

# Bougez, vous êtes filmés

NICOLAS MALÉSYS\*

*L'étude des mouvements dans les filières des sciences de l'ingénieur tient une part importante dans les programmes, que ce soit en pré-bac ou en post-bac. Cet article présente un logiciel de traitement d'images et de vidéos numériques qui permet une exploitation facile et rapide des résultats expérimentaux.*

Pour introduire les notions de trajectoire, de déplacement, de vitesse, voire d'accélération, il est très utile de faire appel à un modèleur volumique et à un outil de calcul adapté (Solidworks avec Meca3D, par exemple) et, après un travail non négligeable (surtout si on ne dispose pas d'une maquette numérique adaptée au besoin de la séquence), d'obtenir un résultat simulé de chacune de ces quantités. Mais qu'en est-il des résultats expérimentaux de supports de TP disponibles dans nos laboratoires ? Ils semblent limités aux seuls capteurs installés. Un moyen de mesure quasiment gratuit permet d'apporter de nouveaux capteurs à nos TP : le traitement d'images numériques et, plus généralement, des vidéos numériques.

Cet article présente le fonctionnement d'un tel logiciel, Tracker, sur des systèmes déjà présents dans les laboratoires de sciences de l'ingénieur. Le logiciel est disponible sur Internet (voir encadré En ligne). En plus d'être compatible avec tous les systèmes d'exploitation (Windows, Mac OS X et Linux), il est gratuit, *open source*, dispose d'une interface intuitive en français et accepte beaucoup de formats d'encodage vidéo. Le seul budget à prévoir est l'achat d'une webcam et, là encore, il est possible de s'en affranchir en utilisant un smartphone pour l'enregistrement !

## Prise en main

### Acquisition vidéo

L'acquisition de la vidéo d'un système en mouvement peut se faire via une webcam, un caméscope, voire un smartphone, l'un des intérêts de Tracker étant de pouvoir traiter plusieurs formats d'encodage vidéo (mov, avi, flv, mp4, wmv...). Une seule limite imposée par le traitement d'images proposé par Tracker est de placer le plan de la caméra parallèlement au plan du mouvement afin d'avoir des mesures conformes à la réalité ; on s'affranchit alors des mouvements hors plan.

### MOTS-CLÉS

travaux pratiques, sciences de l'ingénieur, transmission d'information, cinématique, dynamique, mesures


Pour les applications de cet article, la webcam Microsoft Lifecam HD-5000 a été utilisée avec le logiciel VLC. Tous les paramètres de la caméra ont été passés en mode manuel, notamment l'exposition et la mise au point, afin de garantir une image la plus stable possible et ainsi faciliter l'exploitation de la vidéo par Tracker.

Il ne semble pas nécessaire de choisir une résolution importante. On préférera privilégier une fréquence d'images élevée. Ainsi, les vidéos utilisées dans cet article ont une résolution de 800 x 600 pixels et une fréquence de 15 ou de 7,5 images/seconde.

Il est aussi possible de préparer le système à analyser en disposant des pastilles de couleur sur les points que l'on cherche à repérer afin d'augmenter localement le contraste de l'image.

### Utilisation de Tracker

**Import d'une vidéo :** à l'ouverture de Tracker, cliquer sur Fichier/Importer/Vidéo, puis sélectionner la vidéo désirée. Il est aussi possible de glisser la vidéo de l'explorateur de fichiers vers Tracker. La vidéo se charge alors automatiquement.

À partir du menu de navigation (en bas) de la vidéo , il est possible de définir les images de début et de fin de la séquence désirée en déplaçant les triangles noirs en dessous de la barre d'évolution.

**Système d'axes :** il est possible de modifier le système d'axes sur la vidéo. Par défaut, celui-ci est placé au centre, l'axe des abscisses est horizontal, celui des ordonnées vertical. L'intérêt de cette modification est double puisque l'origine du système d'axes sera utilisée pour définir les paramètres abscisses et ordonnées des points recherchés et l'orientation de la base permet de « redresser » l'image dans le cas où la vidéo serait inclinée. Pour afficher le système d'axes, cliquer sur le bouton représentant deux axes violets perpendiculaires dans la barre d'outils. Avec la souris, faire glisser l'origine pour le placer à l'endroit désiré et, pour modifier l'orientation, cliquer sur l'axe des abscisses positives (le curseur « flèche » se transforme en curseur « main »). On pourra utiliser la molette de la souris pour zoomer/dézoomer afin de régler la précision.

**Échelle :** l'échelle doit toujours être imposée afin d'obtenir des valeurs (positions, distances, vitesses, accélérations) conformes au système réel. Pour fixer l'échelle, il faut insérer un « bâton de mesure » accessible via une icône (présentant un 10 entre deux croix) dans la barre d'outils. Il suffit alors de placer les

\* Professeur de sciences de l'ingénieur en PCSI et MPSI, lycée Pasteur, Neuilly-sur-Seine (92). Tous les visuels ont pour copyright Nicolas Malésys.

extrémités du bâton de mesure sur la distance connue de l'image et de préciser cette distance.

**Points recherchés :** le logiciel Tracker a été initialement développé pour des applications physiques de recherche de mouvement de masses ponctuelles. Il faut donc associer une masse ponctuelle à chaque point dont l'évolution temporelle est recherchée via l'icône « Créer » de la barre d'outils. Pour fixer la position de celle-ci sur l'image, appuyer à la fois sur CTRL+SHIFT et faire un clic gauche avec la souris. Il est possible de changer la forme, la couleur et le nom de la masse ponctuelle, qui, par défaut, pour la première masse mise en place, s'appelle « masse A ».

Lors de la création de la masse ponctuelle, un gabarit circulaire est créé autour du point ainsi qu'une zone de recherche **2** : Tracker cherchera, dans l'image suivante, le gabarit dans la zone de recherche. Bien sûr, à chaque nouvelle image, la position du gabarit et de la zone de recherche est réactualisée. Ces deux entités peuvent être modifiées et déplacées à la souris.

**Recherche automatique :** dans la fenêtre qui est apparue à la suite de la création de la masse ponctuelle **3**, différents paramètres sont accessibles. En laissant le pointeur sur un des paramètres, l'aide associée s'affiche dans la fenêtre.

On retrouve, en haut, le gabarit et la concordance, cette dernière affichera le nouveau gabarit trouvé par Tracker dans l'image suivante.

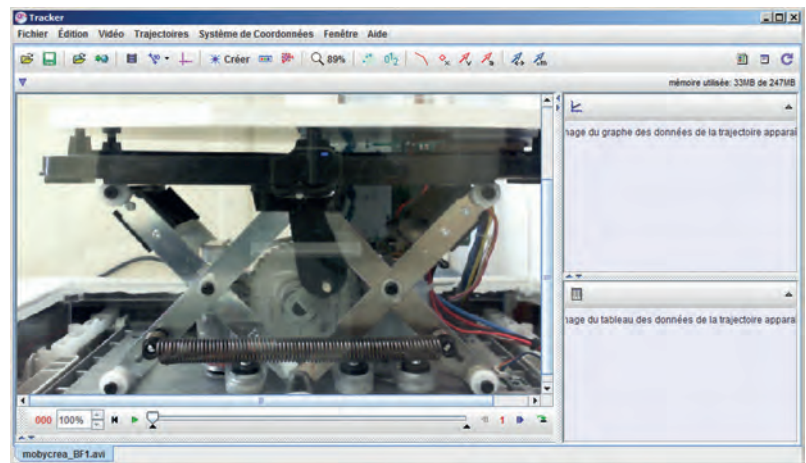
Par défaut, dans le cas d'une vidéo « propre », il est conseillé de ne rien changer. Si la recherche automatique n'aboutit pas ou que des points semblent incohérents, il faudra alors peut-être augmenter le taux d'évolution du gabarit pour prendre en compte le fait que l'image du gabarit ne reste pas constante dans le temps (orientation, teinte, etc.).

Il ne reste plus qu'à cliquer sur le bouton Chercher pour que Tracker fasse son analyse des images.

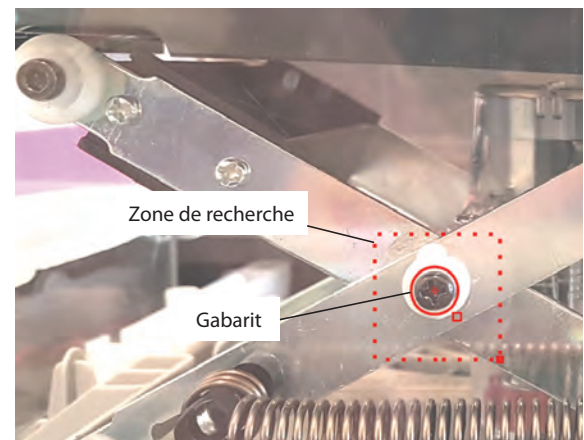
**Visualisation des résultats :** il est possible de choisir le mode d'affichage du résultat sur la vidéo via la barre d'outils, avec, dans l'ordre, la longueur de la trace (limite le nombre de points affichés à l'écran), le numéro des points, la trajectoire des points, la position, la vitesse et l'accélération.



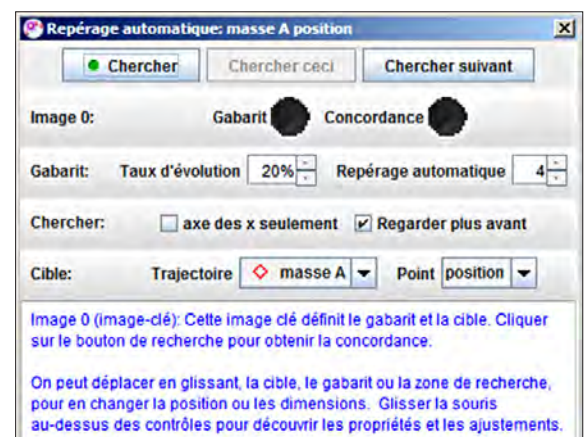
**Utilisation des données :** Tracker permet de tracer des courbes de tous les paramètres, mais il semble beaucoup plus efficace d'exporter les données pour en faire une analyse plus poussée dans un tableur ou via un code informatique adapté.



**1** Interface du logiciel Tracker (GNU licence version 3, GPL - 3.0)



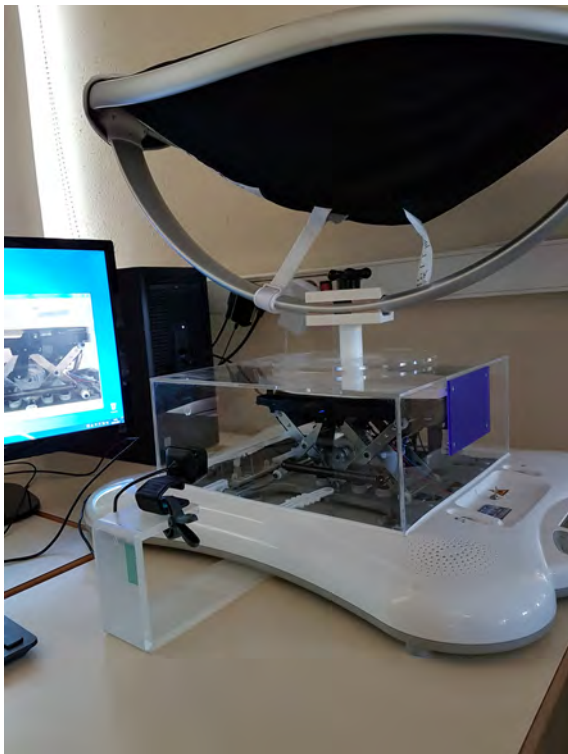
**2** Aperçu du gabarit et de la zone de recherche associée



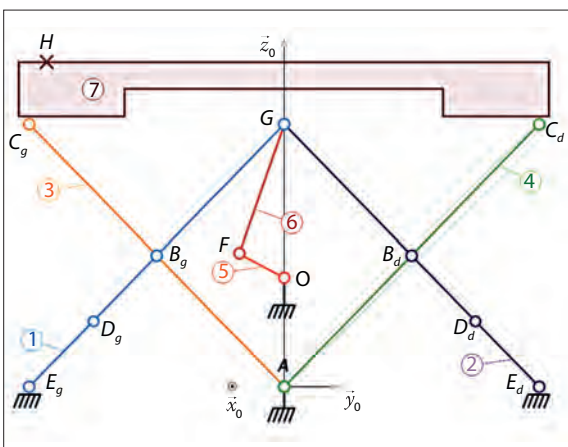
**3** Fenêtre de réglage du repérage automatique



4 Choix des données accessibles dans le tableau



5 Berce-bébé Mobycrea



6 Schéma cinématique de l'axe vertical du Mobycrea

En bas à droite de la fenêtre Tracker, les points mesurés apparaissent, avec, par défaut, pour une masse ponctuelle, l'évolution du temps, de l'abscisse et de l'ordonnée. Toutefois, il est possible d'avoir accès

à d'autres paramètres, comme la position en coordonnées cylindriques, la vitesse, l'accélération, etc. Pour choisir les paramètres, cliquer sur Tableau de données et les sélectionner dans la fenêtre 4.

L'export des données peut être fait en sélectionnant toutes les données (CTRL+A) dans le tableau, puis par un simple copier/coller dans un tableur. Une autre possibilité consiste à passer par le menu Fichier/Exporter/Fichier de données et choisir les caractéristiques du fichier CSV qui sera créé (il faut penser à préciser l'extension du fichier).

### Premières mesures : les trajectoires

Cette partie se base sur l'étude du banc Mobycrea de la société CreaTechnologie 5. Il s'agit d'un berce-bébé automatique qui permet de réaliser un mouvement plan d'une nacelle en combinant un mouvement horizontal et un mouvement vertical, chacun disposant de sa propre chaîne d'énergie basée sur une transformation de mouvement par un système de bielle/manivelle.

L'étude se limitera au seul mouvement vertical dont le schéma cinématique est donné par la figure 6. La manivelle 5 est motrice et entraîne en translation la nacelle 7 par le biais d'un mécanisme dit à ciseaux, réalisés ici par les pièces 1, 2, 3 et 4.

### Mesures de trajectoires

Le logiciel Tracker a été mis à contribution pour établir les trajectoires expérimentales des points physiques (ou matériels) A, B<sub>g</sub> à E<sub>g</sub>, F à H. Les résultats sont donnés dans la figure 7 et la figure 8 reprend ces résultats sur un graphique.

La trajectoire du point E lié à la pièce 1 peut être approximée par une droite et permet de déduire le mouvement de translation rectiligne du centre du galet par rapport au bâti. Par contre, la trajectoire du point D, lié lui aussi à la pièce 1, est quelconque ; le mouvement de la pièce 1 par rapport au bâti est donc quelconque.

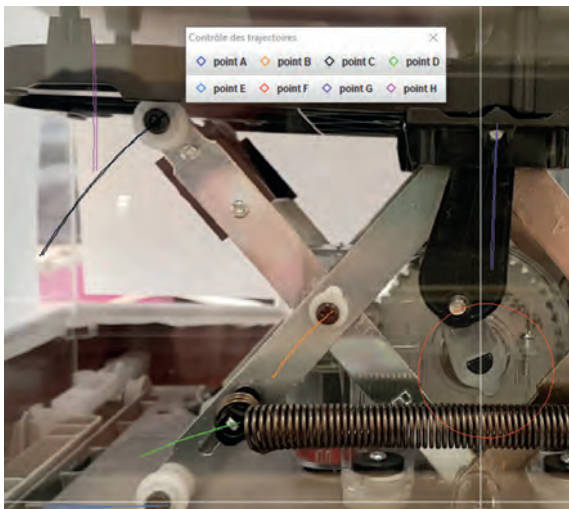
Les trajectoires des points B et C, liés tous deux à la pièce 3, sont des arcs de cercle centrés sur le point A et confirment le fait que la pièce 3 est en mouvement de rotation de centre A par rapport au bâti.

Le point F, lié à la manivelle, décrit un cercle centré sur le point O au cours du mouvement ; la manivelle est donc en mouvement de rotation par rapport au bâti de centre O.

Enfin, le mouvement d'un point H de la nacelle décrit une droite verticale, celle-ci est en effet en translation par rapport au bâti.

### Référentiel mobile

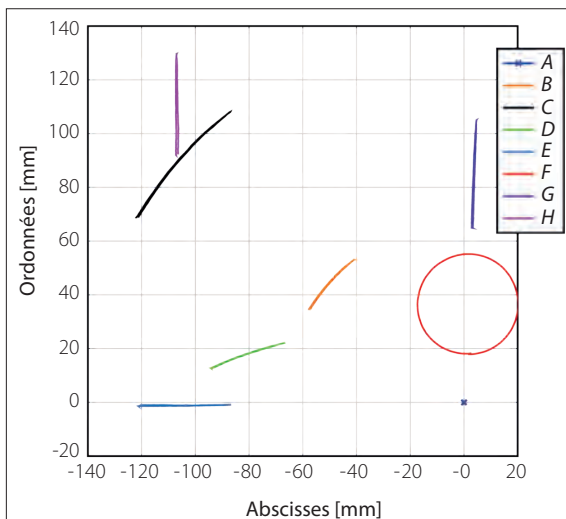
Les trajectoires ont toutes été établies par rapport à un référentiel fixe, le bâti. Toutefois, Tracker permet la mise en place de référentiel mobile.



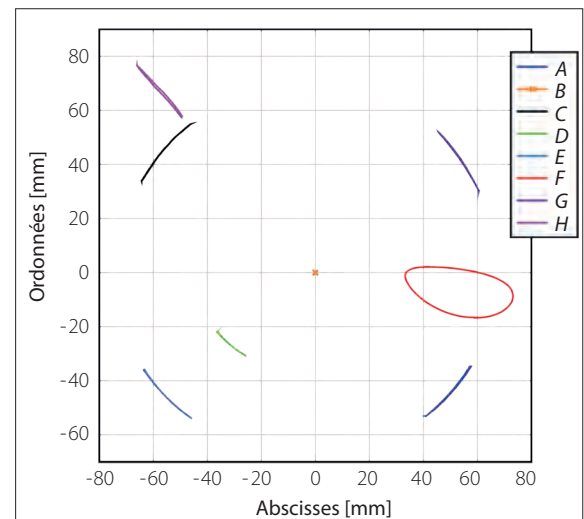
7 Trajectoires des points dans le référentiel lié au bâti



10 Trajectoires des points dans le référentiel mobile lié au point B



8 Trajectoires des points dans le référentiel lié au bâti : représentation graphique

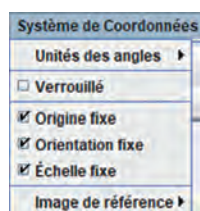


11 Trajectoires des points dans le référentiel mobile lié au point B : représentation graphique

Il suffit pour cela d'aller dans le menu Système de coordonnées, de décocher l'option désirée 9, puis d'associer une masse ponctuelle déjà définie pour l'origine du repère, par exemple pour un repère dont l'origine serait mobile. La liste des coordonnées des masses ponctuelles sera alors définie dans la base mobile.

Toutefois, à l'écran, les trajectoires resteront identiques au cas d'un référentiel fixe (puisque le bâti dans la vidéo reste fixe).

Pour tracer les trajectoires dans la base mobile, cliquer dans le cadre haut droit (celui où est affichée par défaut la courbe d'évolution temporelle de l'abscisse  $x$ ) sur le bouton Graphe (montrant des axes de coordonnées) et choisir Affichage global. Les figures 10 et 11 donnent les trajectoires des mêmes points que précédemment, mais pour lesquels l'origine du repère a été choisie au point B.



9 Réglages possibles du système d'axes

Les trajectoires des points A, C (liés à la pièce 1), D et E (lié à la pièce 3) montrent bien que le point B est le centre de la liaison pivot entre les pièces 1 et 3. On remarquera aussi les trajectoires quelconques des points F et H.

Remarque : lors d'un changement d'origine du système d'axes, il n'est pas nécessaire de relancer la recherche automatique des différents points, les résultats obtenus précédemment sont automatiquement « convertis ».

### Validation de l'outil Tracker

Avant de se lancer dans des utilisations un peu plus poussées de Tracker, il est nécessaire de s'assurer de la validité de l'outil de mesure. Prenons comme base de validation le bras de robot Maxpid et notamment la cinématique du bras.

**Présentation du bras Maxpid**

Le bras de robot Maxpid <sup>12</sup> reprend l'architecture employée par la société Pellenc dans la réalisation d'articulation motorisée asservie de bras de robot. La figure <sup>13</sup> présente le schéma cinématique associé au banc Maxpid sur lequel des pastilles de couleurs ont été mises en place au niveau des articulations en A, B et C pour faciliter le travail de Tracker.

**Loi entrée/sortie**

La validation de l'outil Tracker se fera sur la comparaison des résultats expérimentaux et théoriques de la loi entrée/sortie.

La loi entrée/sortie du bras, qui permet de relier l'angle du bras (b) par rapport au bâti (sortie) à la position de l'écrou (e) par rapport au point B du bâti (entrée), est obtenue à partir d'une fermeture géométrique :

$$\overline{OA} + \overline{AC} = \overline{OB} + \overline{BC}$$

Les deux relations scalaires, issues de la projection de la relation vectorielle dans la base associée au bâti, sont :

$$\begin{cases} a + c \cos \theta = \lambda \cos \alpha \\ c \sin \theta = b + \lambda \sin \alpha \end{cases}$$

En éliminant le paramètre angulaire  $\alpha$ , on se retrouve avec la loi entrée/sortie :

$$\lambda^2 = a^2 + b^2 + c^2 + 2c(a \cos \theta - b \sin \theta)$$

**Protocole expérimental**

La figure <sup>14</sup> présente le protocole expérimental. Afin de limiter les reflets sur la vitre de protection, celle-ci a été laissée ouverte le temps de la manipulation. La caméra a été fixée sur le pied (fourni avec le Moby-crée) en face du bras de robot.

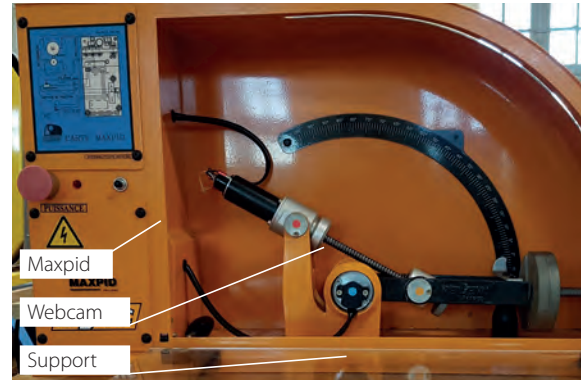
La vidéo réalisée reprend les mêmes paramètres de réglages que ceux exposés plus haut, avec notamment une résolution de 800 x 600 pixels et une fréquence d'acquisition de 7,5 images par seconde.

Dans Tracker, l'origine du système d'axes a été placée au point A, l'orientation des axes n'a pas été modifiée. Le bâton de mesure utilisé correspond aux 70 mm de la distance OA.

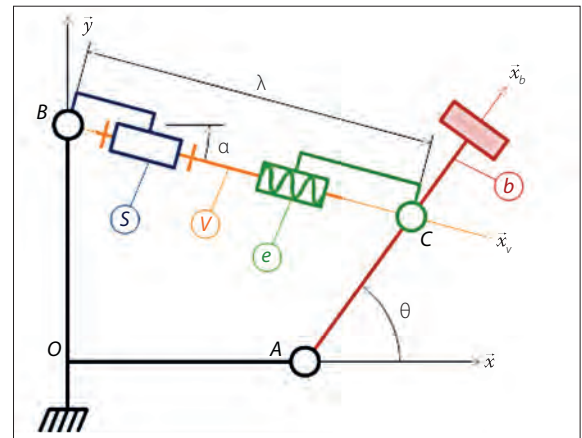
Une masse ponctuelle a été définie au point C, centre de l'articulation entre l'écrou et le bras. La mesure a été effectuée sans la pastille de couleur, uniquement en utilisant une petite croix réalisée au crayon au niveau du point C, comme le montre la figure <sup>15</sup>.

Une autre masse ponctuelle a été définie au point B pour permettre de mesurer la distance BC qui correspond au paramètre  $\lambda$  défini sur le schéma cinématique (paramètre d'entrée de la loi entrée/sortie).

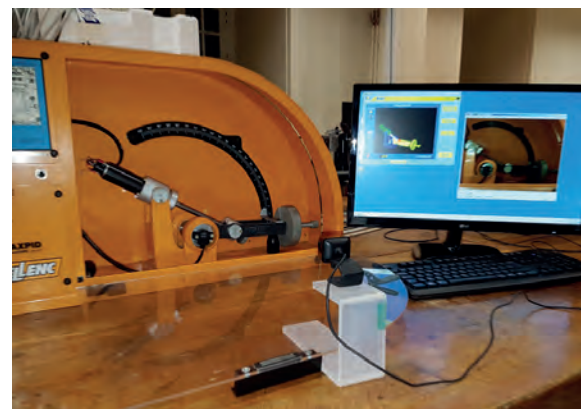
Les conditions d'éclairage n'étant pas parfaites (reflet de la fenêtre de la salle au milieu du parcours du bras), un taux d'évolution du gabarit de 40 % a été choisi.



<sup>12</sup> Banc Maxpid



<sup>13</sup> Schéma cinématique du banc Maxpid



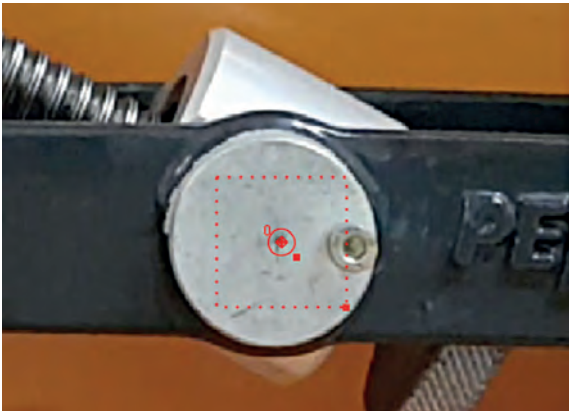
<sup>14</sup> Protocole expérimental

Enfin, sur la durée du mouvement (3,47 secondes), 27 images ont été traitées par Tracker.

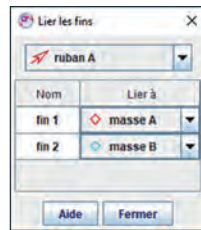
**Mesures dans Tracker**

Pour chaque image, Tracker extrait, par défaut, le temps et la position de la masse ponctuelle sous forme de triplet (t, x, y). Dans le tableau de données, la position angulaire  $\theta$  a été ajoutée à ce triplet.

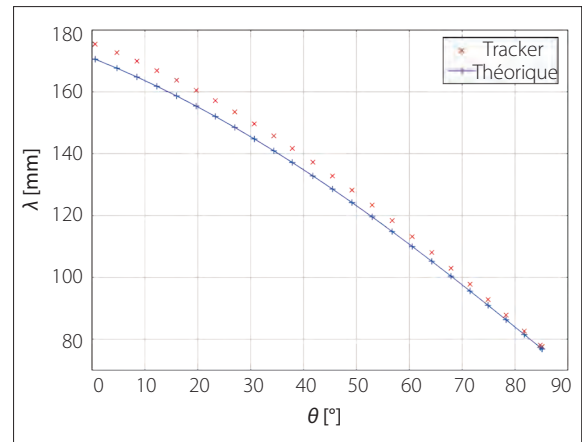
Pour obtenir la longueur BC =  $\lambda$ , l'outil Mesure avec ruban a été utilisé (menu Créer/Outil de mesures/



15 Masse ponctuelle placée au point C



16 Définition des extrémités du ruban



17 Loi entrée/sortie théorique et « trackée »

Mesure avec ruban). Cet outil va permettre de donner directement la distance entre les deux masses ponctuelles créées, celle au point B et celle au point C. Pour cela, une fois le ruban créé, il suffit de faire un clic droit sur le ruban, de choisir Lier les fins et, enfin, d'associer les masses ponctuelles désirées aux extrémités 16.

Le tableau de données donne directement la valeur de la longueur au cours du temps (à condition que la recherche de l'évolution des masses ponctuelles ait été effectuée).

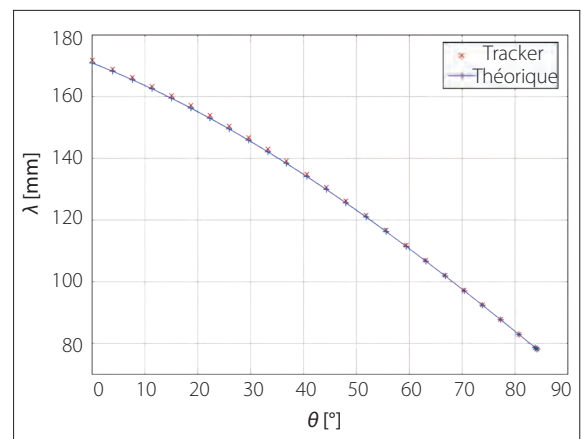
### Comparaison et validation

La figure 17 donne l'évolution de la distance  $BC = \lambda$  théorique en bleu et expérimental en rouge. La distance théorique a été calculée pour chaque angle  $\theta$  mesuré grâce à la loi entrée/sortie introduite plus haut.

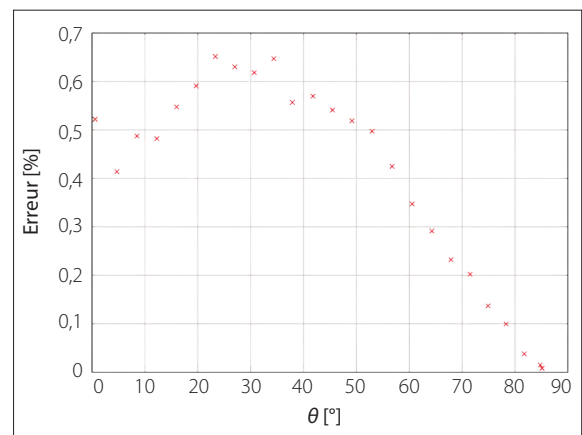
On constate une certaine cohérence entre les deux résultats, avec cependant des résultats expérimentaux qui s'éloignent des résultats théoriques pour des angles petits (écart de l'ordre de 3 %).

Une autre mesure a été réalisée avec Tracker en modifiant la position de l'origine du système d'axes. En effet, lors de la première analyse, l'origine était légèrement éloignée du centre de l'articulation. Les résultats de cette deuxième analyse sont donnés par la figure 18 où est également représentée l'évolution de la longueur  $\lambda$  théorique, issue de la loi entrée/sortie. On remarque que les points expérimentaux sont quasiment confondus avec le tracé théorique.

Un calcul d'erreur sur la valeur expérimentale par rapport à la valeur théorique montre que l'erreur est au maximum de 0,65 % 19. La position d'origine du bras est verticale (c'est-à-dire au début de la vidéo), il est donc logique de trouver des erreurs très faibles pour des angles  $\theta$  proches de 90°. En effet, pour les premiers calculs (les premières images), le gabarit n'évolue que très peu ; pour les images suivantes, les erreurs semblent se cumuler, puis reprennent une valeur plus faible. Rappelons qu'en milieu de parcours un reflet est venu perturber le gabarit, ce qui peut également expliquer cette évolution de l'erreur.



18 Loi entrée/sortie théorique et « trackée » après recentrage de l'origine du repère



19 Évolution de l'erreur de mesure en fonction de la position angulaire du bras

### Conclusion

Cette analyse permet de valider les résultats donnés par le logiciel Tracker. Ils soulignent aussi l'importance des paramètres initiaux du calcul (origine et orientation du système d'axes, bâton de mesure, choix de la masse ponctuelle et du taux d'évolution).

### Application énergétique sur le Mobycrea

On se propose de reprendre le banc Mobycrea et de faire une analyse dynamique du mouvement vertical de la nacelle. En effet, afin de soulager le moteur dans la phase ascendante, un ressort de traction a été mis en place entre les points Dg et Dd (voir schéma cinématique 6). Ce ressort s'allonge dans la phase descendante de la nacelle grâce au poids dont le travail est « moteur » et revient à son état libre dans la phase ascendante, le travail du ressort est alors « moteur » et aide le moteur à élever la masse du berceau.

### Théorème de l'énergie puissance

L'application du théorème de l'énergie puissance, sous l'hypothèse d'un référentiel galiléen lié au châssis du berce-bébé, donne :

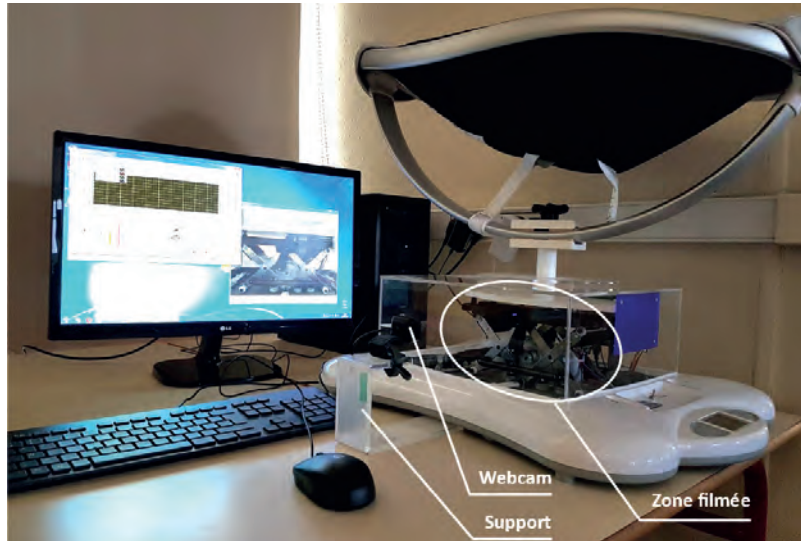
$$\frac{dE_c(t)}{dt} = P_{\text{moteur}}(t) + P_{\text{ressort}}(t) + P_{\text{pesanteur}}(t) + P_{\text{liaisons}}(t)$$

avec :

- $P_{\text{moteur}}(t) = \eta \cdot u(t) \cdot i(t)$  la puissance mécanique fournie par le moteur, obtenue de manière expérimentale (le logiciel d'acquisition du Mobycrea donne accès aux mesures instantanées de tension  $u(t)$  et d'intensité  $i(t)$  du moteur) avec  $\eta$  le rendement du moteur ;
- $P_{\text{ressort}}(t) = 2 \cdot F_{\text{ressort}}(t) \cdot v_{\text{écrasement}}(t)$ , la puissance fournie par les deux ressorts avec  $F_{\text{ressort}}(t)$  l'effort fourni par un ressort, et  $v_{\text{écrasement}}(t)$  la vitesse d'écrasement du ressort. Comme nous le présenterons plus tard, l'effort du ressort est fonction de la raideur  $k$  du ressort et de  $\Delta x(t)$  l'allongement du ressort. Cette dernière quantité sera directement issue du logiciel Tracker ;
- $P_{\text{pesanteur}}(t) = m \cdot g \cdot v(t)$ , la puissance due à la pesanteur, où  $m$  est la masse de la nacelle (les autres pièces sont supposées de masse négligeable devant la masse de la nacelle),  $g$  l'accélération de la pesanteur et  $v(t)$  la vitesse de la nacelle (dans le cas du seul mouvement vertical étudié ici). Cette vitesse peut être obtenue de différentes manières : soit à partir de la loi entrée/sortie théorique du système bielle/manivelle, soit expérimentalement à partir du logiciel d'acquisition, soit à partir de Tracker. C'est cette dernière solution qui est retenue ;
- $P_{\text{liaisons}}(t)$ , la puissance perdue dans les liaisons due aux frottements, non identifiable de manière directe ;

- $\frac{dE_c(t)}{dt} = \frac{d}{dt} \left( \frac{1}{2} m v^2(t) \right) = m \cdot v(t) \cdot a(t)$ , la dérivée de

l'énergie cinétique de la nacelle de masse  $m$  (on considère que les autres pièces ont des masses, inerties et mouvements suffisamment faibles pour ne pas être pris en compte). La vitesse  $v(t)$  et l'accélération  $a(t)$  de la nacelle seront directement issues du logiciel Tracker.



20 Protocole expérimental

### Protocole expérimental

Contrairement à l'utilisation initiale de Tracker proposées dans les TP, la caméra n'est pas mise face au banc pour filmer la mire et le point lumineux, mais disposée sur le côté gauche du banc afin de filmer la structure articulée du mécanisme du mouvement vertical 20. Remarquons qu'afin d'avoir accès à une vue d'ensemble de toutes les pièces en mouvement pour le mouvement vertical, la nacelle est mise dans la position la plus à droite (on arrête le mouvement sur la console du Mobycrea lorsque cette position est atteinte).

Une masse de 3 kg a été placée dans le Mobycrea et les mesures ont été effectuées pour une commande en boucle fermée avec une consigne de vitesse de 4 rad/s et un correcteur proportionnel de valeur celle « imposée » par le logiciel de pilotage/acquisition.

L'utilisation du logiciel de pilotage/acquisition permet de mettre en mouvement la nacelle uniquement en mode vertical. Lors de ce mouvement, il convient donc de réaliser l'enregistrement de la séquence vidéo.

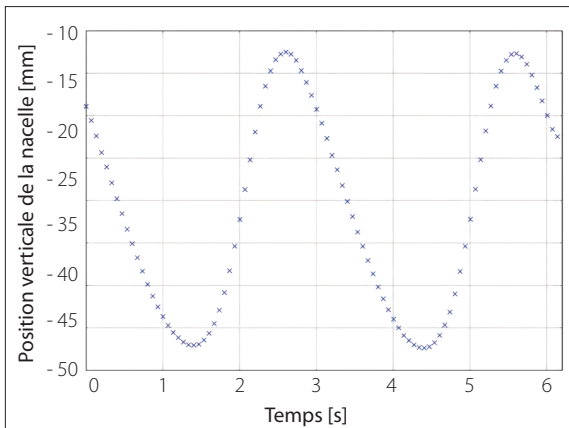
### Mesures sous Tracker

#### Grandeurs cinématiques de la nacelle

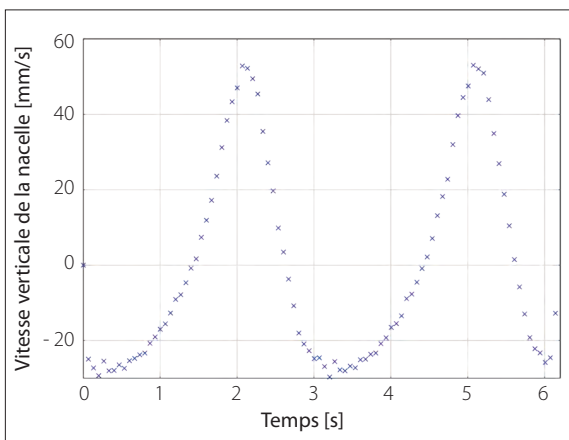
La vitesse verticale de la nacelle est obtenue, dans Tracker, en prenant un point de référence lié à la nacelle, pour l'exemple, le centre de la liaison bielle/nacelle.

L'échelle (ou bâton de mesure dans Tracker) a été fixée grâce à la longueur du ressort dans une position extrême (voir plus loin). Le système d'axes n'a pas été défini (on considère un bon réglage de l'horizontalité de la caméra).

Par défaut, lors de son analyse, Tracker ne donne accès qu'à la position de la masse ponctuelle. Pour avoir accès à la vitesse, il suffit de cliquer sur Tableau des données et de sélectionner « vy » qui correspond dans notre cas à la composante verticale de la vitesse.



21 Évolution de la position verticale de la nacelle



22 Évolution de la vitesse verticale de la nacelle

Les évolutions respectives de la position et de la vitesse de la nacelle suivant l'axe vertical sont données sur les figures 21 et 22. L'origine des ordonnées est arbitraire et n'a pas d'influence sur la suite.

### Grandeurs cinématiques du ressort

Dans Tracker, il faut définir deux masses ponctuelles, une pour chaque extrémité, et y associer un ruban de mesure comme il a été fait pour la mesure de BC sur le bras Maxpid.

Le montage du ressort nécessite toutefois de soustraire le diamètre d'enroulement du fil à la longueur du ressort. En effet, les points de référence sont pris au centre des axes de fixation du ressort.

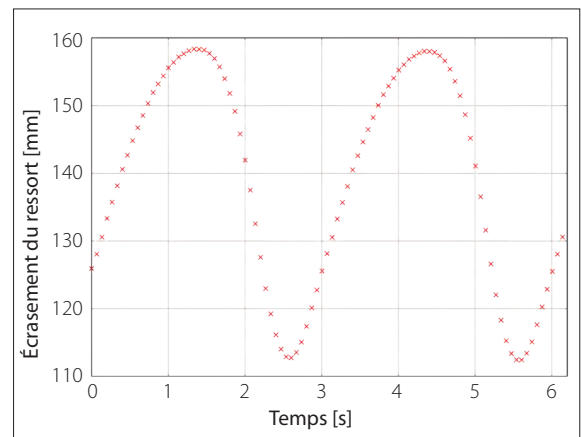
L'échelle de longueur a été fixée à 175,6 mm sur l'image qui correspond à la longueur maximale du ressort donnée par le constructeur (distance  $D$  incluse). Ce bâton de mesure a été fixé sur l'image de la vidéo où la nacelle est en position basse 23.

L'évolution expérimentale de la longueur du ressort est donnée sur la figure 24.

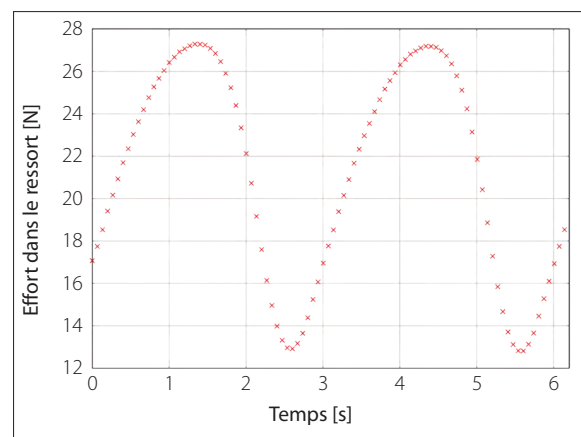
La documentation du constructeur donne une variation de longueur du ressort de 42 mm. La mesure Tracker donne une variation réelle de 46 mm.



23 Bâton de mesure positionné sur le ressort dans son élongation maximale



24 Évolution de la longueur du ressort



25 Évolution expérimentale calculée de l'effort du ressort

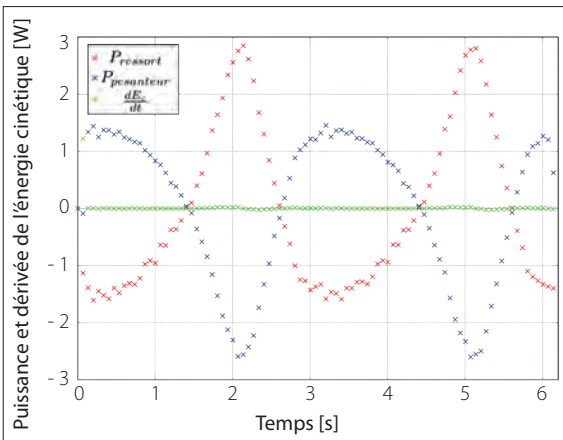
Pour calculer l'effort du ressort, la formule donnée par le fabricant est appliquée :

$$F_r = F_0 + k(L - L_0)$$

avec  $F_0$  l'effort de décollement des spires,  $k$  la raideur du ressort et  $L_0$  la longueur du ressort à vide. L'évolution temporelle de l'effort du ressort calculée, à partir de la longueur Tracker du ressort, est donnée par la figure 25.

La plage de variation de l'effort mesuré est de [13 N ; 27 N], celle annoncée par le constructeur est de [16 N ; 29 N]. Les différences peuvent s'expliquer par les erreurs de mesure ou par un montage du ressort qui diffère suivant les modèles (les points d'attache du ressort sont réglables en hauteur le long des pièces 1 et 2).





26 Évolution des puissances du ressort, de la pesanteur et de la dérivée de l'énergie cinétique

**Calcul des puissances expérimentales**

La figure 26 présente l'évolution des puissances de la pesanteur, du ressort et de la variation d'énergie cinétique. Ces calculs reposent sur les valeurs mesurées par Tracker de la vitesse et de l'accélération de la nacelle, de la longueur et de la vitesse de variation de longueur du ressort.

**Puissance du moteur**

Dans le cas où la puissance perdue dans les liaisons est négligée, la puissance à fournir par le moteur pour mettre en mouvement la nacelle est :

$$P_{\text{moteur}}(t) = \frac{dE_c(t)}{dt} - P_{\text{ressort}}(t) - P_{\text{pesanteur}}(t)$$

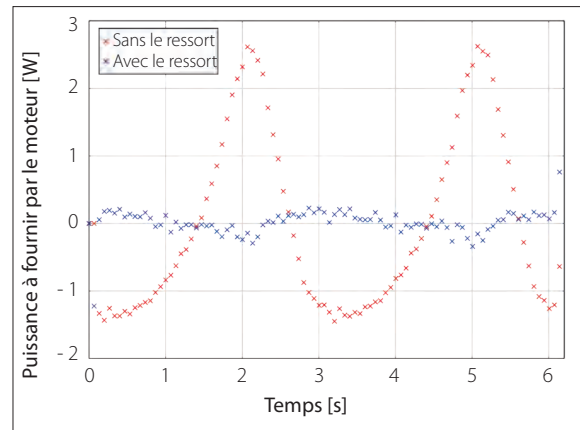
La figure 27 donne l'évolution calculée de la puissance du moteur avec ou sans la présence des deux ressorts.

On constate que la puissance du moteur varie d'environ plus ou moins 0,3 W avec la présence des ressorts, alors que celle-ci est beaucoup plus élevée si les ressorts ne sont pas présents.

En réalité, les mesures de tension/courant en entrée du moteur (obtenue via l'interface de commande/mesure) montrent une consommation de l'ordre de 2 W environ au cours du mouvement. D'après la relation de l'énergie/puissance, cette puissance correspond, au final, à la puissance « perdue » en raison des frottements dans les liaisons (notamment le réducteur roue/vis sans fin) et prend aussi en compte le rendement du moteur électrique. Les masses et les inerties négligées jouent aussi un rôle dans cette différence de puissance.

**Conclusions**

L'utilisation du logiciel Tracker permet d'enrichir les études des systèmes de nos laboratoires en apportant des résultats expérimentaux nouveaux.



27 Évolution de la puissance à fournir par le moteur avec et sans le ressort

Ces nouveaux capteurs viennent compléter l'offre généralement limitée à deux capteurs de position/vitesse : un en début de chaîne et un autre en fin de chaîne.

Le tracé des trajectoires expérimentales reste un point très intéressant de la démarche d'analyse des systèmes, là où seules les trajectoires théoriques et/ou simulées étaient disponibles. L'introduction à l'étude des mouvements devient ainsi plus pertinente en se basant sur des mesures réelles !

Dans l'exemple du Mobycrea, on se rend compte qu'il devient très facile d'avoir accès expérimentalement à la longueur instantanée d'un ressort et donc à toutes les quantités physiques qui en découlent (écrasement, force, puissance). Cette approche sur le ressort peut très bien s'extrapoler à des études de résistance des matériaux, à condition, bien sûr, que le gabarit du point à rechercher ne se déforme pas trop.

L'utilisation très simple de Tracker en fait un outil apprécié des élèves lors de projets. De plus, la prise de vidéos ne se limite pas à l'utilisation de webcams ; les smartphones, greffés aux poches de nos élèves, peuvent permettre d'obtenir des résultats souvent bien meilleurs que ceux obtenus par une webcam. Un essai a été réalisé avec la fonction « ralenti » de l'appareil photo d'un smartphone, ce qui a permis de multiplier par 8 la fréquence de la vidéo ! Même les mouvements « rapides » peuvent être analysés !

On retiendra quand même une limitation : le système étudié doit être à mouvement plan. ■

**EN LIGNE**

Tracker video analysis : <https://physlets.org/tracker/>

Tous les liens sur <http://eduscol.education.fr/sti/revue-technologie>