

# **DOSSIER QUESTIONNAIRE**

# 1. Etude énergétique et technologique globale.

## Objectifs :

- Effectuer le bilan énergétique nécessaire à la propulsion du véhicule, établir les ordres de grandeurs et justifier divers choix de conception du moteur à détente prolongée.
- Identifier la solution technique utilisée pour remplir la fonction de détente prolongée.

## Données et hypothèses :

Le véhicule est supposé se déplacer en terrain parfaitement plat et les forces résistantes induites lors des virages seront négligées.

Le coefficient de résistance au roulement des pneumatiques spéciaux Michelin est  $K_R = 1,36/1000$ . La masse du véhicule est de 28 kg et celle du pilote de 48 kg. L'expression de la force de résistance à l'avancement due au roulement des roues est  $F_R = K_R m_T g$  avec  $g = 9,81 \text{ m/s}^2$  et  $m_T$  est la masse totale roulante.

L'expression de la force de résistance aérodynamique est :  $F_A = 1/2 \cdot \rho_{AIR} \cdot S \cdot C_x \cdot V^2$ . La masse volumique de l'air est  $\rho_{AIR} = 1,19 \text{ kg/m}^3$ . La surface frontale  $S$  du véhicule TIM est de  $29 \text{ dm}^2$ , son  $C_x$  vaut  $0,12$ .

Le rendement de la transmission mécanique du véhicule TIM est  $h_T = 0,87$ .

La densité de l'essence  $d$  utilisée est de  $0,74$  et son pouvoir calorifique  $P_{Cal}$  est de  $42700 \cdot 10^3 \text{ J/kg}$ .

Le rendement thermodynamique attendu du moteur à détente prolongée est  $h_{TH} = 0,33$ .

## Questions :

- 1- 1** Déterminer analytiquement la puissance moyenne du moteur  $P_{Moteur}$  nécessaire pour mouvoir le véhicule à 25 km/h de moyenne.
- 1- 2** Calculer numériquement la puissance moyenne du moteur  $P_{Moteur}$  nécessaire pour mouvoir le véhicule à 25 km/h de moyenne. Le résultat sera donné en Watts.
- 1- 3** Déterminer analytiquement la distance maximale théorique  $D_{Max}$  que peut parcourir le véhicule avec un litre d'essence à 25 km/h de moyenne.
- 1- 4** Calculer numériquement la distance maximale théorique que peut parcourir le véhicule avec un litre d'essence à 25 km/h de moyenne. Le résultat sera donné en

km.

- 1- 5** La puissance moyenne obtenue question 1- 2 conduirait à installer un moteur de très petite cylindrée (environ  $5 \text{ cm}^3$ ) fonctionnant en continu. Or ce type de moteur présente des difficultés techniques de réalisation et des rendements thermodynamiques plus faibles que les moteurs de cylindrée supérieure (à cause des surfaces d'échanges thermiques proportionnellement plus grandes et de l'importance relative des fuites par la coupe aux segments). De ce fait, la cylindrée du moteur installé est d'environ  $30 \text{ cm}^3$  et sa puissance est de l'ordre de  $350 \text{ W}$ . Le moteur fonctionnera donc par intermittence moins de  $5 \%$  du temps. Le faible temps de fonctionnement obtenu fait que le cylindre aura le temps de refroidir ce qui est nuisible au rendement thermodynamique du moteur. La solution adoptée (cf Document DT2) consiste à enfermer une petite quantité d'eau autour du cylindre afin de permettre sa vaporisation. Expliquer succinctement pourquoi cette solution permet de minimiser les échanges thermiques et la masse de l'ensemble.
- 1- 6** À l'aide du diagramme de Watt (*figure 3 page 4, DT Présentation Générale*), indiquer le travail supplémentaire  $W_{\text{Supp}}$  qu'il est possible de récupérer par rapport à un cycle classique et expliquer de manière concise pourquoi le moteur à détente prolongée permet une consommation inférieure.
- 1- 7** À l'aide du dossier technique, réaliser le schéma cinématique de l'équipage mobile dans son carter.
- 1- 8** À l'aide du dossier technique et du document ressource DR1, déterminer et calculer numériquement le rapport de détente prolongée  $r_{\text{DP}}$  entre les volumes "PMB Haut" et "PMB bas". On donne  $a = 10,5 \text{ mm}$  et  $e = 4,5 \text{ mm}$ . A-t-on intérêt à augmenter ou diminuer ce rapport ?

## 2. Étude cinématique et dynamique.

### Objectif général:

- Analyser et comparer deux solutions technologiques possibles permettant d'obtenir la détente prolongée du point de vue cinématique et dynamique.

### Remarque :

Les deux problèmes sont indépendants. Les valeurs numériques ne sont pas précisées volontairement, le calcul étant analytique. Les résultats numériques sont présentés sous forme de graphes dans les documents DR3, DR4 et DR6.

Données et hypothèses (voir aussi Documents Ressource DR1 à DR4):

On supposera les solides indéformables et les liaisons parfaites.

Le repère lié à l'ensemble carter moteur est  $\mathbf{R}_0 (O_0, \vec{x}_0, \vec{y}_0, \vec{z}_0)$  où  $O_0$  est un point de l'axe de rotation du vilebrequin. Dans cette étude, le véhicule demeurera immobile et  $\mathbf{R}_0$  sera supposé galiléen comme le repère local terrestre.

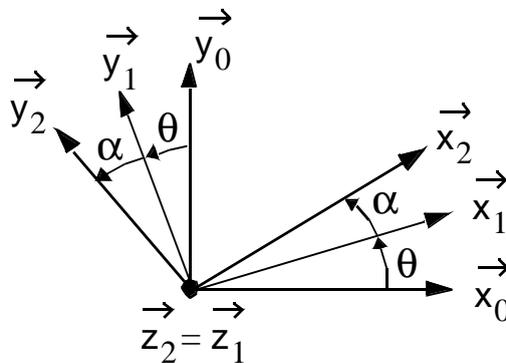
Le vilebrequin  $1$  a pour repère lié  $\mathbf{R}_1 (O_0, \vec{x}_1, \vec{y}_1, \vec{z}_1)$ . Il est repéré par rapport à  $\mathbf{R}_0$  par l'angle  $\mathbf{q}(t)$  :

$$\widehat{(\vec{x}_0, \vec{x}_1)} = \widehat{(\vec{y}_0, \vec{y}_1)} = \theta \quad ; \quad \vec{z}_1 = \vec{z}_0.$$

Le pignon excentrique  $2$  a pour repère lié  $\mathbf{R}_2 (O_2, \vec{x}_2, \vec{y}_2, \vec{z}_2)$ . La position de  $O_2$  est définie par  $\overrightarrow{O_0O_2} = a \cdot \vec{x}_1$ . Le pignon est repéré par rapport à  $\mathbf{R}_1$  par l'angle  $\mathbf{a}(t)$  algébrique :

$$\widehat{(\vec{x}_1, \vec{x}_2)} = \widehat{(\vec{y}_1, \vec{y}_2)} = \alpha \quad ; \quad \vec{z}_1 = \vec{z}_2.$$

Pour effectuer les différents produits vectoriels de ce problème, on pourra utiliser la figure suivante :



La position du centre de gravité  $\mathbf{G}_2$  de  $2$  est définie par  $\overrightarrow{O_2G_2} = s \cdot \vec{x}_2 + t \cdot \vec{z}_0$ . La masse de  $2$  est notée  $\mathbf{m}_2$ . La matrice d'inertie de  $2$  en  $\mathbf{G}_2$  s'écrit :

$$[\mathbf{I}(\mathbf{G}_2, 2)] = \begin{bmatrix} A & -F & -E \\ -F & B & -D \\ -E & -D & C \end{bmatrix}_{(\vec{x}_2, \vec{y}_2, \vec{z}_0)}$$

La bielle  $3$  a pour repère lié  $\mathbf{R}_3 (T, \vec{x}_3, \vec{y}_3, \vec{z}_3)$ . La position de la tête de bielle  $\mathbf{T}$  est définie par

$\overrightarrow{O_2T} = e \cdot \vec{x}_2 + h \cdot \vec{z}_0$ . La position du pied de bielle **P** est définie par

$\overrightarrow{O_0P} = x(t) \cdot \vec{x}_0 + h \cdot \vec{z}_0$ . La bielle 3 est repérée par rapport à **R**<sub>0</sub> par l'angle **j** (t) :

$$\widehat{(\vec{x}_0, \vec{x}_3)} = \widehat{(\vec{y}_0, \vec{y}_3)} = \varphi \quad ; \quad \vec{z}_3 = \vec{z}_0.$$

Le rayon de la couronne fixe 4 est noté R. Le rayon du pignon excentrique 2 est noté r.

Le poids de toutes les pièces sera négligé devant les efforts mis en jeu.

### Premier Problème :

#### Objectif :

- Décrire la cinématique de l'équipage mobile en fonction du paramètre k pour comparer les solutions technologiques possibles.

#### Questions :

- 2- 1** Déterminer l'expression des coordonnées du centre de la tête de bielle T ( $x_T, y_T, z_T$ ) dans **R**<sub>0</sub> en fonction de a, e, h,  $\alpha$  et  $\theta$ . Il est rappelé que  $\alpha$  et  $\theta$  sont *algébriques*.
- 2- 2** On pose  $\alpha = \alpha_0 + k \cdot \theta$  où  $\alpha_0$  est l'angle de calage et k est un réel (d'un point de vue pratique, le calage correspond ici à la manière de positionner au montage les divers éléments). On supposera dans cette question que  $\alpha_0 = 0$ . Déterminer en vous aidant du document ressource DR2, et en supposant que le pignon 2 roule sans glisser sur la couronne 4, deux relations liant R, r, a et k. Puis exprimer R et r en fonction de a et k et le rapport R/r en fonction de k seulement.
- 2- 3** Dans la conception présentée, il a été choisi  $k = -2,5$ . En utilisant les résultats de la question 2- 1, la trajectoire du centre de la tête de bielle T a été tracée pour deux valeurs du calage  $\alpha_0 = 0^\circ$  et  $\alpha_0 = 90^\circ$  (voir document ressource DR3). Indiquer en justifiant votre réponse le bon angle de calage.
- 2- 4** En utilisant les résultats des questions 2- 1 et 2- 3, déterminer de manière analytique la position  $x(\theta, \alpha)$  du centre du pied de bielle P et donc du piston en fonction de e, L, a,  $\alpha$  et  $\theta$ . Le calage de l'équipage mobile est tel que pour  $\theta = 0$  :

$$x(0, \alpha_0) = a + e \cdot \cos \alpha_0 + \sqrt{L^2 - (e \cdot \sin \alpha_0)^2}$$

- 2- 5** En déduire les expressions de la vitesse  $\dot{x}(\theta, \alpha)$  et de l'accélération  $\ddot{x}(\theta, \alpha)$  du centre du pied de bielle P et donc du piston. On supposera pour cette question que le

régime de rotation du moteur est constant ( $\dot{\theta} = \text{cste}$ ).

- 2- 6 À partir des formules obtenues dans les questions précédentes, on décide de comparer les graphes des trajectoires du centre de la tête de bielle, des vitesses et des accélérations du piston pour la solution présentée  $k = -2,5$  et la solution  $k = -0,5$  (cf documents ressource DR3 et DR4). Qualitativement, quels sont les apports de la solution  $k = -0,5$  du point de vue cinématique, dynamique et de la combustion?

### Deuxième Problème :

#### Objectif :

- Déterminer et interpréter les efforts au contact pignon excentrique / couronne fixe pour comparer les deux solutions technologiques.

#### Hypothèse :

Dans la première partie de ce second problème, aucune hypothèse n'est faite sur l'accélération du moteur donc  $\ddot{\theta} \neq 0$  et par conséquent :  $\alpha \neq 0$ .

#### Questions :

- 2- 7 Déterminer le vecteur vitesse  $\overrightarrow{V(G_2, 2/R_0)}$  du centre de gravité du pignon excentrique **2** dans son mouvement par rapport à  $R_0$  en fonction de  $a, s, \dot{\theta}, \alpha, \vec{y}_1, \vec{y}_2$ .
- 2- 8 Déterminer analytiquement le vecteur accélération  $\overrightarrow{a(G_2, 2/R_0)}$  du centre de gravité du pignon excentrique **2** dans son mouvement par rapport à  $R_0$  en fonction des données du problème.
- 2- 9 Déterminer analytiquement le moment dynamique  $\overrightarrow{\delta(G_2, 2/R_0)}$  du pignon excentrique **2** dans son mouvement par rapport à  $R_0$  en fonction des données du problème.
- 2- 10 En déduire le moment dynamique  $\overrightarrow{\delta(O_2, 2/R_0)}$  du pignon excentrique **2** dans son mouvement par rapport à  $R_0$  en fonction des données du problème.

**2- 11** On supposera dans la suite de ce problème que le moteur tourne à vitesse constante donc  $\ddot{\theta} = 0$  et par conséquent :  $\ddot{\alpha} = 0$ . On cherche dans cette question à déterminer l'action de contact dans la denture entre le pignon excentrique 2 et la couronne fixe 4 (voir aussi document DR5).

a) Déterminer le torseur des actions de la bielle sur l'excentrique au point de réduction T en fonction de  $P_{\text{gaz}}$ ,  $S$  et de l'angle  $\varphi$ . On admettra que la composante suivant  $\vec{x}_0$  de l'effort du piston sur la bielle est  $\overrightarrow{F}_{\text{Piston} \rightarrow \text{Bielle}} \cdot \vec{x}_0 = -P_{\text{Gaz}} \cdot S$ . De plus, on admettra que les efforts d'inertie sur la bielle sont négligeables pour ce moteur "lent" et de faible cylindrée.

b) L'effort de contact à la dent en C (avec  $\overrightarrow{O_0C} = (a + r) \cdot \vec{x}_1$ ) s'écrit :  $\overrightarrow{F}_C = -F_C \cdot \tan 20^\circ \cdot \vec{x}_1 - F_C \cdot \vec{y}_1$ . Après écriture du théorème du moment dynamique par rapport à  $R_0$ , déterminer analytiquement l'effort  $F_C$  en fonction des données du problème.

c) Une approche simplifiée de l'évolution de l'effort de contact  $F_C$  lors du temps moteur est donnée document ressource DR6 pour  $k = -2,5$  et  $k = -0,5$ . Quel est le problème technologique qui peut être soulevé pour  $k = -2,5$  ? Quel est par rapport à ce problème l'apport de la solution  $k = -0,5$  ?

### 3. Étude de résistance des matériaux.

#### Objectif général :

- L'objectif de cette étude est de vérifier le dimensionnement retenu de la bielle. Le critère dimensionnant choisi est la tenue au flambage en compression majorée par un coefficient de sécurité ce qui correspond à l'expertise de ce type de moteur de faible cylindrée et "lent".

#### Remarque :

Les deux problèmes sont indépendants.

#### Premier Problème :

#### Objectif :

- Après établissement des formules d'Euler, vérifier la tenue au flambage de la bielle.

Données et hypothèses :

La bielle (voir dossier technique) est en alliage d'aluminium ( $E = 72 \text{ GPa}$ ). Cette bielle peut être modélisée dans un premier temps par une poutre droite de section rectangulaire constante de hauteur  $h = 3 \text{ mm}$  et de largeur  $b = 19 \text{ mm}$  reposant sur deux appuis distants de  $L = 100 \text{ mm}$  appelés ici A et B (voir figure 1). Le moment quadratique de la section de la bielle par rapport à l'axe  $(G, \vec{z})$  sera notée  $I_{Gz}$ .

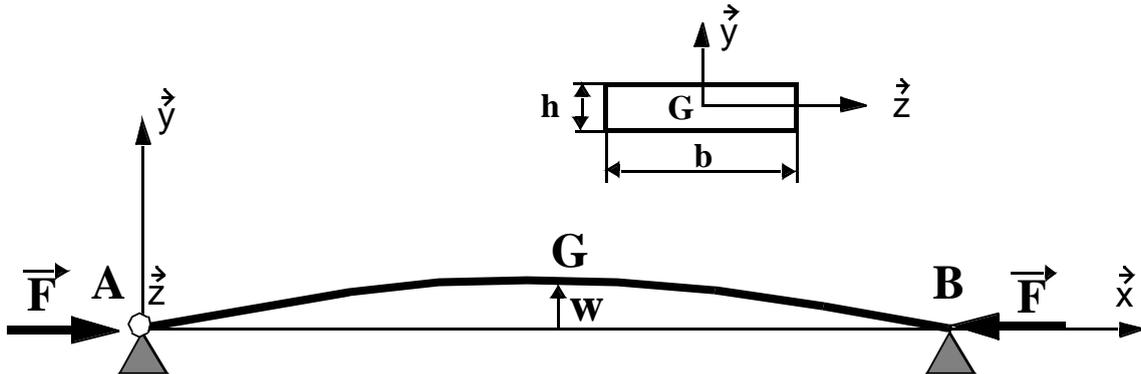


Figure N° 1 : Modélisation poutre de la bielle.

Dans cette modélisation, la poutre est considérée rotulée en A et simplement appuyée en B. Le repère défini figure n°1,  $(A, \vec{x}, \vec{y}, \vec{z})$  est utilisé. Les coordonnées des points sont :  $A(0,0,0)$ , et  $B(100, 0,0)$  en mm. La bielle est soumise à un effort de compression  $\vec{F}$ . On considérera que l'effort de compression est généré principalement par la pression de combustion et que son intensité est égale à 4300 N.

Questions :

**3- 1** On considère la poutre en position déformée dans le plan  $(A, \vec{x}, \vec{y})$  comme représentée figure 1. La flèche de la poutre, supposée petite, est notée  $w$  au point G. Exprimer analytiquement le moment fléchissant  $M_{f, \vec{z}}$  au point G en fonction des données du problème.

**3- 2** Montrer que l'équation différentielle de la déformée peut se mettre sous la forme :

$$\frac{d^2 w}{dx^2} + \omega^2 \cdot w = 0 \quad (1)$$

Exprimer  $\omega^2$  en fonction de  $E$ ,  $I_{Gz}$  et  $F$ .

**3- 3** La solution générale de l'équation (1) est de la forme  $w = A_1 \cdot \cos(\omega x) + A_2 \cdot \sin(\omega x)$ .  
A l'aide des conditions aux limites, montrer que  $A_1 = 0$  et déterminer une condition nécessaire pour que la flèche de la déformée ne soit pas nulle.

**3- 4** En déduire l'expression de la force critique d'Euler pour la poutre bi-appuyée.

**3- 5** Montrer que, dans le cas d'une poutre bi-encastree, l'équation différentielle de la déformée peut se mettre sous la forme :

$$\frac{d^2 w}{dx^2} + \omega^2 \cdot w = C \cdot x + D \quad (2)$$

**3- 6** Résoudre l'équation différentielle et à l'aide des 4 conditions aux limites de la poutre bi-encastree, écrire un système homogène de 4 équations linéaires pour déterminer les constantes d'intégrations. Montrer que ce système admet une première solution non nulle si :  $\omega \cdot L = 2\pi$ . En déduire l'expression de la force critique d'Euler pour une poutre bi-encastree.

**3- 7** Calculer numériquement la force critique d'Euler pour la bielle du moteur à détente prolongée. Sachant qu'un coefficient de sécurité 2 est préconisé, le dimensionnement est-il correct ? Proposer éventuellement une modification de la bielle.

### **Deuxième Problème :**

#### **Objectif :**

- Pour compléter la vérification du dimensionnement retenu, l'analyse des résultats d'une modélisation éléments finis de la bielle est à effectuer.

#### **Données et hypothèses (voir aussi Documents Ressource DR7 et DR8):**

La bielle a été modélisée par éléments finis à l'aide d'éléments de plaque de type Mindlin. Le maillage, les épaisseurs, le chargement et les conditions aux limites sont explicités dans le document ressource DR7 figure (a). Des conditions aux limites en translation sont imposées sur les cercles de tête et de pied de bielle. La charge est imposée par pression répartie au niveau du pied de bielle de telle sorte que la résultante soit égale à  $-4300 \cdot \vec{x}$  dans le cas où la bielle est verticale. On se propose, dans cette partie, d'analyser les résultats obtenus en contraintes et au flambage.

- 3- 8** La figure (b) du document ressource DR7 montre le champ de la contrainte équivalente de Von Mises. Un zoom est effectué sur le pied de bielle.
- a) La couleur uniforme du champ de la contrainte équivalente est-elle conforme à la théorie ?
  - b) En vous aidant du champ de cisaillement local autour du pied de bielle présenté document ressource DR8 figure (a), indiquer en argumentant si la valeur de la contrainte maximale est valide.
  - c) Quelles solutions sont envisageables pour améliorer la qualité du résultat ?
- 3- 9** Une étude de stabilité a été menée et le premier mode de flambage est présenté document ressource DR8 figure (b). La charge de flambage obtenue est de 14920N.
- a) Expliquer l'origine des différences obtenues entre le calcul par la formule d'Euler (environ 5000N) et le modèle éléments finis.
  - b) Expliquer pourquoi le logiciel normalise automatiquement la flèche du mode de flambage à 1.

## **4. Écriture de spécifications dimensionnelles et géométriques.**

### Objectif :

- En vue de la réalisation du carter bas, réaliser l'écriture des spécifications relatives aux surfaces fonctionnelles.

### Question :

- 4- 1** Sur le document réponse DR10 du dossier ressource, écrire selon la norme I.S.O. (spécifications dimensionnelles et géométriques sans valeur numérique de tolérance) les exigences fonctionnelles relatives aux surfaces du carter bas assurant les fonctions techniques suivantes :
- FT1 : Guider en rotation le vilebrequin ;
  - FT2 : Réaliser l'engrènement du pignon sur la roue dentée intérieure (calage,...).

## 5. Études de reconception :

### Premier Objectif :

Dans la phase d'expérimentation du moteur à détente prolongée, on désire modifier le calage de l'ouverture/fermeture des soupapes.

### Nouvelle fonction technique à assurer :

- Assurer un réglage angulaire de l'ouverture des soupapes par rapport aux points morts du piston.

### Question :

- 5- 1** Esquisser à main levée une solution constructive permettant d'assurer cette nouvelle fonction.

### Deuxième objectif :

Dans la phase d'essai de ce moteur à détente prolongée, on s'est aperçu que des chocs apparaissaient au niveau du contact des roues dentées du train épicycloïdal. Ces chocs génèrent des vibrations et une détérioration des roues dentées.

L'étude dynamique réalisée précédemment a montré que le passage du facteur  $k = -2,5$  à  $k = -0,5$  permet de remédier à ce problème. Un schéma cinématique correspondant à cette solution est proposé document ressource DR9.

### Nouvelles contraintes techniques de reconception :

- Nombre de dents du pignon : 21 dents, nombre de dents de la couronne : 42 dents ;  
module :  $m = 1$ .

### Question :

- 5- 2** Proposer sous forme d'un schéma technologique cette nouvelle conception.
- 5- 3** Esquisser, sur le calque réponse DR11, un dessin de prédimensionnement, à main levée, des solutions constructives des liaisons permettant d'assurer cette modification. Dans cette esquisse, vous pourrez vous appuyer sur la forme des pièces existant dans la solution initiale et vous représenterez les pièces aux dimensions les plus vraisemblables. Des annotations pourront expliquer vos solutions. Ce travail représente une étape préparatoire à la définition de la maquette numérique.

## 6. Exercice pédagogique

### Finalités :

On se propose lors de l'étude de différents systèmes techniques, dont celui du moteur à détente prolongée, d'analyser les dispositions constructives existantes pour la transmission de puissance mécanique par des mécanismes à loi entrée/sortie complexe de différents types et leur comportement cinématique. Parmi ces mécanismes, vous vous intéresserez aux mécanismes à came.

### Niveau d'enseignement concerné :

BTS Conception de Produits Industriels ou DUT Génie Mécanique.

### Capacités concernées par le travail demandé en BTS CPI :

- **Capacité (analyser) C2-3** : analyser une solution technique ;

On demande d'analyser le comportement mécanique d'un système, c'est-à-dire, en autonomie de :

- représenter un schéma de la solution,
- justifier les solutions constructives,
- analyser la valeur du produit,
- évaluer les performances.

- **Capacité (imaginer) C3-1** : Imaginer des solutions techniques.
- **Capacité (représenter) C3-2** : Représenter des principes, des architectures, des solutions constructives.
- **Capacité (choisir) C3-3** : Choisir une solution technique.
- **Capacité (calculer, vérifier, évaluer) C4-1** : Dimensionner et spécifier les composants du produit.

### Documents de référence :

Plans du moteur à détente prolongée DT1 à DT3.

### **Remarque :**

Le candidat devra imaginer d'autres documents que ceux présents dans le sujet. Il en précisera la nature et le contenu.

### Travail demandé :

Le travail demandé est relatif à une activité pédagogique de travail dirigé dont l'objectif général est de permettre à l'étudiant d'être capable d'analyser les mécanismes à came, d'en définir les différents types et de calculer leur comportement cinématique.

L'arrêté portant définition du BTS CPI précise les objectifs :

A partir des lois entrée-sortie d'un mécanisme à came :

- Tracer la came à partir d'une loi de mouvement donnée.
- Interpréter les courbes de comportement (statique, cinématique ou dynamique) produites par des logiciels.

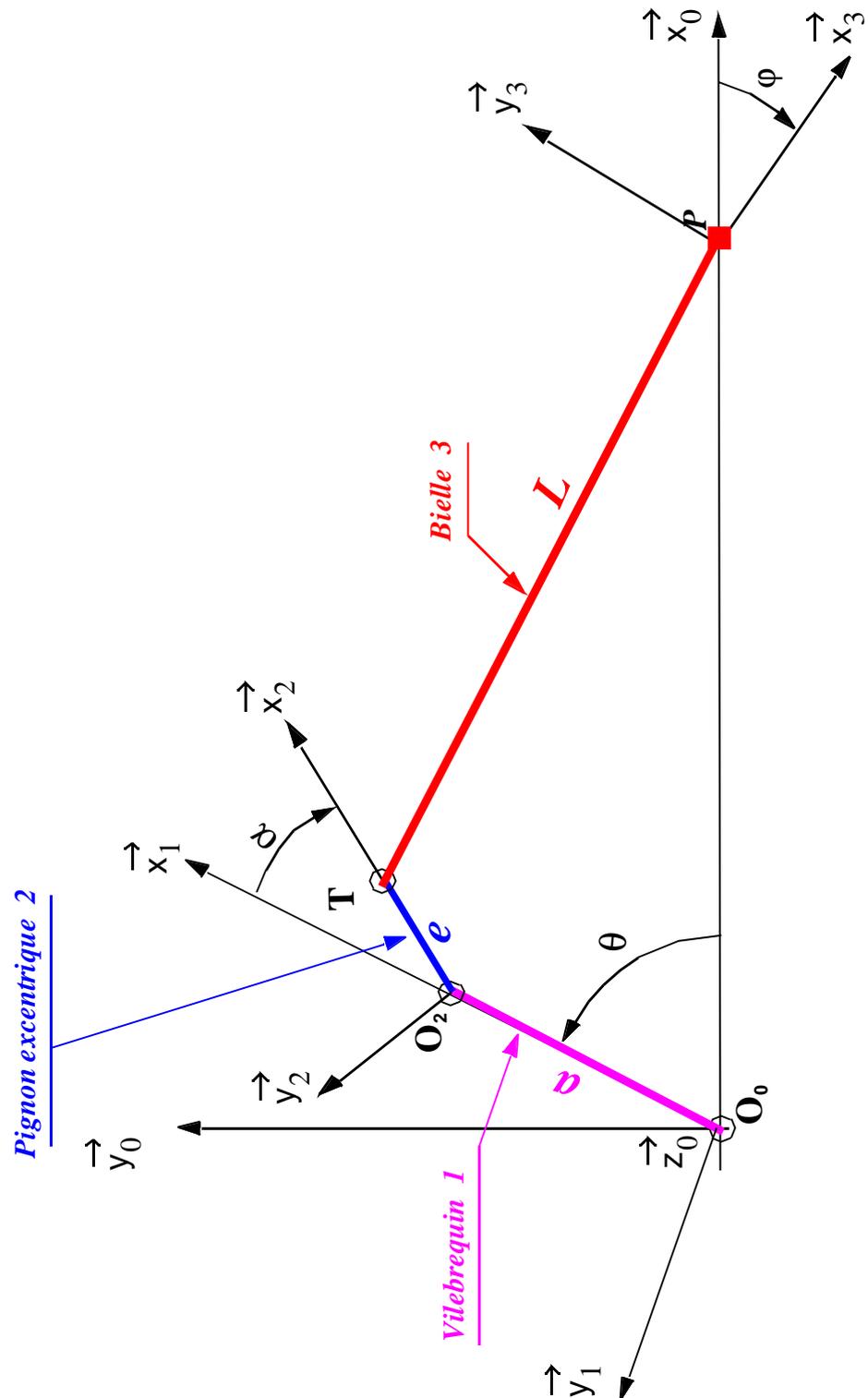
La démarche retenue est celle qui, à partir de différents mécanismes que vous présentez, permet de dégager des principes généraux de fonctionnement. Le travail dirigé proposé s'appuie sur l'un de ces cas.

On demande :

- 6- 1** D'analyser le contenu à enseigner afin de définir précisément les différentes structures concernées par l'objectif général.
- 6- 2** De dégager et de décrire, pour le travail dirigé proposé, le ou les objectifs opérationnels s'inscrivant dans l'objectif général précisé ci-dessus.
- 6- 3** De décrire la situation initiale (les capacités initiales).
- 6- 4** De définir les compétences nouvelles et la méthode à acquérir lors de la séquence, et d'identifier les difficultés prévisibles des étudiants.
- 6- 5** De décrire les supports techniques utilisés, les outils et les moyens pédagogiques (matériels et/ou logiciels).
- 6- 6** De décrire le déroulement de la séquence.

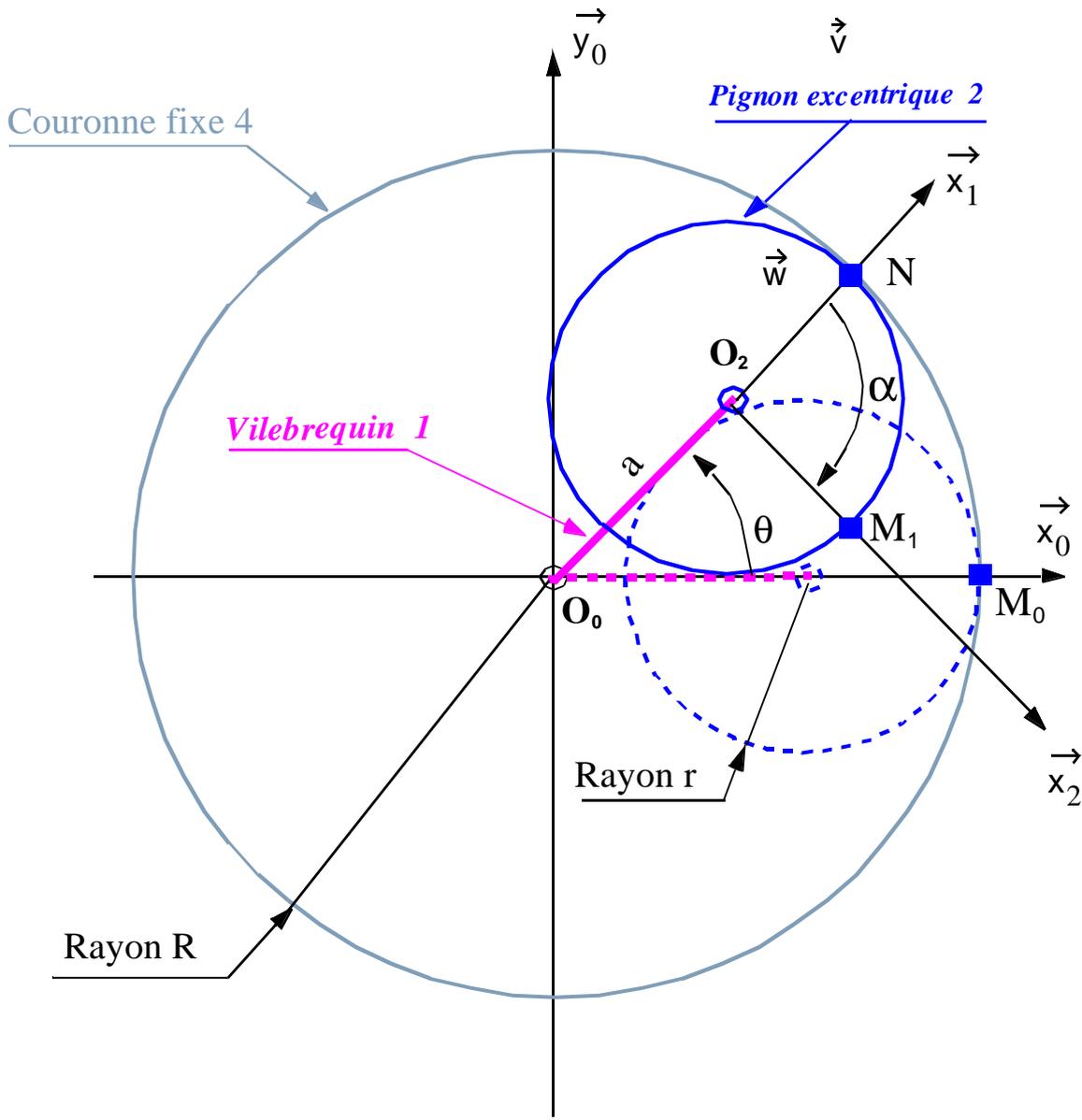
# **DOSSIER RESSOURCE**

# DOCUMENT RESSOURCE DR1



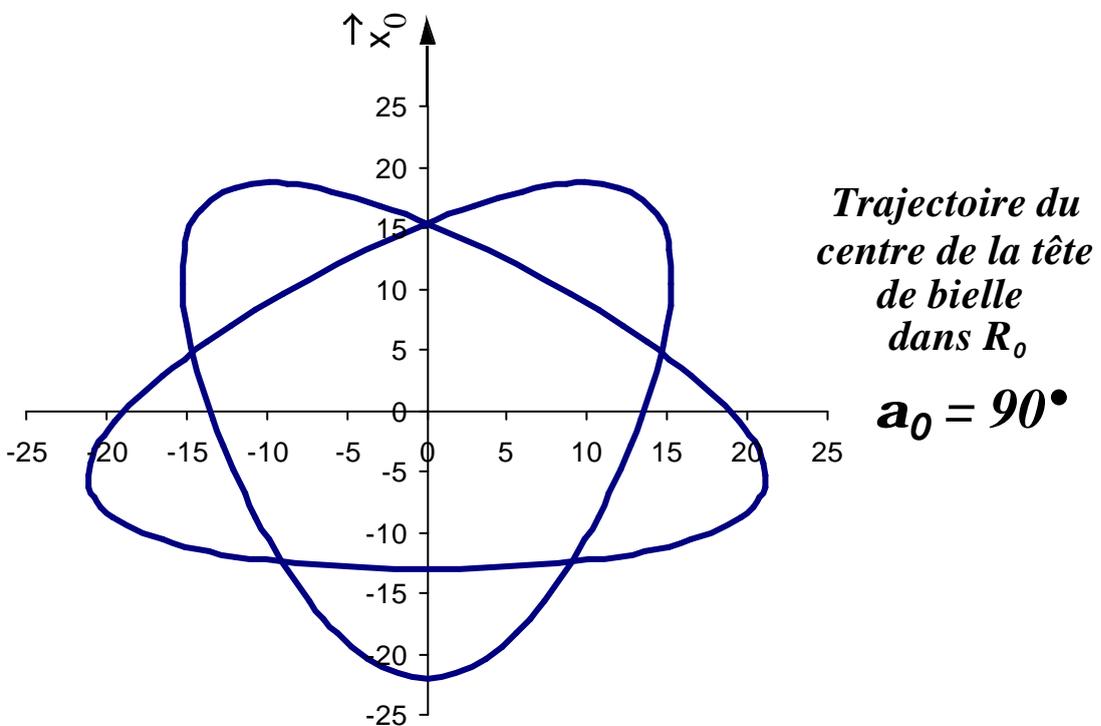
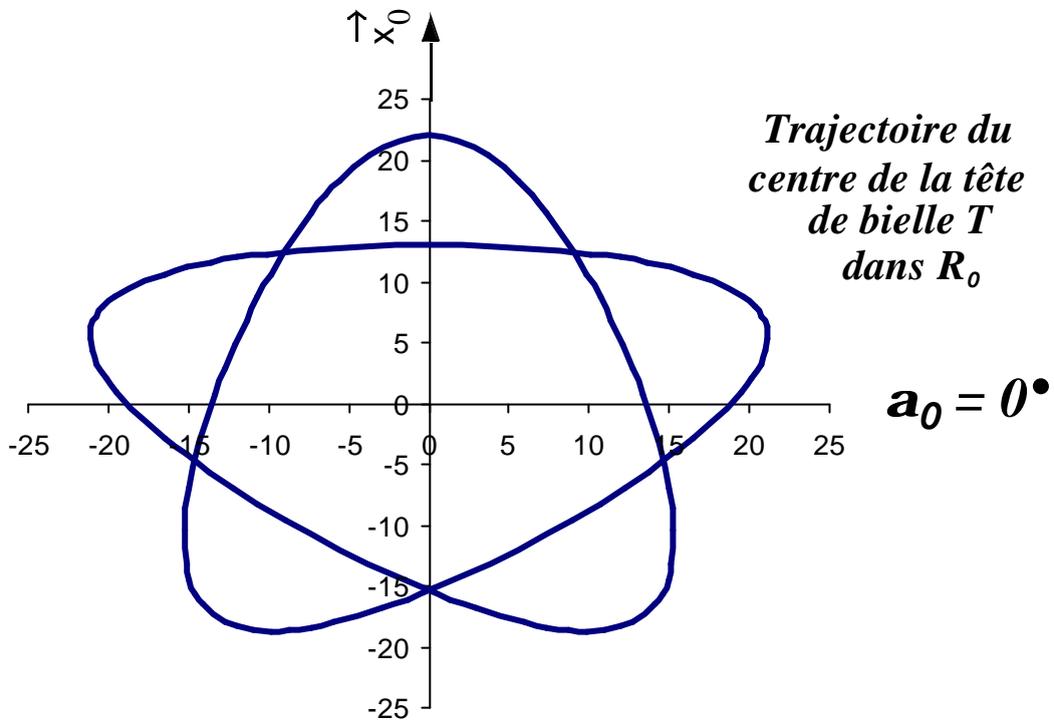
## DR1 : Modélisation cinématique de l'équipage mobile

# DOCUMENT RESSOURCE DR2



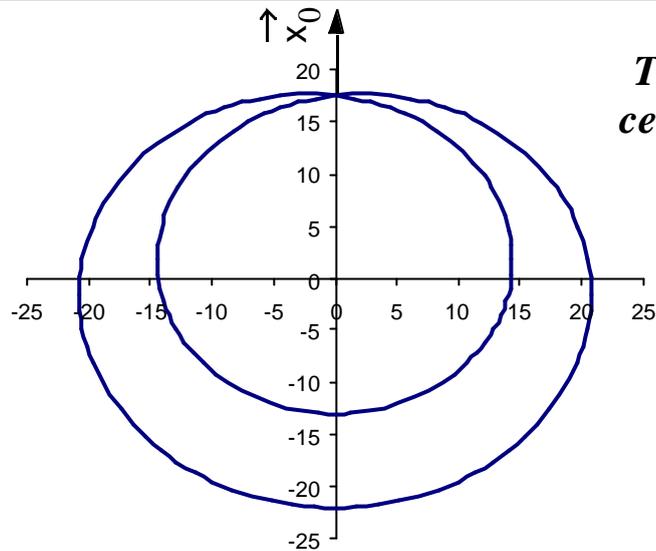
## DR2 : Paramétrage de la géométrie en fonction de k

# DOCUMENT RESSOURCE DR3

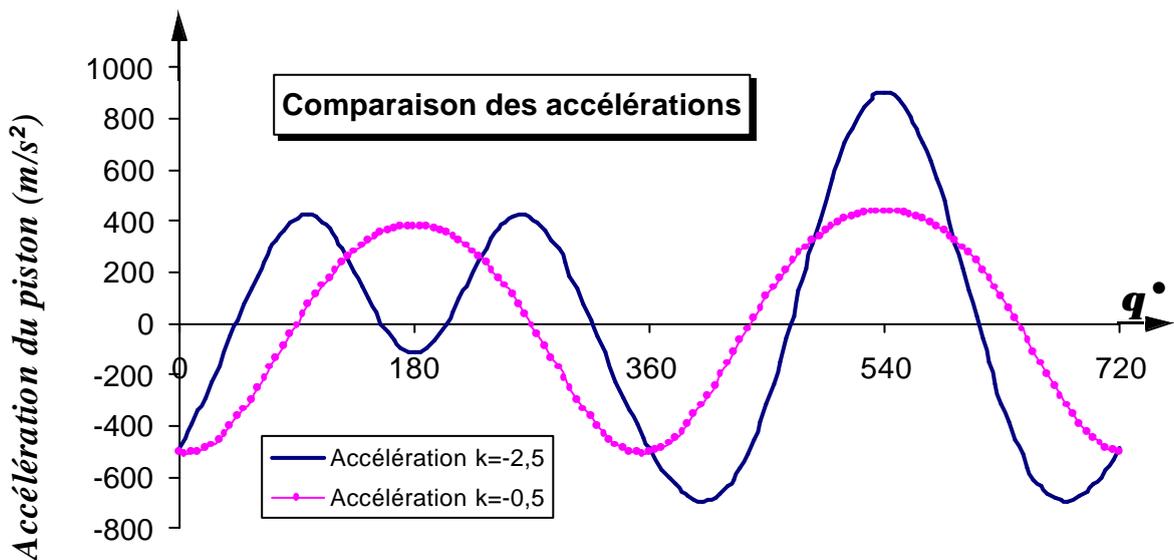
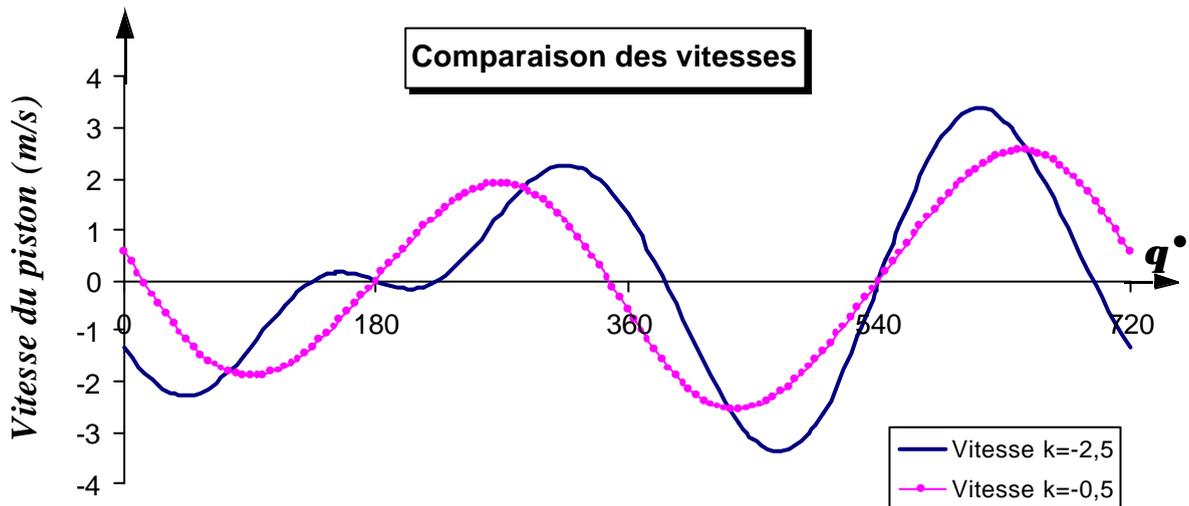


## DR3 : Etude du calage ( $k = -2,5$ )

# DOCUMENT RESSOURCE DR4

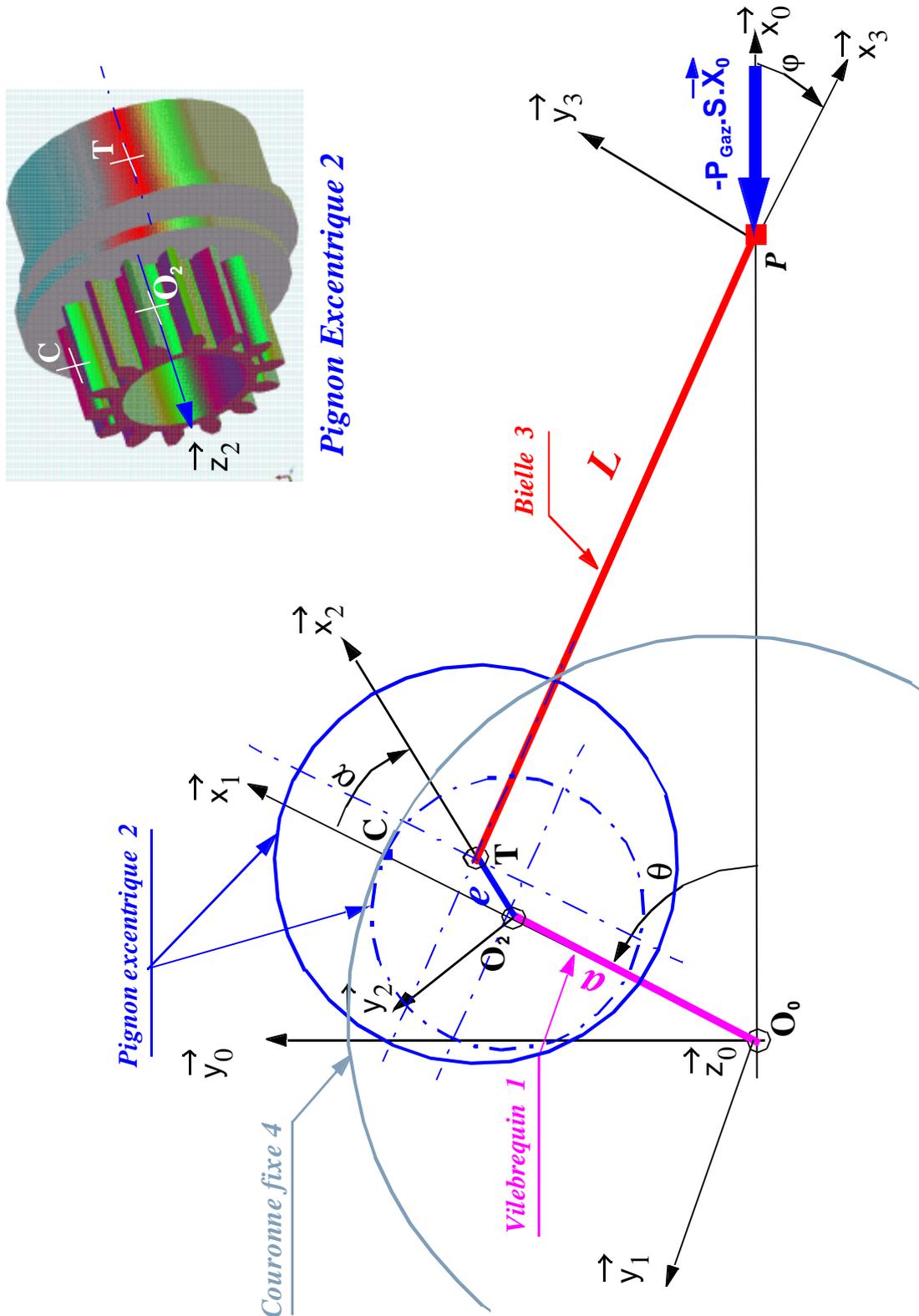


*Trajectoire du  
centre de la tête  
de bielle  $T$   
dans  $R_0$   
pour  $k = -0.5$*



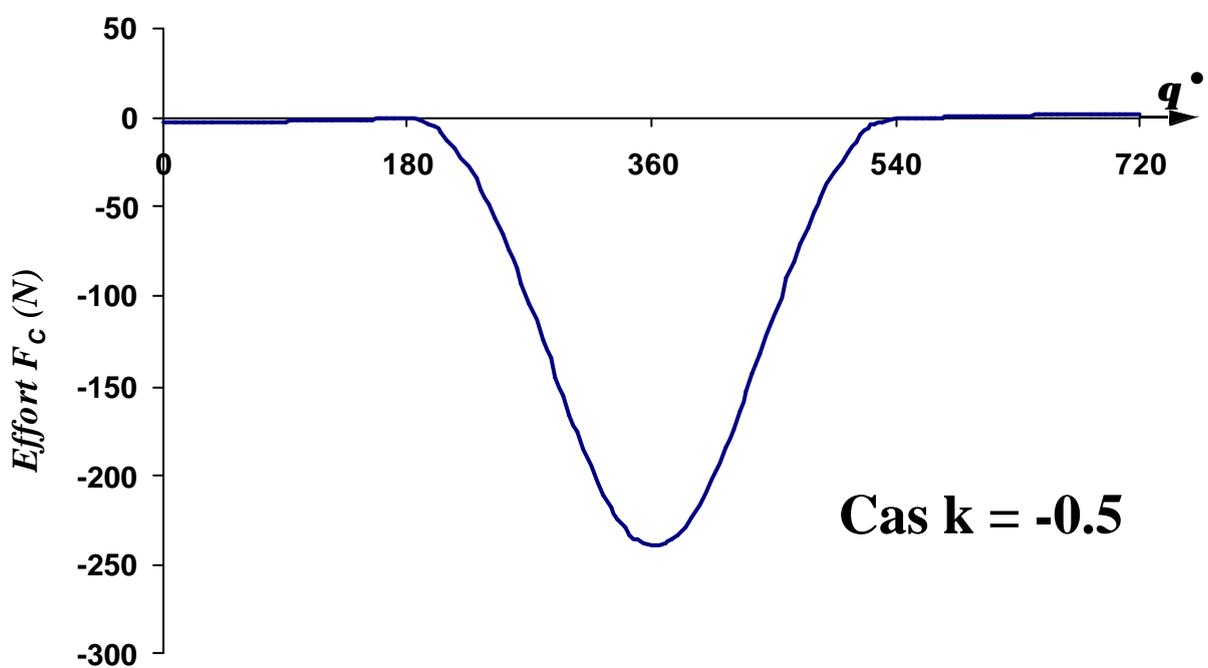
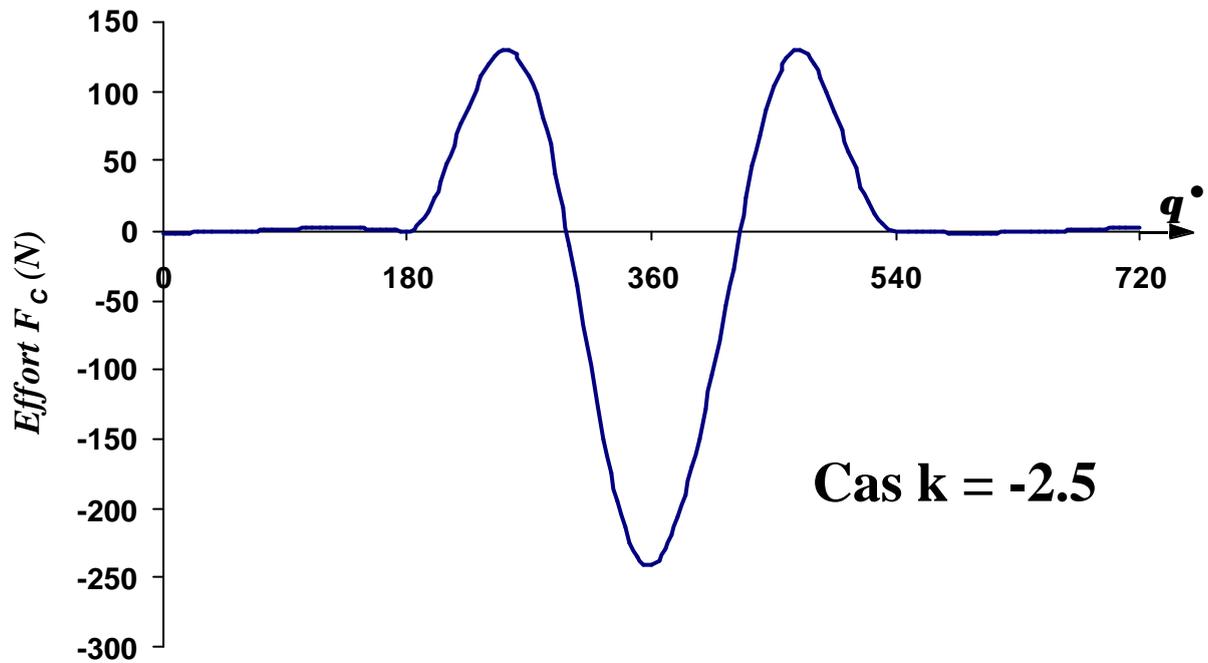
**DR4 : Comparaison des solutions  $k = -2,5$  et  $k = -0,5$**

# DOCUMENT RESSOURCE DR5



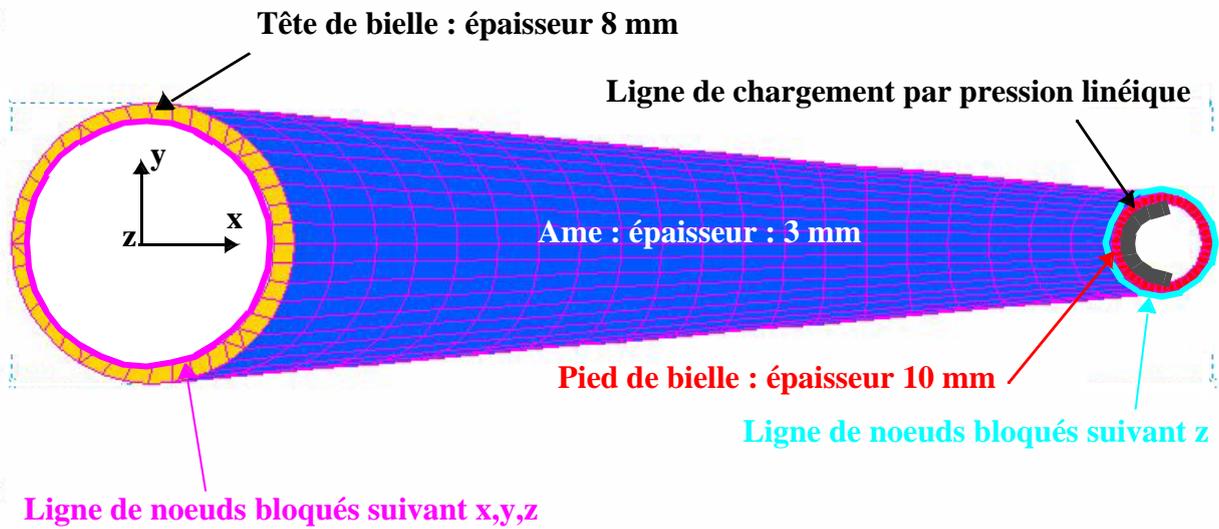
**DR5 : Détermination des efforts de contact dans la denture**

# DOCUMENT RESSOURCE DR6

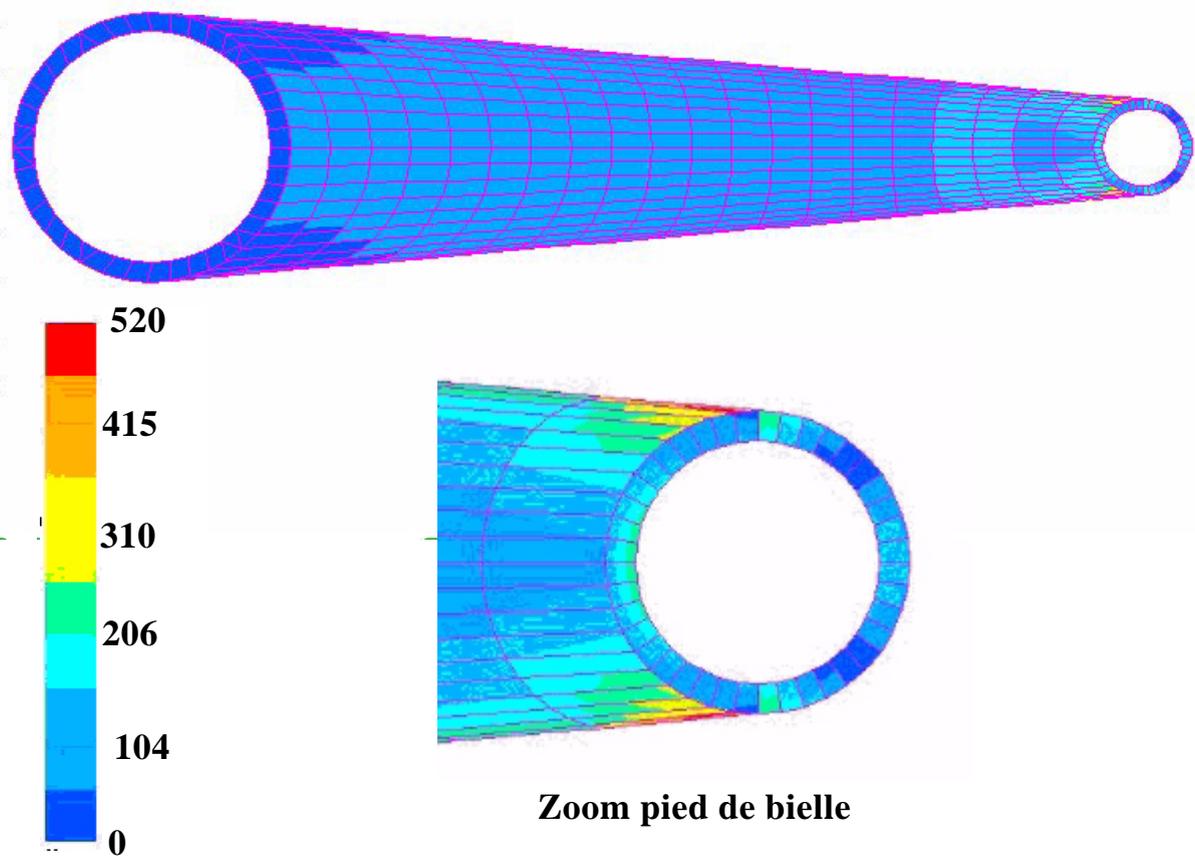


## DR6 : Etude de l'effort au contact de la dent

# DOCUMENT RESSOURCE DR7

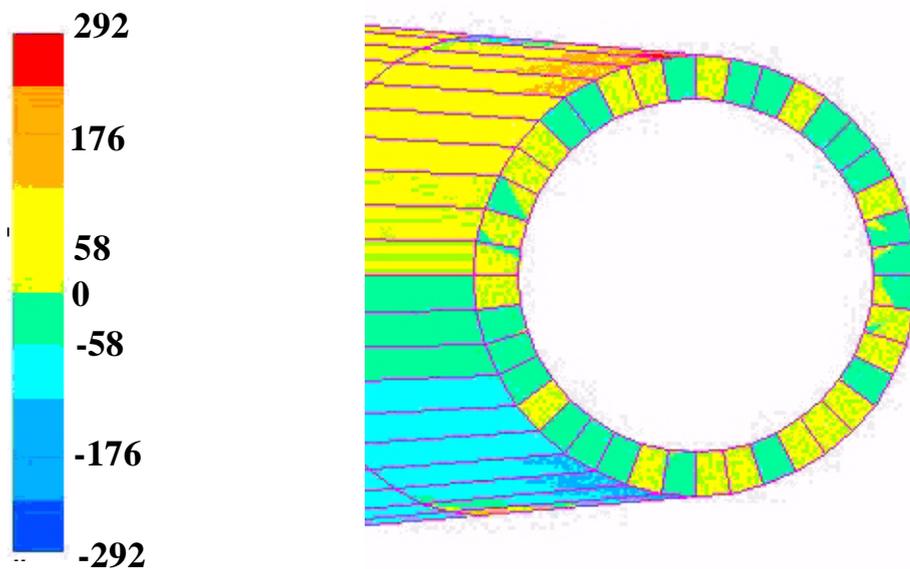


DR7 Figure (a) : Modèle E.F de la bielle

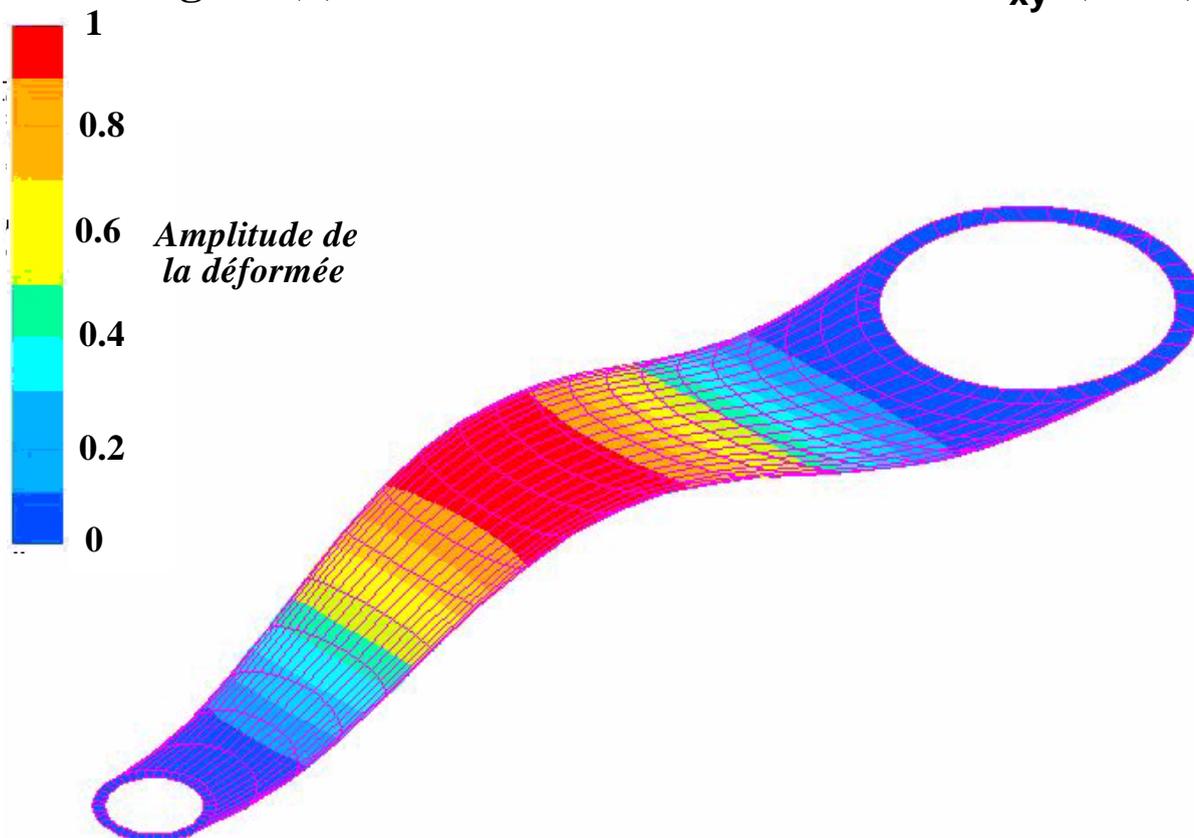


DR7 Figure (b) : Contrainte équivalente de Von Mises (MPa)

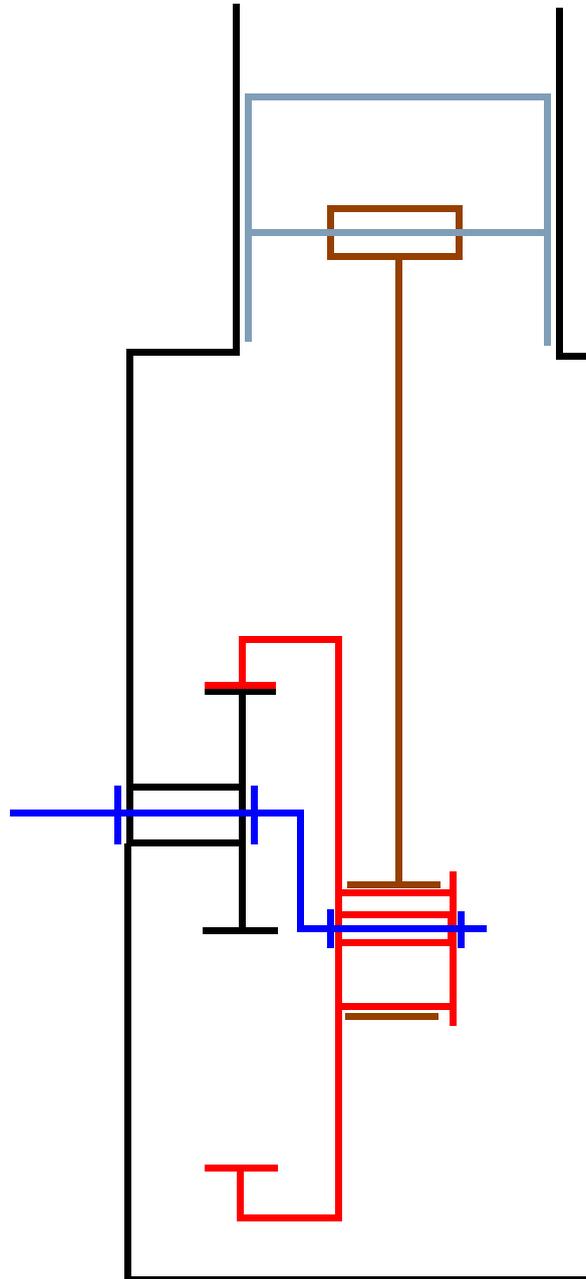
# DOCUMENT RESSOURCE DR8



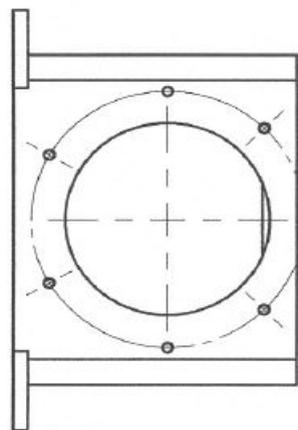
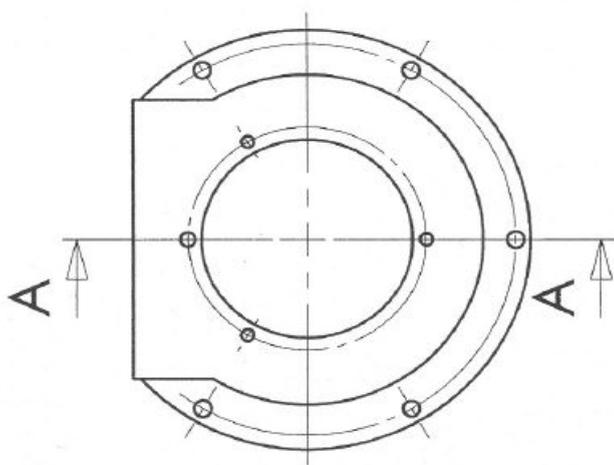
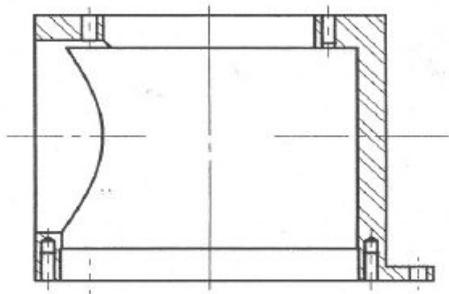
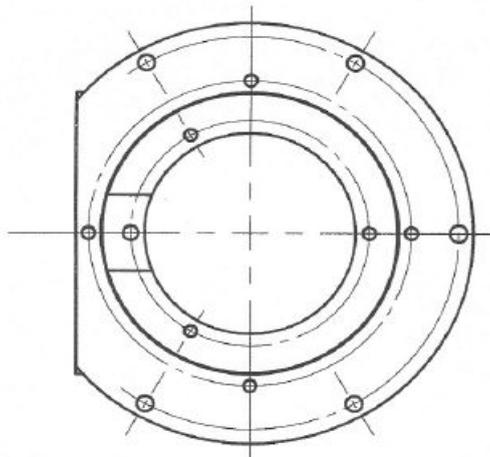
DR8 Figure (a) : Visualisation de la contrainte  $\tau_{xy}$  (MPa)



# DOCUMENT RESSOURCE DR9



**DR9 : Schématisation de la solution  $k = -0,5$**



# **CALQUE RÉPONSE DR11**

# **DOSSIER TECHNIQUE**

**MOTEUR  
À DÉTENTE PROLONGÉE  
DE VÉHICULE  
«ECO-MARATHON SHELL»**



## 1. Mise en situation :

Le système mécanique qui fait l'objet de l'étude est un Moteur à Détente Prolongée prototype utilisé dans la compétition «Éco-Marathon Shell» et développé par l'équipe TIM de l'Université Paul Sabatier et de l'INSA de Toulouse.

L'éco-marathon est une compétition qui voit s'affronter sur le circuit de Nogaro des lycéens, des étudiants et des ingénieurs venus de toute la France et de l'étranger (Japon, Brésil, Portugal, Finlande,...). Toutes les équipes ont pour seul but de consommer le moins possible aux commandes d'un véhicule entièrement conçu pour cette course, en étant totalement libre quant aux technologies employées.



*Figure N° 1 :Image générale des équipes à Nogaro .*

La course s'effectue sur 6 tours, soit 21,816 km, à une vitesse moyenne minimale de 25 km/h. La consommation est ensuite ramenée en nombre de kilomètres par litres de carburant.

La technologie développée par l'équipe TIM s'est révélée particulièrement pertinente puisque l'équipe a été vainqueur toutes catégories en 2000, 2ème dernière une équipe japonaise (à 0.01 g près !) en 2001 et premier en 2002 avec le record du monde de consommation : 3494 km/l. Elle a par ailleurs obtenue le premier prix de l'innovation en présentant en 1998 le moteur

à détente prolongée. Il est à noter que les applications présentées dans cette étude sont seulement proches de la réalité pour d'évidents problèmes de confidentialité compte-tenu de la compétition acharnée à laquelle se livrent les équipes de pointe.

## 2. Principe de la détente prolongée :

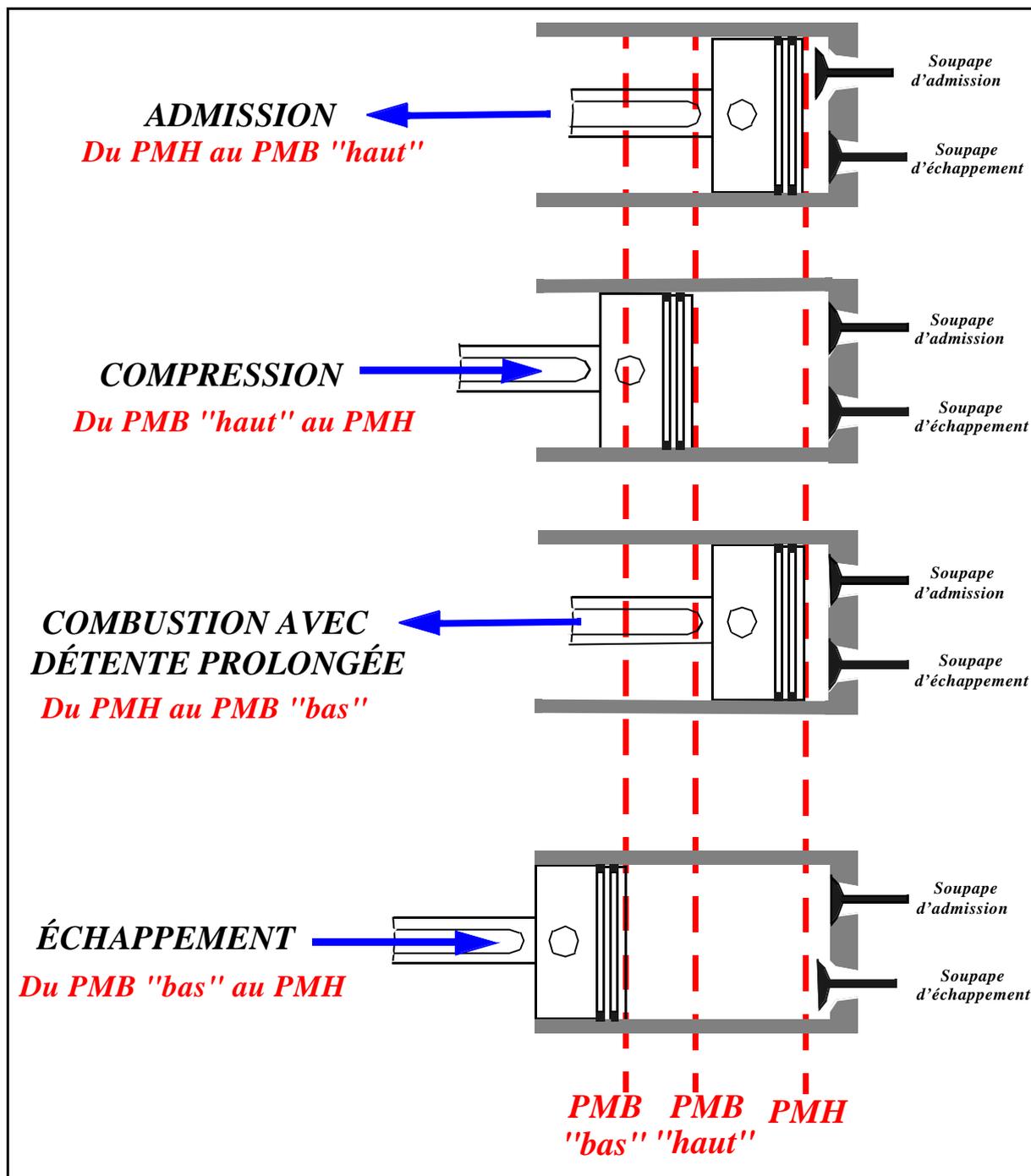


Figure N° 2 : Cycle à 4 temps à détente prolongée.

Le moteur à détente prolongée utilise un système piston-cylindre classique suivant un cycle à 4 temps. La cinématique particulière qui fera l'objet de l'étude permet d'obtenir deux

points morts bas : un point mort bas «haut» PMB-H et un point mort bas «bas» PMB-B ce qui permet d'obtenir une détente prolongée. Le point mort haut PMH est unique.

Le diagramme de Watt théorique d'un tel cycle est représenté figure n°3. L'aire ABCD représente le travail qu'il est possible de récupérer dans un cycle classique. La pression résiduelle après détente au point D est encore de 5 à 6 bars et l'ouverture de la soupape d'échappement provoque une chute indispensable mais prématurée de la pression des gaz. Dans le cas de la détente prolongée, l'ouverture de la soupape d'échappement se fait au point E à une pression plus faible.

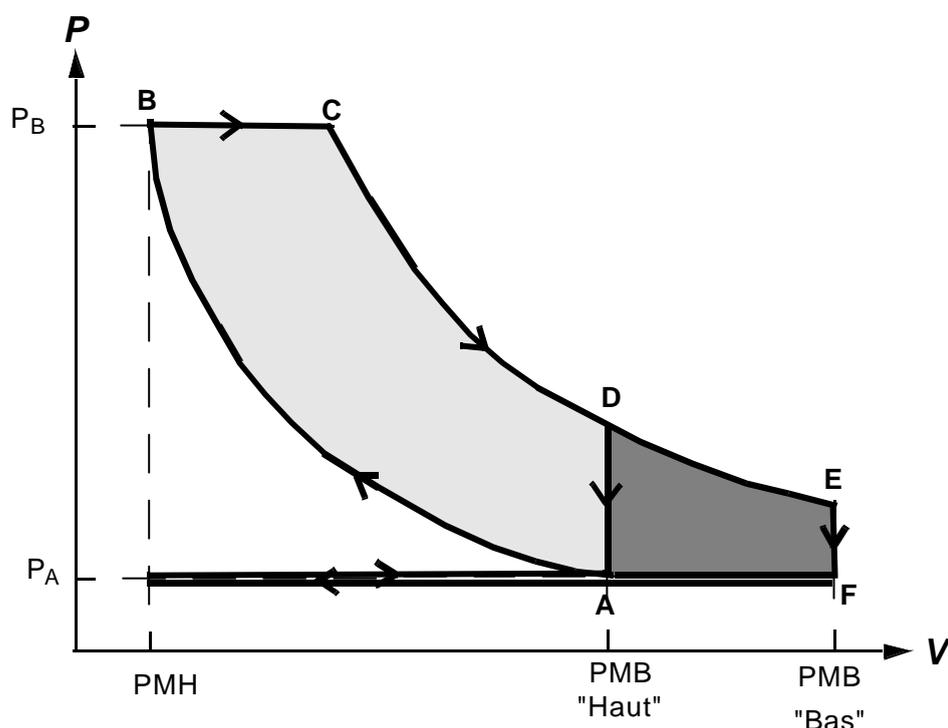


Figure N° 3 : Diagramme de Watt.

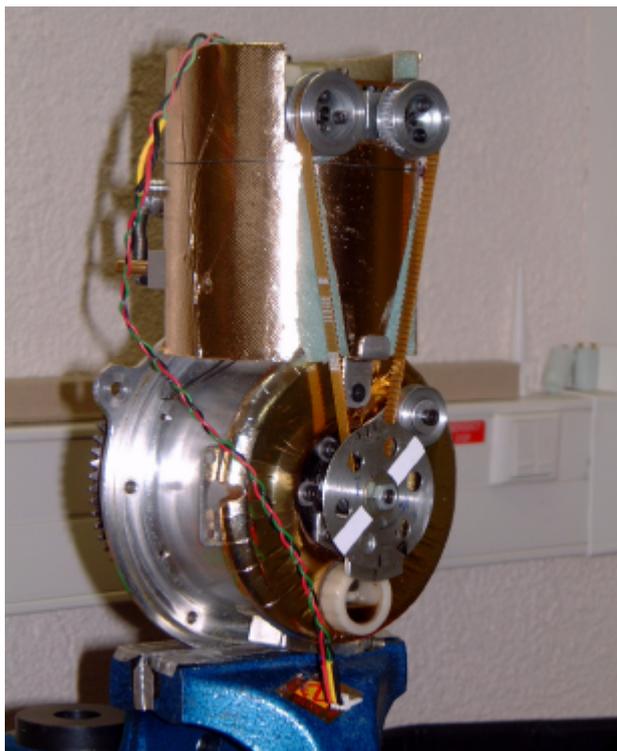
Les principaux avantages espérés ou avérés de cette technologie sont :

- Une réduction de la consommation d'environ 30 % en moyenne.
- L'adaptation à une combustion à mélange pauvre qui permet d'abaisser la teneur en CO des gaz d'échappement à moins de 1% en volume voire 0.5% couramment.
- Une température plus basse des gaz d'échappement donc de la soupape d'échappement ce qui autorise un fonctionnement continu à pleine charge.
- Un bruit inférieur du fait de la détente plus importante des gaz d'échappement.

Parmi les principaux inconvénients, on peut citer :

- *Une complexité mécanique accrue.*
- *Une puissance massique plus faible.*
- *Un équilibrage plus délicat d'un multicylindre.*

### **3. Description générale du moteur à détente prolongée :**



*Figure N° 4 : Vue générale extérieure.*

Caractéristiques générales du moteur :

- *Cylindrée 31 cm<sup>3</sup>.*
- *Régime nominal environ 2000 tr/mn.*
- *Injection directe, modèle spécifique au moteur TIM avec cartographie programmable.*
- *Puissance au régime nominal : environ 350W*
- *Fonctionnement intermittent du moteur (moins de 5% du temps d'utilisation) nécessitant un système original d'optimisation du maintien en température par vapeur d'eau.*

## 4. Réalisation :

Les documents techniques DT1 à DT3 représentent les plans d'un moteur à détente prolongée, le document DT4, une nomenclature partielle. La Figure n°5 représente l'équipage mobile en perspective. Pour obtenir la détente prolongée, le système bielle-manivelle classique est remplacé par un système proche des trains épicycloïdaux. La tête de bielle est insérée sur un pignon excentrique (voir aussi DR5). Ce pignon est guidé sur le vilebrequin et engrène sur la couronne fixe. Par un choix adapté de la géométrie et des rapports d'engrènement, le pignon excentrique se trouve en position basse ou haute aux points morts bas permettant ainsi d'obtenir la détente prolongée.

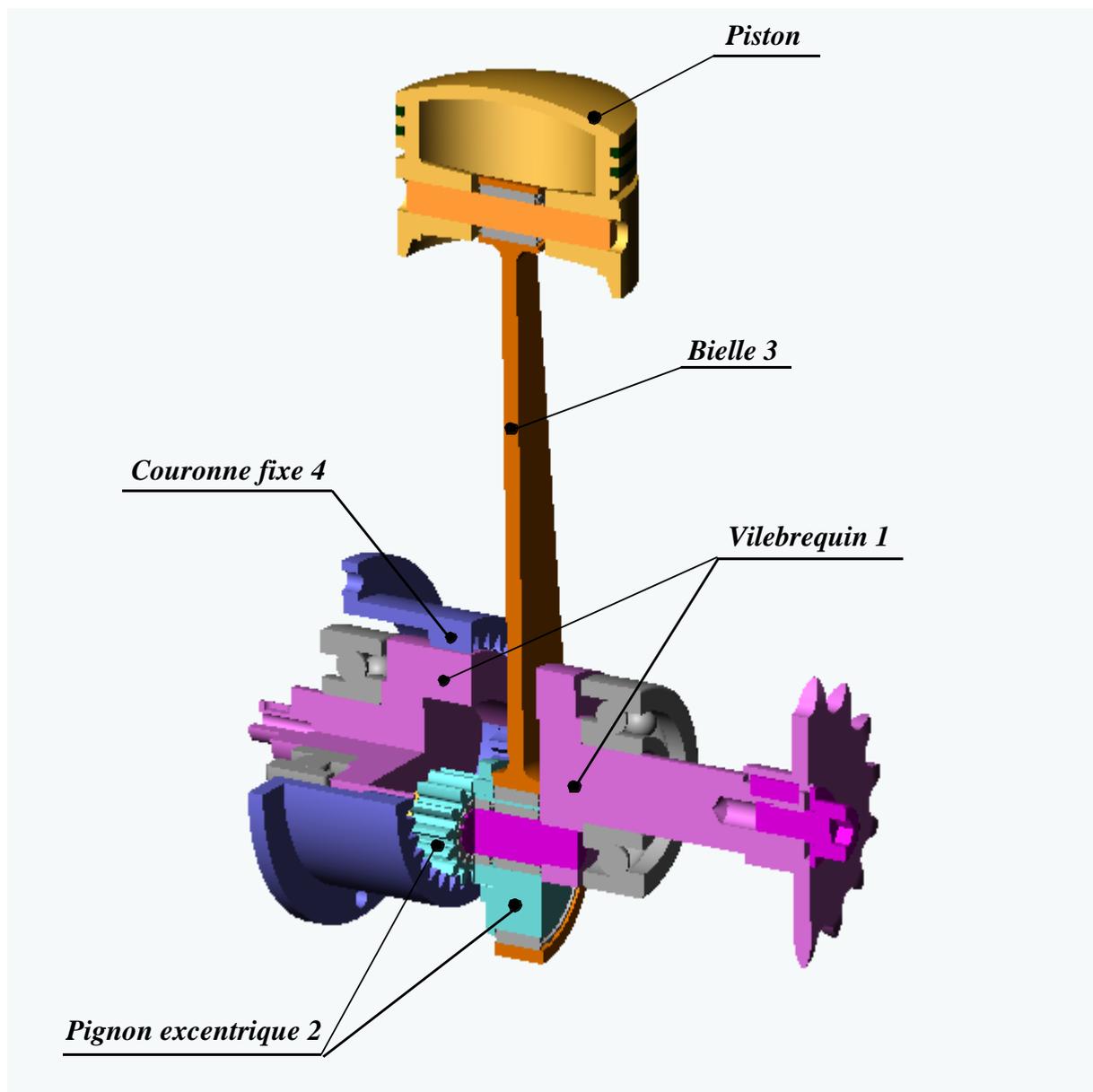
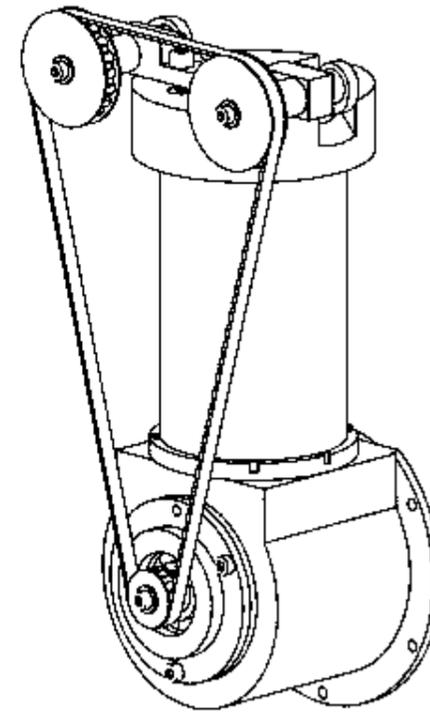
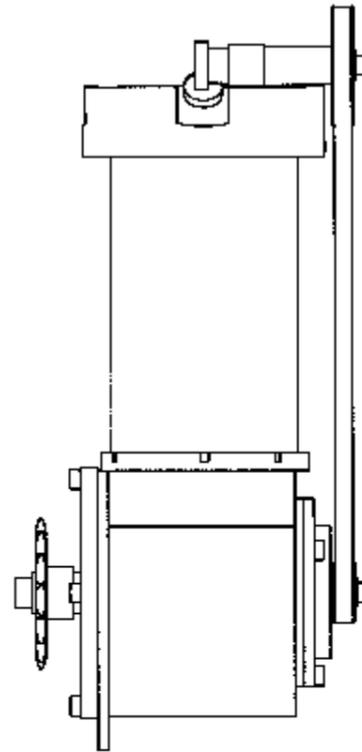
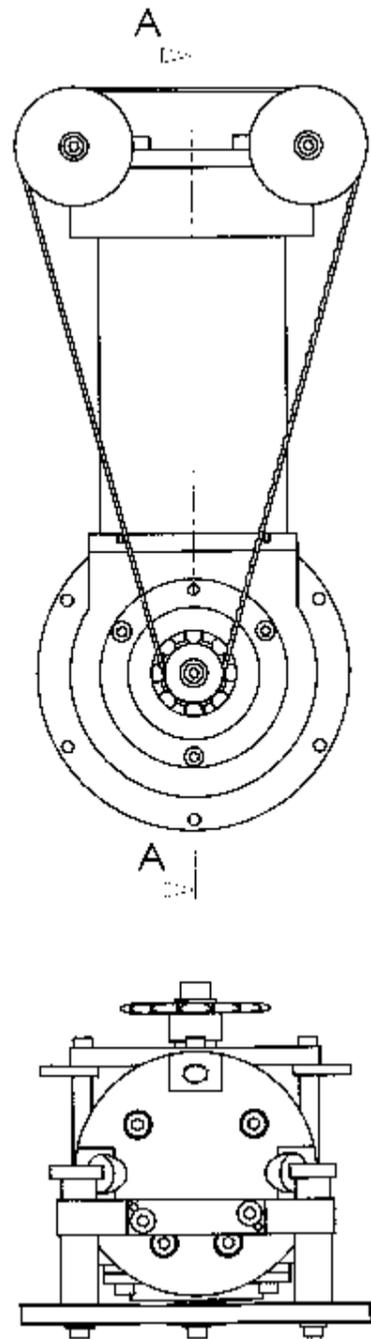
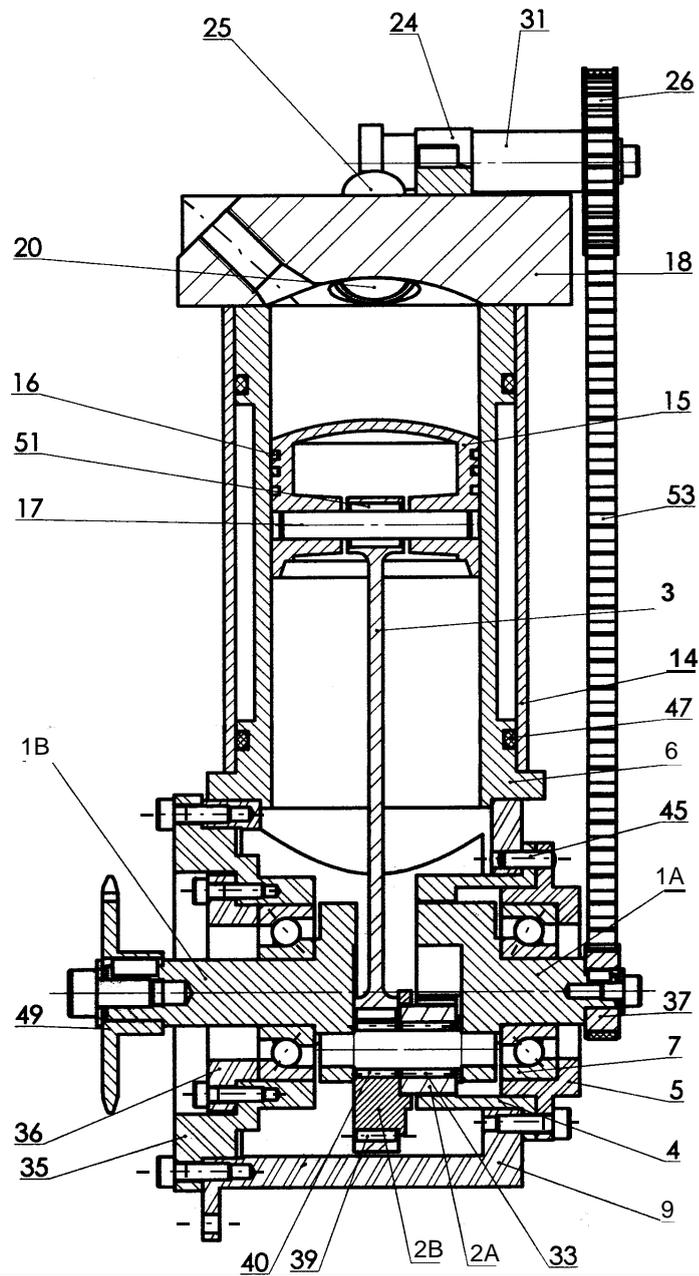


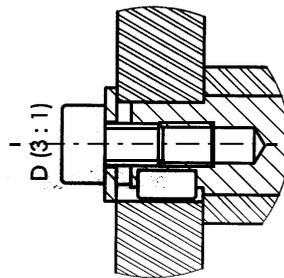
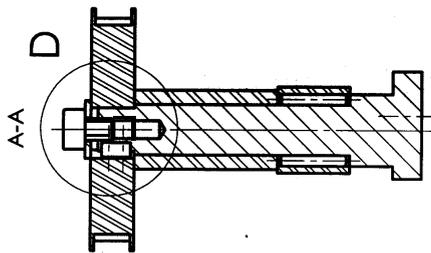
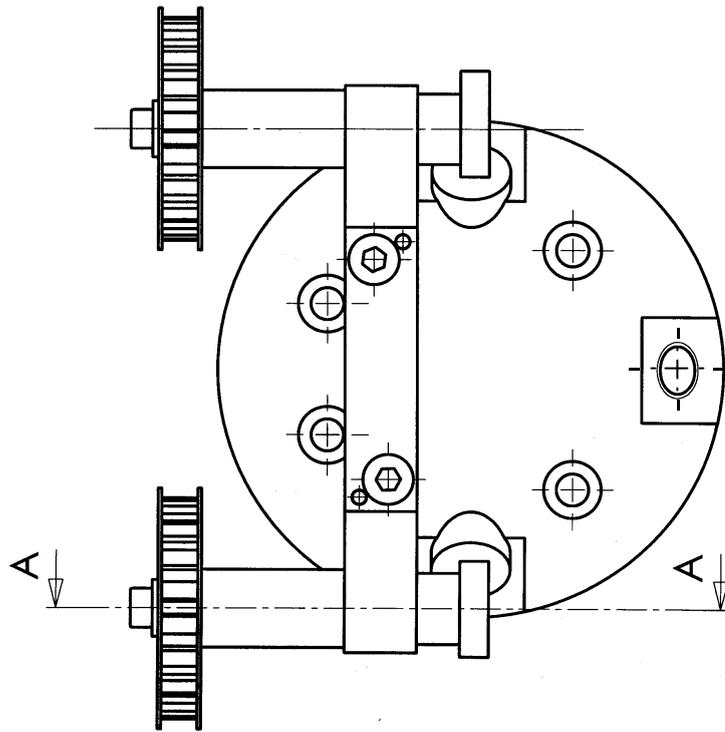
Figure N° 5 : Vue en perspective de l'équipage mobile.



*DOCUMENT TECHNIQUE DT1: MOTEUR A DÉTENTE PROLONGÉE : VUES EXTÉRIEURES*



**DOCUMENT TECHNIQUE DT2 : MOTEUR A DÉTENTE PROLONGÉE**  
**COUPE PRINCIPALE**



**DOCUMENT TECHNIQUE DT3 : MOTEUR A DÉTENTE PROLONGÉE  
CULASSE MONTÉE**

## Document Technique 4 (DT4)

### Nomenclature du moteur à détente prolongée (plan DT2).

*Nota : Les pièces non répertoriées dans la nomenclature ne présentent pas d'intérêt pour la compréhension du sujet.*

Repère	Quantité	Désignation
53	1	Courroie crantée
51	1	Cage à aiguilles
49	1	Pignon à chaîne Z=14
47	2	Joint torique
45	1	Goupille positionnement cylindrique
40	1	Cage à aiguilles
39	1	Cage à aiguilles
37	1	Poulie crantée Z=10
36	1	Couvercle gauche
35	1	Chapeau gauche
33	2	Cage à aiguilles
31	2	Entretoise
26	2	Poulie crantée Z=20
25	2	Came
24	1	Guide came
20	2	Soupape
18	1	Culasse
17	1	Axe de piston
16	2	Segment
15	1	Piston
14	1	Carter haut extérieur
9	1	Carter bas
7	2	Roulement à billes à contact oblique
6	1	Chemise
5	1	Couvercle droit
4	1	Couronne fixe à denture droite Z=35
3	1	Bielle
2B	1	Excentrique
2A	1	Pignon à denture droite Z= 14
1C	1	Axe de vilebrequin
1B	1	Vilebrequin gauche
1A	1	Vilebrequin droit