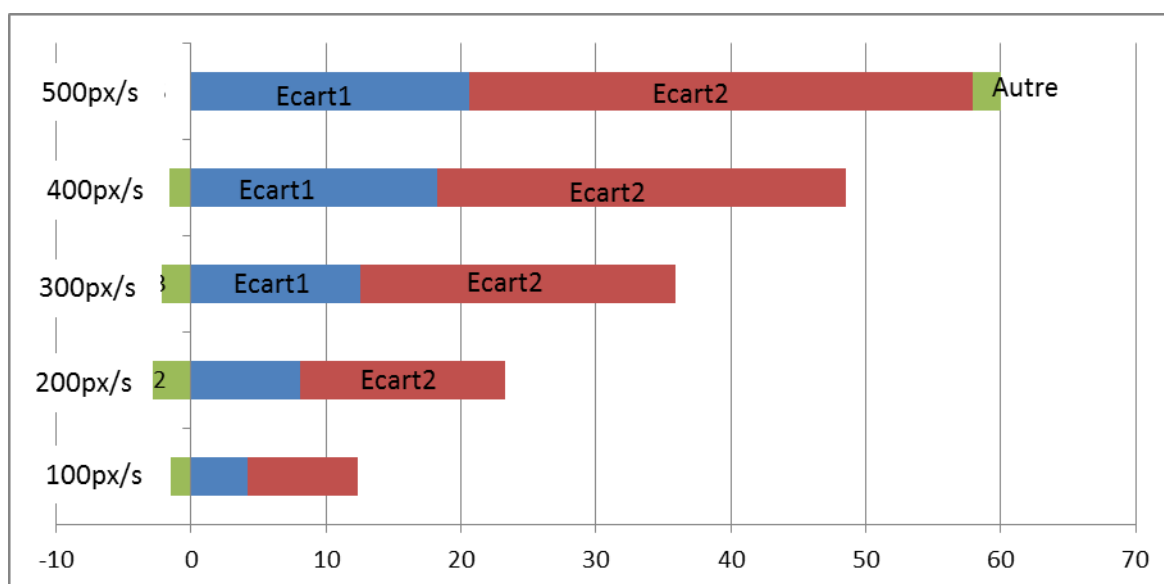
6 SYNTHESE

Réaliser une synthèse des résultats des 2 parties précédentes, afin d'identifier la part du traitement d'image et celle du comportement de la nacelle dans l'écart global.

Conclure.

pente rampe cible (px/s)	Ecart global ε (px)	Ecart 1 (reconnaissance) ε_1 (px)		Ecart 2 (nacelle) ε_2 (px)	
100	10,2	4,1	41%	8,1	80%
200	20,4	8,09	40%	15,1	74%
300	33,7	12,5	37%	23,3	69%
400	47	18,2	39%	30,3	65%
500	60	20,5	34%	37,3	62%

Part de chaque cause dans l'erreur globale :



En vert est représentée la différence entre l'écart global et la somme des écarts1 et 2. Il s'agit de la part de l'écart qui reste non expliquée. Cette valeur est parfois négative ce qui n'est théoriquement pas possible (puisque les 2 écarts agissent dans le même sens et ne devraient pas se compenser). Ceci vient probablement des hypothèses réalisées plus haut (imprécision des moyens de mesure, modèles utilisés, linéarisation, mesure approximative de la distance de l'écran...).

Les 2 causes étudiées semblent avoir une importance prédominante sur le respect de l'exigence associée au suivi.

La première source de l'écart semble provenir du comportement mécanique de la nacelle (>60%), qui réagit avec un certain retard (inerties...). Cependant l'effet du traitement d'image n'est pas négligeable.

Ces 2 causes semblent être de type « retard ».

On peut noter que d'autres paramètres comme notamment la distance avec la cible auront un impact sur le suivi. En condition réelles, la qualité de l'image jouera aussi très certainement un rôle. On note qu'aussi les tests ont été faits à vitesse constante et qu'on pourrait observer un comportement différent avec des consignes différentes.

Une amélioration des performances passera donc soit par une amélioration du comportement mécanique, soit par une amélioration de la rapidité des algorithmes de traitement. On peut aussi imaginer qu'une modification du mode d'élaboration de la consigne avec un correcteur plus évolué pourrait avoir un effet bénéfique.

On peut imaginer réaliser ce même TP dans d'autres configurations : modification de l'inertie de la nacelle, modification de la fréquence d'acquisition de la caméra, modification du type de consigne et voir l'impact de ces modifications sur les performances de suivi.