

Maquettes sensorielles en dynamique

PREMIÈRE PARTIE

YVES BRACCINI, ROBERT GOURHANT*

Quel est l'enjeu de la dynamique ? Quels sont les effets physiques ? Ces questions se posent aux élèves de STI2D, SSI et même en classe prépa sous une forme souvent abstraite. Cette première partie sur les mouvements de translation montre comment ces concepts prennent du sens lorsqu'ils sont associés aux perceptions reçues par les mains qui tiennent les maquettes didactiques.

Dans l'exemple de l'agrafeuse électrique (voir revue *Technologie* n° 200), le dispositif de conversion de l'énergie **1** était constitué d'un noyau **4**, ayant une masse m , soulevé par le ressort **8** et d'un électro-aimant **9** lié au carter **1**. Dès que l'utilisateur appuie sur la gâchette **10** et que le détecteur **11** est en contact avec le support **13** (sécurité), la bobine **9** est alimentée, il se crée un champ magnétique et une force qui s'ajoute à la force de pesanteur qui attire ce noyau **4** vers le bas. L'ensemble **{4, 12}**, après avoir chuté d'une hauteur $h = 30$ mm, heurte l'agrafe **2** et l'entraîne à vitesse élevée vers le matériau à assembler. L'énergie cinétique E_k de **{4, 12}** est consommée par le travail d'enfoncement de l'agrafe **2** dans son support.

Dans l'article précédent, traitant de l'énergétique, la problématique était la recherche des moyens de réduire les pertes et donc la consommation d'énergie. L'ensemble {arbre **4**, disque **5**} de la maquette sensorielle **2** modélise le percuteur-noyau de l'agrafeuse. Il est soulevé puis lâché par l'élève moteur **M**. La poignée **1** représente le guidage du noyau par l'alésage de la bobine. La poignée-culasse **2** – tenue par l'élève récepteur **R** – modélise l'agrafe qui s'enfonce. Lors des manipulations, l'élève se concentre sur ce qui entre (par exemple, l'énergie potentielle, liée à la masse et la différence de niveau) et ce qui sort (le travail résistant, produit de la force de la main sur la poignée-culasse, notée $F_{\text{main}/2}$, par le déplacement Δ_z vers le bas de cette dernière).

Dans ce TP, l'élève se concentre d'abord sur l'effet de la pesanteur, l'action de la bobine **9** sera étudiée dans un deuxième temps. Il constate qu'entre **1** et **2**,

MOTS-CLÉS

dynamique, énergétique, modélisation, équipement didactique, prébac, postbac

l'énergie cinétique augmente grâce à la course du percuteur avant le contact avec l'agrafe, d'où l'effet de percussion sur cette dernière.

Cette disposition constructive permet de réduire la force motrice de la bobine par rapport à une action purement statique. Elle a donc un nombre de spires moins important et des pertes par effet Joule plus faibles, ce qui constituait une réponse à la problématique de l'énergétique. Cette dernière fait la relation entre deux instants 1 et 2 (course d'approche) ou 2 et 3 (enfoncement de l'agrafe) et donne, pour chaque phase, une seule équation scalaire.

Mais, avec quelle accélération est-on passé d'un instant à l'autre ? Avec quelle force motrice ? Quels sont les effets de ces paramètres sur l'enfoncement de l'agrafe ? L'objectif des manipulations qui suivent va permettre d'aborder la question de la performance des systèmes.

La dynamique, en introduisant une expression vectorielle – le principe fondamental de la dynamique –, va permettre de déterminer les forces sur un solide (S) isolé.

Sur le thème du palettiseur, nous pourrions ainsi modéliser les problèmes dans l'espace 3D. C'est ce qui va donner du sens aux expérimentations qui suivent.

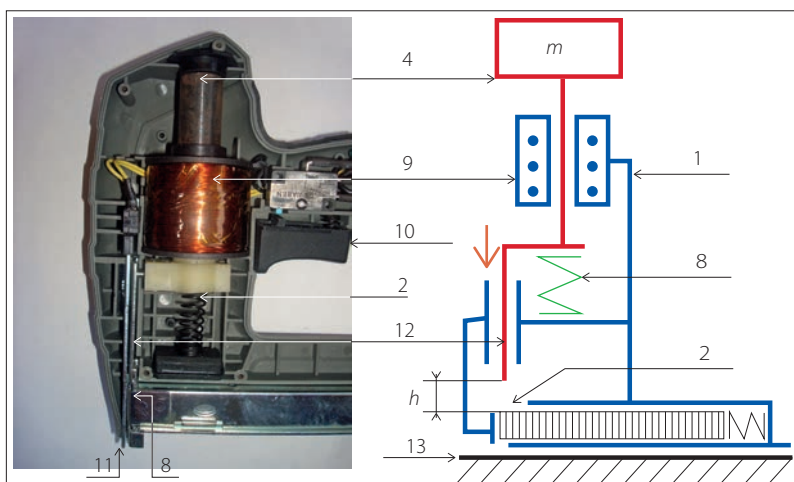
Dynamique : matière, accélération et effet d'inertie

Le principe fondamental de la statique (PFS) et l'étude cinématique du mouvement de translation sont des prérequis.

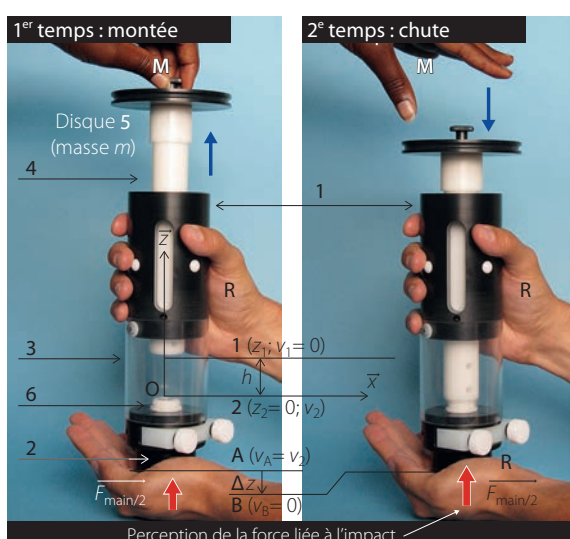
Par une démarche inductive, l'objectif est de caractériser la relation entre la masse, l'accélération et les forces extérieures sur un système (S) isolé. Pour cela, nous avons mis au point un accéléromètre sensoriel. L'étude porte sur son mouvement unidirectionnel.

L'accéléromètre **3** est composé d'une poignée alésage **1**, d'une masselotte mobile **2** de masse m (kg), de deux ressorts **3** de raideur k (N/mm) et de deux couvercles **4** avec palpeurs à mémoire **5**.

* Co-inventeurs des « Maquettes didactiques sensorielles de liaisons mécaniques » (breveté), les auteurs poursuivent et prolongent ici la mise en œuvre de leur démarche kinesthésique exposée dans la revue *Technologie* pour l'étude des « liaisons » en statique (n° 134 et 137), pour celle des « poutres » en résistance des matériaux (n° 161 et 162) et pour l'énergétique (n° 200 et 201).



1 Structure et schéma cinématique de l'agrafeuse électrique



2 Maquette sensorielle énergétique

Manipulation 1 : configuration « une masselotte »

L'initialisation de l'accéléromètre se fait de la manière suivante : l'élève tient l'accéléromètre à la main, axe horizontal, lumière avec le haut, sur le côté et en avant de son corps pour pouvoir observer la masselotte 2. Il applique les deux palpeurs contre cette dernière, centrée, puis il les sort d'une valeur $c = 8$ mm, par exemple. Dans cette position, chaque ressort 3 est comprimé de 2 mm, leur force est négligeable.

Isolons la masselotte 2; elle est en équilibre sous l'action :

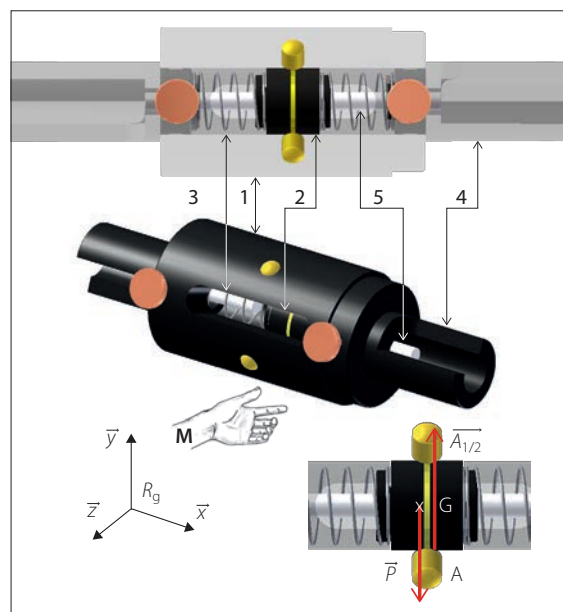
- du poids de la masselotte $\vec{P}$;
- de l'action de contact de la poignée alésage 1 sur la masselotte 2 : $\vec{A}_{1/2}$.

Le PFS permet d'écrire : $\vec{P} + \vec{A}_{1/2} = \vec{0}$ (deux forces directement opposées).

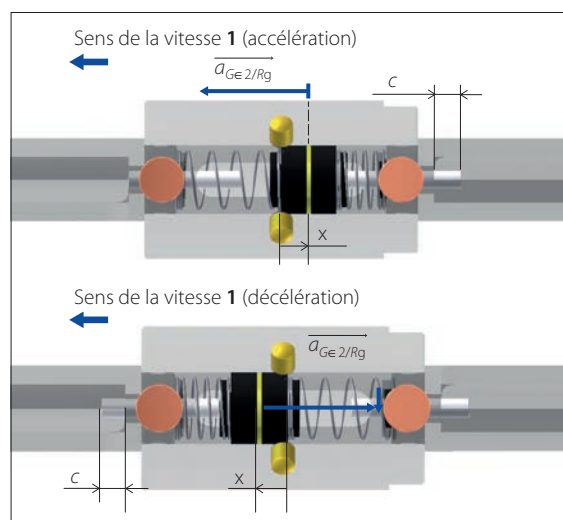
Action

L'élève s'élance en avant (ou avance sa main rapidement). Il constate que la masselotte 2 se déplace vers l'arrière de la poignée alésage d'une valeur x (mm) [4].

Plus il démarre vite, plus la course de la masselotte 2 augmente, le ressort 3 se comprime de plus en plus jusqu'au moment où 2 touche le palpeur 5. L'élève en prend conscience lorsqu'il entend le petit



3 Accéléromètre sensoriel au repos



4 En mouvement

son métallique du contact, accompagné d'une légère vibration dans la main.

C'est le signe que 2 s'est déplacé de 8 mm (consigne imposée au palpeur). En marchant à vitesse constante, la masselotte revient à sa position initiale, centrée. Lorsque l'élève freine, c'est l'inverse qui se produit : la masselotte 2 se déplace vers l'avant [4].

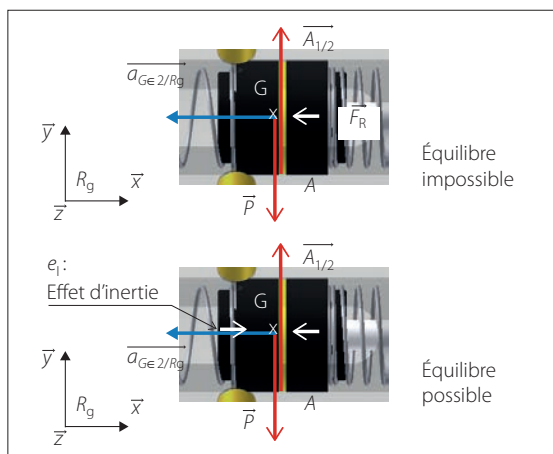
Interprétation

Les représentations des élèves se construisent souvent sur la résolution de paradoxes. Ici, au repos, la masselotte 2 est en équilibre par rapport à la poignée alésage 1 sous l'action de deux forces directement opposées $\vec{P}$ et $\vec{A}_{1/2}$ [3]. Lors du mouvement, la masselotte isolée est soumise à trois forces [5] :

- poids : $\vec{P} = -\|\vec{P}\| \cdot \vec{y}$
- action de contact (frottement négligé) :
 $\vec{A}_{1/2} = \|\vec{A}_{1/2}\| \cdot \vec{y}$
- force ressort : $\vec{F}_R = k \cdot x \cdot \vec{x}$

Questionnement

La masselotte ne peut être en équilibre sous l'action de ces trois forces, car leur somme n'est pas nulle



5 Accélération et repère galiléen

et, en même temps, comment l'équilibre par rapport à la poignée 1 s'est-il rompu lorsque le mouvement apparaît et qu'il n'y a – à première vue – aucune nouvelle force extérieure sur 2 ?

C'est le moment de rappeler que le PFS s'écrit dans un repère galiléen ; or, la poignée 1 – en accélération/décélération par rapport à la Terre dans cette manipulation – n'est pas un repère galiléen !

Nous pouvons aider l'élève à déduire de ses observations que la matière (la masse) possède la propriété de s'opposer aux effets des variations de vitesse dans un temps donné, par rapport au repère galiléen, c'est-à-dire à l'accélération de la masselotte isolée par rapport à la Terre, notée $a_{G\epsilon 2/Rg}$.

En augmentant le déplacement du palpeur (par exemple, à 18 mm), l'élève constate qu'il doit augmenter son accélération de démarrage pour atteindre cette nouvelle consigne, ce qui confirme cette propriété.

Manipulation 2 : configuration « deux masselottes »

On demande à l'élève de se concentrer sur la phase accélération uniquement. Il va identifier l'influence de la variation de masse de la masselotte 2.

Pour cela, il démonte le couvercle 4, enlève le ressort 3 situé en avant de la masselotte 2 et monte une deuxième masselotte dans la poignée alésage (la masse de 2 double), puis remonte le couvercle 4. Il applique le palpeur sur la face de 2, côté ressort.

Le dossier technique indique que, dans cette configuration, le ressort 3 est déjà comprimé de 11 mm. On demande de sortir le palpeur de 9 mm afin que, en fin de course, le ressort soit comprimé de 20 mm, valeur identique à la configuration « une masselotte » avec la consigne de sortie de 18 mm du palpeur.

Comme $F_R = k \cdot x$, dans les deux cas, la force du ressort sera la même en fin de course.

Action

L'élève avance la main qui tient la poignée alésage 1 et constate qu'il doit imposer une accélération plus faible par rapport à la configuration « une masselotte » pour atteindre la consigne « 20 mm de compression ».

Pour une même force F_R , l'élève en déduit que :

- si la masse m augmente, l'accélération $a_{G\epsilon 2/Rg}$ diminue ;
- si la masse m diminue, l'accélération augmente.

Interprétation

Il est alors possible de rappeler le principe de l'inertie. En relation avec les sens, nous allons pouvoir définir la grandeur vectorielle « effet d'inertie », notée $\vec{e}_1$.

e_1 est fonction de quelles grandeurs ? La manipulation a montré qu'il dépend du produit de la masse par l'accélération, changé de signe. Pourquoi ? L'approche sensorielle indique que « l'effet d'inertie » est en sens inverse de la quantité d'accélération.

On pourra écrire :

$$\vec{e}_1 = -m \cdot \vec{a}_{G\epsilon 2/Rg} \text{ avec } e_1 \text{ en kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-2}$$

En ajoutant l'« effet d'inertie » $\vec{e}_1$ aux actions mécaniques extérieures, le problème de dynamique se traite comme un problème de statique (méthode de d'Alembert) 5. Le principe fondamental de la dynamique, appliqué à la masselotte dans sa translation par rapport à R_g , s'écrit :

$$\vec{A}_{1/2} + \vec{P} + \vec{F}_R + \vec{e}_1 = \vec{0}$$

En projection sur $(O, \vec{x})$:

$$\begin{aligned} \vec{F}_R + \vec{e}_1 &= \vec{0} \\ \vec{F}_R &= -\vec{e}_1 \end{aligned}$$

C'est $\vec{e}_1$ qui permet de justifier l'équilibre relatif de la masselotte, car directement opposée à la force du ressort 5. On écrit que $m \cdot \vec{a}_{G\epsilon 2/Rg} = \vec{F}_R$.

$$\text{D'où : } a_{G\epsilon 2/Rg} = \frac{k \cdot x}{m}$$

$$\text{En scalaire : } a_{G\epsilon 2/Rg} = \frac{k}{m} \cdot x$$

On constate que l'accélération est proportionnelle à la course et à la raideur du ressort, inversement proportionnelle à la masse, ce qui vérifie l'observation préalable.

Application

On donne les valeurs suivantes pour l'accéléromètre sensoriel :

- raideur ressort : $k = 0,014 \text{ daN/mm}$;
- masselotte de masse : $m = 160 \text{ g}$;
- course palpeur : $c = 18 \text{ mm}$.

Calculer l'accélération de la masselotte 2 par rapport au sol.

Réponse

Avec le système homogène d'unités dans le système SI, $k = 140 \text{ N/m}$, $m = 0,16 \text{ kg}$, $c = 0,018 \text{ m}$, d'où :

$$a_{G\epsilon 2/Rg} = \frac{140 \times 0,018}{0,16} \approx 16 \text{ m/s}^2$$

Remarque sur l'ordre de grandeur : dans ce cas, l'accélération est sensiblement égale à une fois et demie l'accélération de la pesanteur ($g = 9,81 \text{ m/s}^2$, chute libre).

Dynamique du solide en translation : recherche des facteurs d'amortissement

Dans cette partie, l'effet d'inertie et le théorème fondamental de la dynamique sont des prérequis.

La démarche peut être inductive ou d'investigation, car l'élève peut se référer aux grandeurs de l'accéléromètre sensoriel (force, masse, accélération, effet d'inertie).

Objectif

Le dossier technique montre l'existence de butées en élastomère en fin de course du noyau-percuteur **6**. Caractériser les facteurs d'amortissement et justifier le choix du constructeur.

La maquette sensorielle **7**, système isolé, modélise le comportement du percuteur dans le cas le plus défavorable : celui d'une frappe à vide. L'ajout de l'action de la bobine se fait dans un deuxième temps. Les élèves, en binôme, se concentrent sur la « fin de course ».

Essai 1. Expérimentation « butée franche »

L'élève récepteur tient la poignée guide **1** dans sa main gauche et la poignée culasse **2** dans sa main droite.

En statique, la force $F_{\text{main}/2}$ est faible, égale au poids de $(S) = \{\text{arbre } 4, \text{ disque } 5\}$. L'élève moteur soulève cet ensemble et le lâche. Au moment de l'impact, $F_{\text{main}/2}$ augmente brusquement, alors que le poids de l'ensemble n'a pas changé.

L'élève récepteur peut faire le lien avec le TP sur l'accéléromètre sensoriel et formuler l'hypothèse suivante : il s'agit de la manifestation de l'effet d'inertie e_1 , lié à la décélération $a_{G \in S/Rg}$.

Pour vérifier cette hypothèse, en réduisant la décélération – ou la masse –, l'effet d'inertie devrait diminuer. La représentation du résultat recherché rend l'élève plus acteur de son apprentissage, il sait où il va !

Essai 2. Expérimentation « butée freinée »

La poignée-culasse possède un piston **6** qui peut être sorti et freiné d'une hauteur h_f **8**.

L'énergie d'entrée est constante (même hauteur de chute et même masse). À chaque impact :

- le piston s'enfonce plus (c augmente) si le frein est moins serré, l'action dans la main $F_{\text{main}/2}$ est plus faible ;

- le piston s'enfonce moins (c diminue) si le frein est plus serré, l'action de la main $F_{\text{main}/2}$ est plus grande.

Interprétation

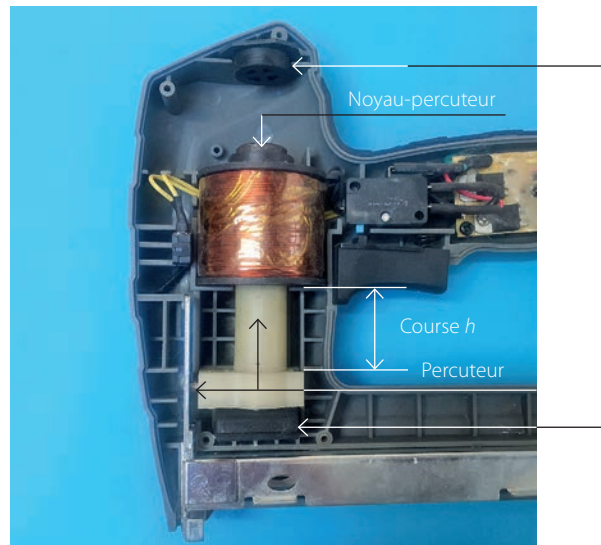
En nous appuyant sur ces observations, en relation avec la dimension sensorielle **8**, nous appliquons le PFD dans la phase freinage :

$$\Sigma \vec{F}_{\text{ext}/S} = m \cdot \vec{a}_{G \in S/Rg}$$

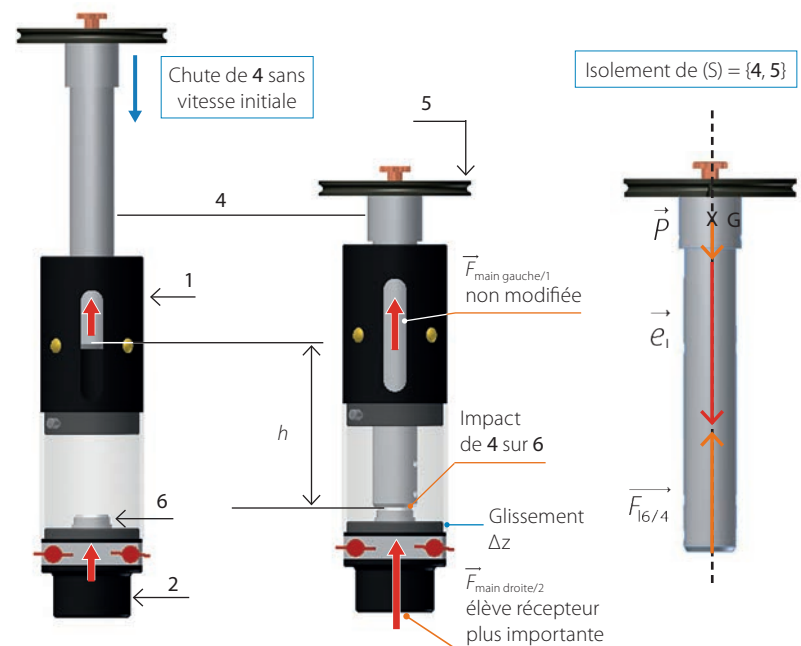
Isoler $(S) = \{\text{arbre } 4, \text{ disque } 5\}$

(S) est soumis à :

- son poids $\vec{P}$;



6 Fin de course du percuteur



7 Arrêt de 4 sur butée franche 6

- la force d'impact $\vec{F}_{I(6/4)}$;
- l'effet d'inertie $e_1 = -m \cdot \vec{a}_{G \in S/Rg}$.

Le PFD permet d'écrire :

$$\vec{P} + \vec{F}_{I(6/4)} + \vec{e}_1 = \vec{0} \text{ (méthode de d'Alembert)}$$

$$\text{ou } \vec{P} + \vec{F}_{I(6/4)} = m \cdot \vec{a}_{G \in S/Rg}$$

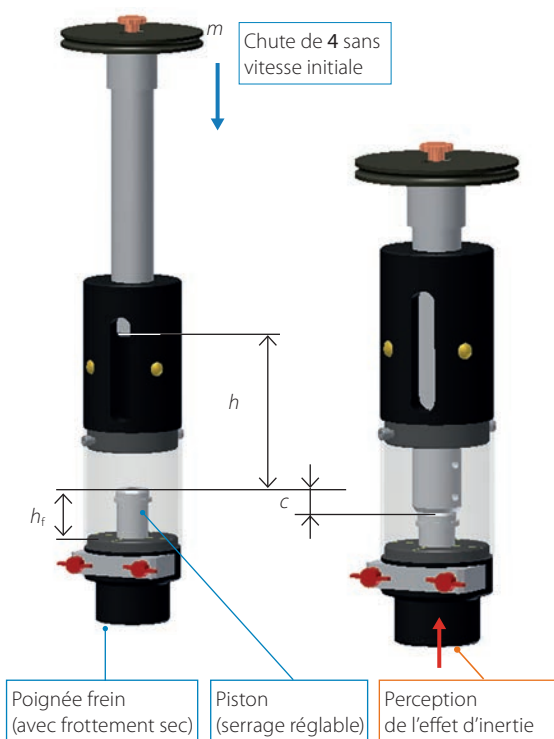
$$\vec{F}_{I(6/4)} = m \cdot \vec{a}_{G \in S/Rg} - \vec{P}$$

En fin de course, si on diminue la décélération, la force d'impact diminue.

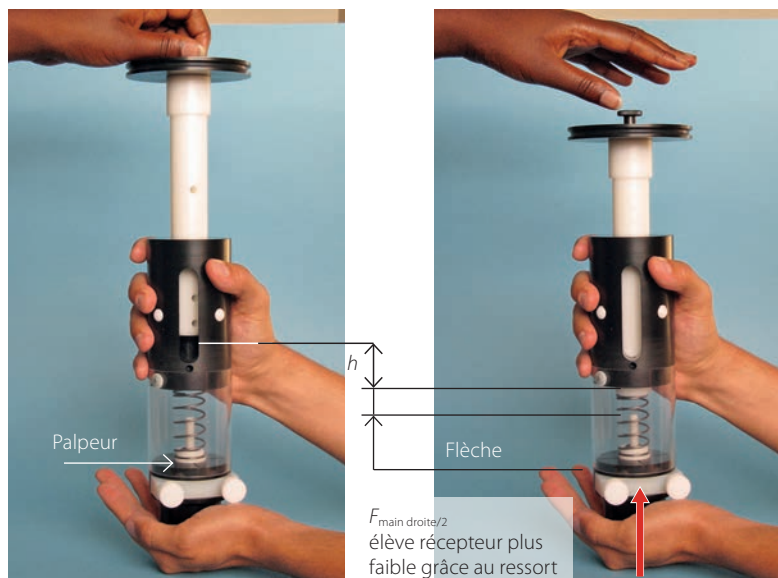
Validation de la solution technologique

Dans l'essai avec un ressort d'amortissement **9** – ou une butée en élastomère –, l'élève perçoit une force $F_{\text{main}/2}$ moins grande.

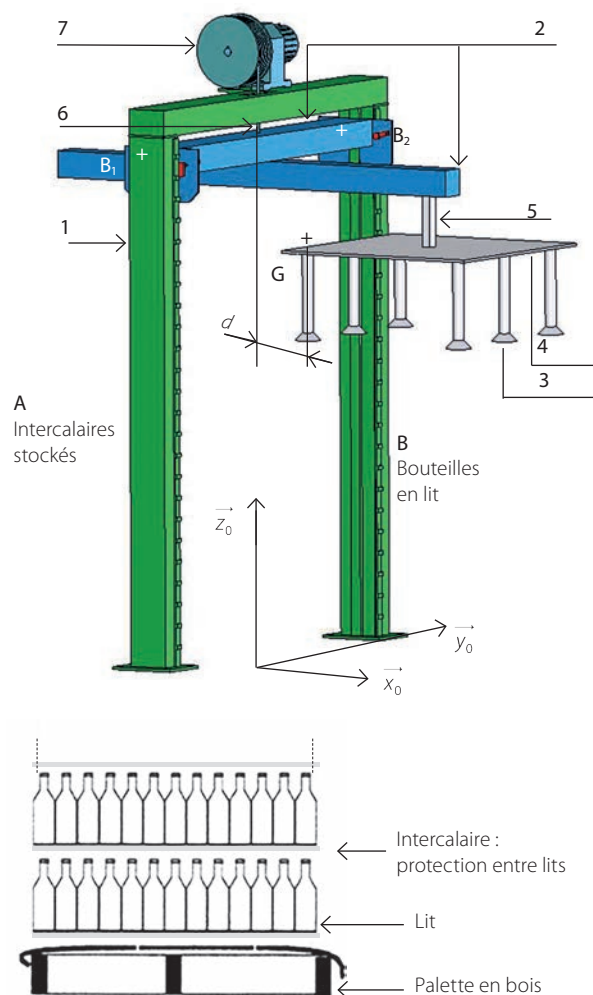
Remarque : si on isole la poignée-frein **2** pour déterminer la relation entre $\vec{F}_{I(6/4)}$ et $F_{\text{main}/2}$, en appliquant le PFD, on démontre que $F_{\text{main}/2}$ diminue avec $\vec{F}_{I(6/4)}$, donc avec $\vec{e}_1$. C'est l'image de la diminution de $\vec{e}_1$.



8 Essai avec frein frottement sec



9 Essai avec ressort



10 Système de dépose d'intercalaires

Synthèse

Phase chute : si le système $(S) = \{\text{arbre 4, disque 5}\}$ a une accélération g ($g = 9,81 \text{ m/s}^2$), une hauteur de chute et une masse constantes, la vitesse d'impact est constante (énergie cinétique constante).

Phase freinage : l'effet d'inertie perçu dans la poignée frein 2 diminue quand la décélération de (S) est plus faible.

Solution : augmenter la course d'amortissement en intercalant un composant déformable qui consomme de l'énergie : les butées élastiques dans l'agrafeuse (réduction du risque de casse du carter).

Application numérique

Poids du système $(S) = \{\text{arbre 4, disque 5}\}$; $P = 0,8 \text{ daN}$. Hauteur de chute : $h = 110 \text{ mm}$; vitesse d'impact : $v = \sqrt{2gh} = 1,46 \text{ m/s}$

Décélération sur 5 mm (déformation de la main posée sur le tapis en mousse)

Le calcul de la force d'impact $\overline{F_{I(6/4)}}$ se fait avec l'hypothèse simplificatrice d'un mouvement rectiligne uniformément décéléré. Dans $R_g(O, \vec{x}, \vec{y}, \vec{z})$:

– début du freinage (instant 2 ; $t = 0$) : $v_0 = -1,46 \text{ m/s}$; $x_0 = 0$

– fin du freinage (instant 3 ; $t = t_3$) : $v_3 = 0 \text{ m/s}$; $x_3 = -0,005 \text{ m}$

Équations générales du mouvement dans R_g :

$$x = \frac{1}{2} a \cdot t^2 - 1,46 \cdot t ; \text{ (avec } a > 0 \text{)} \quad (1)$$

$$v = a \cdot t - 1,46 \quad (2)$$

À l'instant 3 :

$$\text{Avec (1) : } -0,005 = \frac{1}{2} a \cdot t_3^2 - 1,46 \cdot t_3$$

$$\text{Avec (2) : } 0 = a \cdot t_3 - 1,46, \quad a = \frac{1,46}{t_3}$$

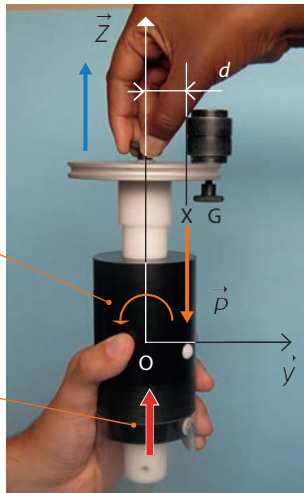
$$(1) \text{ devient : } -0,005 = \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{1,46}{t_3} \right) \cdot t_3^2 - 1,46 \cdot t_3$$

d'où : $t_3 = 6,85 \times 10^{-3} \text{ s}$; $F_I = 160 \text{ N}$; ordre de grandeur vingt fois le poids de (S) !

Phase 1 : levée

$\vec{M}_{O_{main}/1}$
autour de l'axe $(O, \vec{x})$:
faible

$\vec{F}_{main/1}$
selon $(O, \vec{z})$:
faible

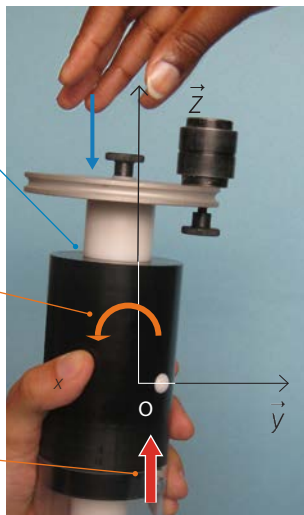


Phase 2 : impact

Chute de 4 sur 1

$\vec{M}_{O_{main}/1}$
autour de l'axe $(O, \vec{x})$:
important

$\vec{F}_{main/1}$
selon $(O, \vec{z})$:
importante



11 Effet du centre de gravité décalé

Dynamique du solide en translation avec centre de gravité décalé

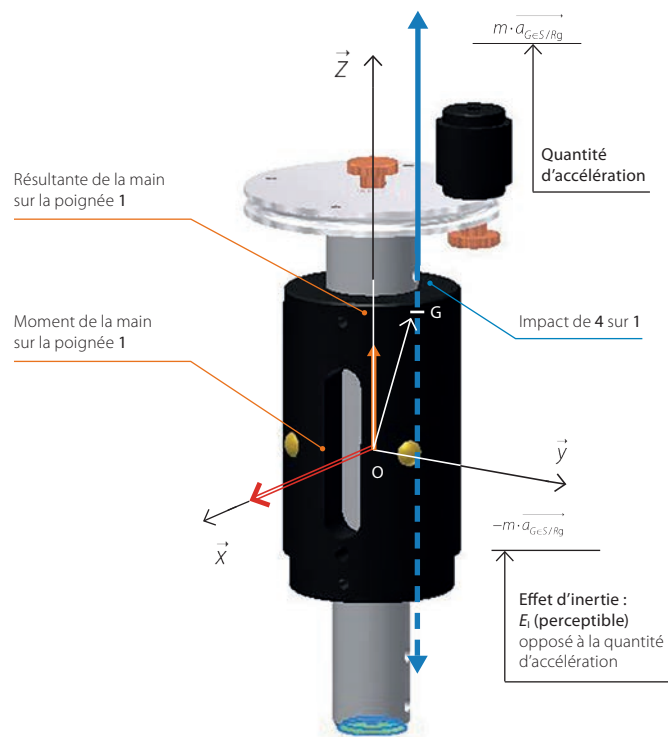
Le prérequis nécessaire pour aborder cette partie (niveau BTS, classe préparatoire) porte sur la connaissance du théorème de la résultante dynamique du PFD.

Le support d'étude est un palettiseur 10.

Objectifs

- identifier la résultante et le moment dynamique à partir de leurs effets physiques. Définir le torseur dynamique;
- déterminer les actions dans les colonnes de guidage dans les phases d'accélération ou de freinage verticales du chariot 2.

Le dispositif de saisie des intercalaires est constitué de six ventouses 3. Le plateau 4 est lié à un chariot horizontal 5 qui permet de saisir en A l'intercalaire supérieur de la pile, pour le déposer en B, sur la palette entre deux lits de bouteilles. Un chariot 2 permet le déplacement vertical des ventouses et des intercalaires pour les déposer à différentes hauteurs, lorsque la palette se constitue. Ce chariot est guidé en translation par rapport au bâti 1 par des liaisons glissières d'axe (B, z_0) . Le dispositif de levage est constitué d'un câble 6 actionné par un moto-réducteur électrique 7.



12 Expression sensorielle du torseur dynamique

Problème pédagogique

Lors de la modélisation des effets dynamiques sur ce système en translation, à centre de gravité G décalé d'une valeur d par rapport à l'axe vertical de la glissière, les élèves ne comprennent pas que le moment dynamique ne soit pas nul lorsqu'il est écrit au centre de la liaison glissière, alors qu'il s'agit d'une translation.

L'expérimentation 11 12 permet de lever l'obstacle à partir d'une étude comportementale de la maquette sensorielle.

Essai dynamique

Après un essai statique, masselotte montée décalée, l'élève moteur soulève l'ensemble $(S) = \{\text{arbre 4, disque 5, masselotte 7}\}$, puis le laisse retomber sur la poignée 1 11. L'élève récepteur perçoit :

- une résultante importante, selon l'axe (O, z_0) par rapport à la résultante statique $\vec{P}$;
- un moment important, autour de l'axe (O, y_0) par rapport au moment statique $\|\vec{P}\| \cdot d$.

Formalisation

On associe à ces effets physiques deux éléments de réduction d'un torseur en O, lié aux effets dynamiques :

- augmentation de la force verticale sur 1 correspondant à la résultante dynamique $\vec{R}_d$;
- augmentation du moment autour de l'axe horizontal de 1 correspondant au moment dynamique $\vec{M}_d$.

On peut alors définir le torseur des quantités d'accélération en O :

$${}_O \{A_{S/R_g}\} = {}_O \{\vec{R}_d; \vec{M}_d\}.$$

Le PFD, écrit en O, sous forme torsorielle est :

$${}_O \left\{ \begin{array}{c} \vec{R}_{\text{Fext/S}} \\ \vec{M}_{O(\text{Fext/S})} \end{array} \right\} = {}_O \left\{ \begin{array}{c} \vec{R}_d \\ \vec{M}_d \end{array} \right\}$$

Torseur dynamique en G

L'expression d'un torseur est fonction du point de réduction. $\vec{M}_d = \vec{0}$ en G pour un mouvement de translation, confirmé par l'essai avec la masselotte centrée sur l'axe de la liaison.

$$\left\{ \vec{A}_{S/R_g} \right\}_G = \left\{ \vec{R}_d; \vec{0} \right\}_G$$

Remarque : on constate [12](#) que le vecteur moment perçu par la main est dirigé selon l'axe des x , perpendiculaire au plan défini par le vecteur quantité d'accélération $m \cdot \vec{a}_{G \in S/R_g}$ et le vecteur position $\vec{OG}$, dans le sens direct.

Nous pouvons ainsi introduire le produit vectoriel modifiant le moment dynamique, selon le point considéré :

$$\vec{M}_{dO} = \vec{M}_{dG} + \vec{OG} \wedge m \cdot \vec{a}_{G \in S/R_g}$$

Pour une translation :

$$\vec{M}_{dO} = \vec{0} + \vec{OG} \wedge m \cdot \vec{a}_{G \in S/R_g}$$

À ce moment, la difficulté pédagogique devient moins grande.

Conclusion

Personne n'a jamais vu un « effet d'inertie », mais nous l'avons tous perçu dans notre corps lorsque nous sommes dans un véhicule qui s'arrête brusquement. On ne peut pas se passer de cette dimension kinesthésique.

Les perceptions dans les mains tenant les maquettes sensorielles aident à la représentation des actions mécaniques dynamiques, si abstraites ! Elles donnent des informations concrètes sur leur nature (résultantes ou moment), leurs directions (horizontales ou verticales), leurs sens (vers le haut, vers le bas, à gauche, à droite), leurs intensités (grandes ou petites). Elles aident aussi les élèves à interpréter les résultats d'un logiciel de calcul dynamique.

Ces maquettes modélisent différents systèmes, relient les effets physiques aux grandeurs mécaniques quantifiées ; elles donnent du sens aux apprentissages en privilégiant les démarches inductives ou d'investigation. ■