

TP : Étude de l'affolement d'une soupape de moteur thermique

I. Problématique

Dans un moteur thermique, l'admission de l'air et l'évacuation des gaz de combustion nécessitent l'ouverture de soupapes (clapets). Chaque soupape permet de bloquer ou de faire communiquer deux chambres. Par exemple, la soupape d'échappement ouvre la voie vers l'échappement du véhicule pour l'évacuation des gaz de combustion. Leur mouvement doit donc être synchronisé avec la remontée du piston, qui pousse les gaz (voir en annexe le rappel des quatre temps d'un moteur).

C'est l'arbre à came qui actionne les soupapes, il est entraîné en rotation grâce à une courroie (ou une chaîne) en prise directe sur le vilebrequin du moteur. En tournant, l'arbre à came va provoquer un mouvement de translation alternatif de la soupape.

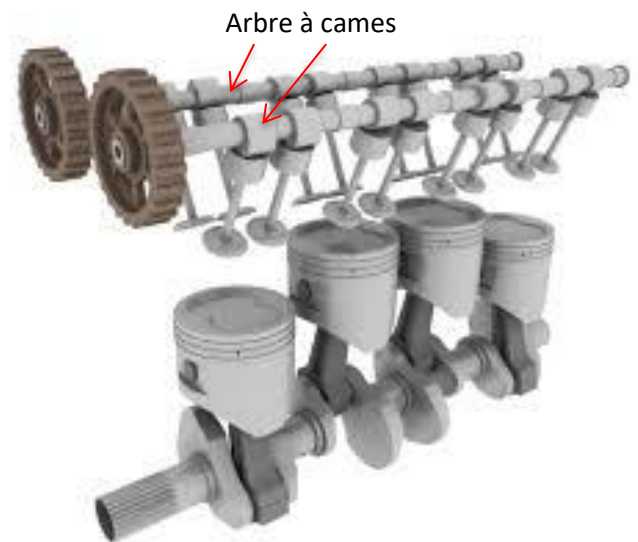


Figure 1 : moteur thermique sans bâti

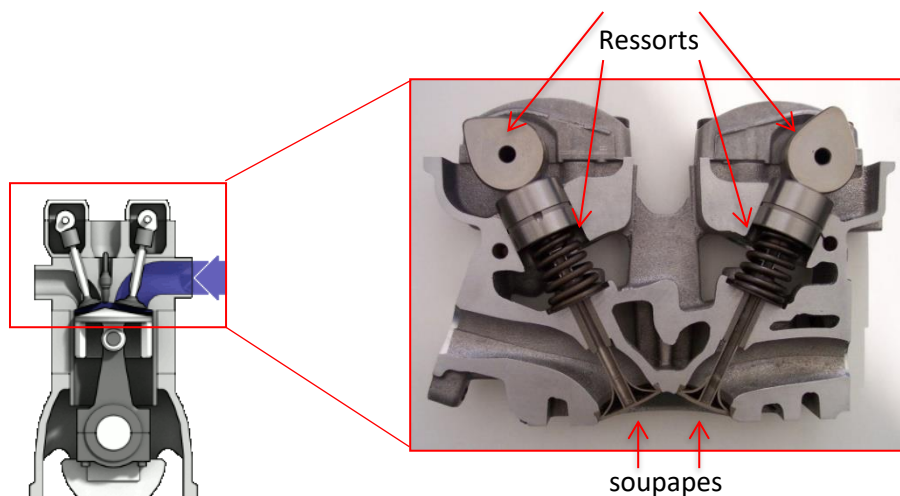


Figure 2b : arbres à cames, ressorts, soupapes et conduits d'admission/refoulement

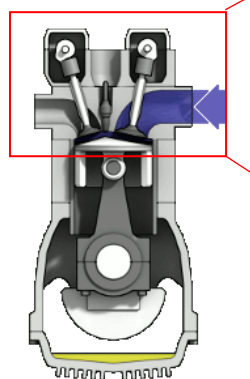


Figure 1a : moteur thermique en coupe

Un ressort permet de plaquer en permanence la soupape contre l'arbre à came.

Lors des hauts régimes (fortes vitesses de rotation de l'arbre à cames), ou lorsque le ressort fatigue, l'action mécanique plaquant la soupape contre le ressort peut ne plus être suffisante. Le contact soupape/arbre à cames peut alors être rompu. Il s'ensuit au mieux une perte de puissance du moteur, accompagnée d'un bruit anormal, mais au pire d'une casse du haut moteur suite à la collision des soupapes et des pistons. C'est donc à éviter.

Objectif du TP : Prévoir, grâce à la simulation numérique et à une modélisation analytique, le phénomène de décollement soupape/arbre à came, et vérifier si le cahier des exigences est respecté.

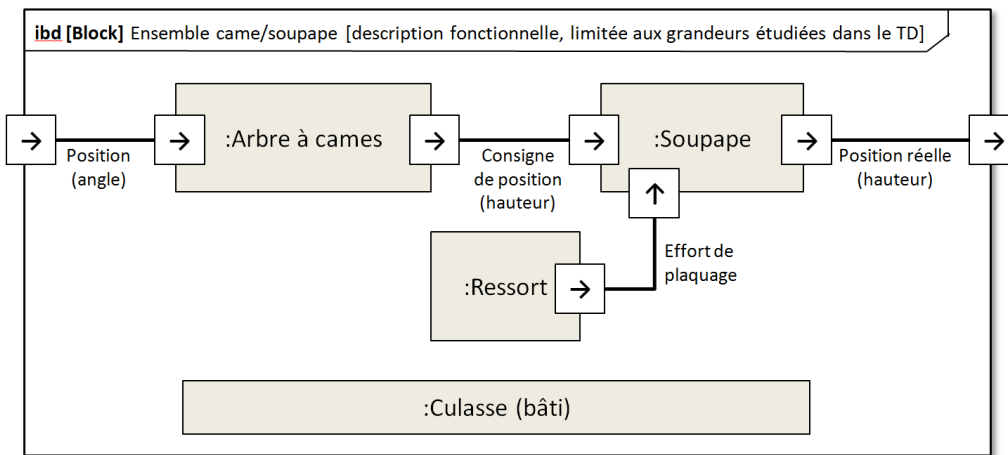


Figure 3 : description fonctionnelle (partielle) de l'ensemble étudié

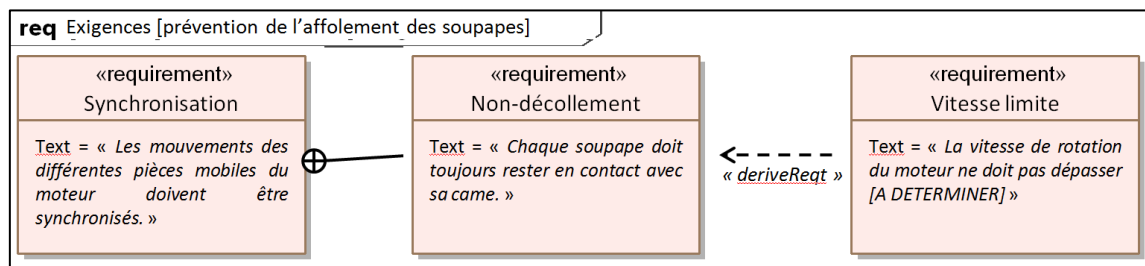
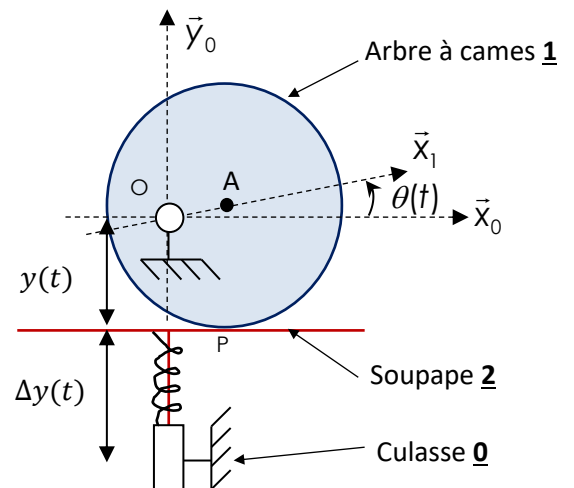


Figure 4 : exigences à respecter pour éviter l'afloement des soupapes

II.Travail proposé

Afin de mener à bien les calculs théoriques et la simulation, nous prendrons le cas simple d'une came à excentrique, voir figure ci-contre. Les grandeurs données sont celles d'un moteur de véhicule de tourisme standard (type Clio, 208, etc.). Une vue du tableau de bord d'un tel véhicule est donnée en Annexe 3.



Données et paramétrage :

- Modèle plan, liaisons parfaites sans frottement
- Position de la soupape paramétrée par $y(t)$, avec $y(t) = -R$ lorsque $\theta = 0 \text{ rad}$.
- L'excentrique est appelé $e = OA = 3\text{mm}$, le rayon de la came est noté R , donc $\vec{OP} = x(t)\vec{x}_0 + y(t)\vec{y}_0$
- Une étude géométrique donne $y(t) = e \cdot \sin(\theta(t)) - R$
- L'arbre à came tourne à vitesse constante
- Soupape de masse $m_2 = 200\text{g}$
- Ressort de raideur $k = 10^5 \text{ N.m}^{-1}$, et délivrant un effort de $F_{init} = 600\text{N}$ lorsque la soupape est à mi-hauteur, c'est à dire pour $\theta = 0 \text{ rad}$. Cela correspond à une longueur de ressort de $L_{init} = 15.8\text{mm}$
- L'attraction de pesanteur est négligée.

Approche théorique

Question 1. En isolant la soupape puis en appliquant le Théorème de la résultante dynamique, trouver l'expression de la résultante des actions mécaniques de 1 sur 2 en fonction notamment de $y(t)$. Pour ce faire, il est conseillé de

- Déterminer l'effort du ressort $F_{ressort}$ en fonction de L_0, L et $y(t)$ (on posera $L = \Delta y(t) - y(t)$ par Chasles, avec $y(t)$ distance algébrique)
- Déterminer $F_{ressort}(\theta = 0rad) = F_{init}$ en fonction de k, L_0, L et R
- En déduire la résultante des actions mécaniques de 1 sur 2 sous la forme :

$$P_{12} = m_2 \ddot{y}(t) + k(y(t) + R) - F_{init}$$

Question 2. En déduire l'expression de la résultante des actions mécaniques de 1 sur 2 en fonction de θ et de ses dérivées.

Question 3. La liaison entre 2 et 1 est unilatérale, c'est à dire que le décollement est possible. Trouver la valeur limite de $\dot{\theta}$ notée $\dot{\theta}_{lim}$ à partir de laquelle ce décollement devient possible. Dans ce cas, on dit qu'il y a affolement de la soupape.

Question 4. Faire l'application numérique de $\dot{\theta}_{lim}$. Commenter le résultat vis-à-vis du fonctionnement classique d'un moteur thermique classique (voir annexe 3) en considérant que la rotation de l'arbre moteur est égale à 2 fois celle de l'arbre à came (noté $\dot{\theta}$). Analyser si dans la réalité, la vitesse de rotation pour laquelle le décollement se produit devrait être plus grand ou plus petit que le $\dot{\theta}_{lim}$ prévu, justifier votre réponse.

Question 5. Discuter de l'hypothèse « L'attraction de pesanteur est négligée ». Par « discuter », il n'est pas demandé aux étudiants de papoter, mais bien d'avoir une approche scientifique et pertinente qui permet de mettre en regard la valeur de la force de pesanteur sur la pièce 2 avec la valeur de maximale de P_{12} .

Approche numérique

La maquette numérique assemblée est donnée dans le fichier **SW/Assemblage**. Pour tous les calculs mécaniques, prendre 400 positions de calcul. Choisir une **Durée du mouvement** permettant d'observer 2 à 3 tours d'arbre à came. Les pièces et liaisons sont déjà déclarées, ainsi que le ressort.

Question 1. Faire une première simulation cinématique (clique-droit sur **Analyse** puis **Calcul mécanique** puis **Etude cinématique**) puis lire la simulation (clique-droit sur **Résultat** puis **Simulation**) pour vérifier que la simulation est cohérente.

Nous allons tout d'abord faire une étude de dynamique « libre », c'est à dire en supposant que la mécanique ne subit aucune action extérieure (pas de couple moteur, pas de poids, etc.). Seul le ressort pourra mettre en mouvement le mécanisme.

Question 2. Positionner manuellement l'arbre à came de sorte que $\theta = 0 \text{ rad}$ (voir paramétrage), et supprimer le couple moteur. Reconstruire l'assemblage (ou l'enregistrer en reconstruisant). Faire clic-droit sur **Analyse** puis **Calcul Mécanique** puis **Suivant**. Choisir **Etude dynamique** dans le menu déroulant avec l'algorithme « RKF45 Adaptatif ». Dans le tableau, autant de lignes que de mobilités apparaissent (une seule dans notre cas). Il faut donc piloter autant de liaisons que de mobilités. Choisir la liaison pivot arbre/bâti, et choisir **libre** dans le menu déroulant. La case **Vitesse** correspond à la vitesse initiale, choisir "0". Lancer le calcul (attention à ne pas prendre un temps de simulation trop grand) puis visualiser la simulation et vérifier que l'action du ressort se fait dans le bon sens. Choisir une **Durée du mouvement** permettant d'observer une dizaine d'oscillations. Qu'observez-vous concernant le mouvement ?

Question 3. Tracer l'évolution de la position angulaire de l'arbre en fonction du temps (clic-droit sur **Courbes/Ajouter/Simple** puis choisir la position angulaire dans la liaison pivot puis **Ajout**. Analyser le résultat obtenu.

Question 4. Comment aurait-on pu modifier le modèle afin de rendre la simulation réaliste ?

Nous allons maintenant chercher à déterminer pour quelle vitesse le décollement arrive. Voir Annexe 2 pour conditions limites pour faire un calcul dynamique avec Meca3D.

Question 5. Reprendre le calcul dynamique en imposant cette fois-ci la vitesse de rotation de l'arbre (choisir **Uniforme** pour le pilotage de la liaison). En faisant des simulations dynamiques, par tâtonnement, déterminer la vitesse limite $\dot{\theta}_{lim}$ à partir de laquelle le piston est sensé perdre le contact avec la came.

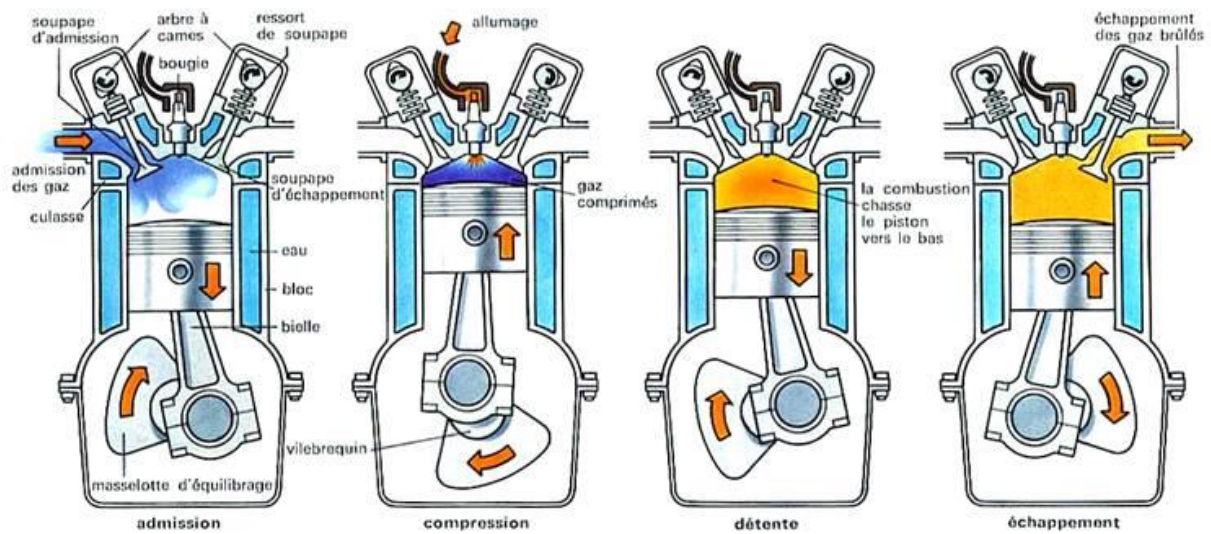
Question 6. Refaire une étude dynamique en vous plaçant à une vitesse de rotation légèrement inférieure à $\dot{\theta}_{lim}$, relever l'effort max du contact soupape/came. Réaliser ensuite une étude similaire (même mouvement) mais en statique. Comparer les efforts de la liaison soupape/came, justifier alors l'intérêt de l'étude dynamique.

Question 7. Il est possible de rendre la liaison came unilatérale, c'est à dire de rendre possible le décollement entre l'arbre et la came. Il suffit pour cela de décocher la case « contact forcé » dans la définition de la liaison came : clic-droit sur la liaison, puis **modifier**. Réaliser de nouveau la simulation pour $1,3 * \dot{\theta}_{lim}$. **Analyser le résultat puis expliquer pourquoi l'affolement des soupapes est impérativement à éviter.**

Question 8. Comparer la simulation et la modélisation analytique. Que dire du respect des exigences pour le véhicule réel ?

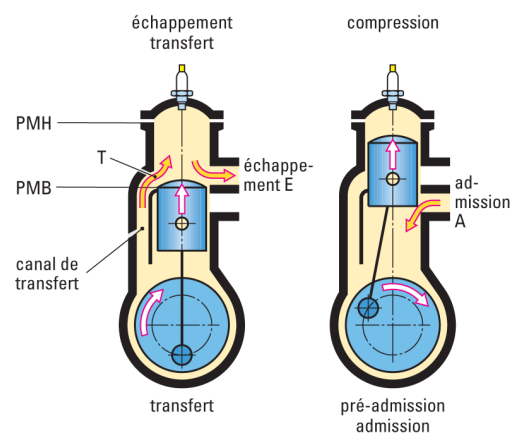
Question 9. (Bonus) Modifier l'excentricité (en l'augmentant) de la came et analyser l'impact du changement sur $\dot{\theta}_{lim}$. Ce résultat était-il prévisible analytiquement ? Justifier.

Annexe 1 : Principe de fonctionnement d'un moteur thermique



Le cycle d'un moteur thermique 4 temps.

Remarque : de nos jours, l'admission de carburant se fait par injection directe dans la chambre de combustion.



Le cycle d'un moteur thermique 2 temps.

Annexe 2 : Condition limites pour les calculs dynamiques (Meca3D)

Pour imposer un couple constant :

Clic-droit sur **Effort** puis **Ajouter**, et choisir **Moteur**.

Sélectionner la liaison sur laquelle vous souhaitez imposer un couple (qui sera mutuel)

Définir sa valeur puis valider.

Pour imposer un couple variable, recommencer mais avec **Moteur variable**. De la même façon, il est possible d'imposer n'importe quelle action mécanique, constante ou variable.



Pour imposer une vitesse de rotation sur une liaison pivot ou pivot glissant :

1) il faut **préalablement** imposer un couple inconnu sur la liaison concernée : Clic-droit sur **Effort** puis **Ajouter**, et choisir **Moteur Inconnu**. Sélectionner alors la liaison concernée.

2) Il faut ensuite choisir la vitesse imposée (éventuellement variable) à la liaison souhaitée dans l'analyse dynamique.

De la même façon, il est possible d'imposer n'importe quel mouvement lors du calcul dynamique, en définissant les actions inconnues correspondantes.

Annexe 3 : Tableau de bord du modèle considéré



Source : Vincent BERROU, Michaël Trovalet