

BREVET DE TECHNICIEN SUPÉRIEUR

MOTEURS À COMBUSTION INTERNE

Session 2018

E 4 – TECHNOLOGIE MOTEUR

Durée : 4 heures – Coefficient : 4

Documents et matériels autorisés :

Aucun document autre que le sujet n'est autorisé.

Moyens de calculs autorisés :

L'usage de tout modèle de calculatrice, avec ou sans mode examen, est autorisé.

Dès que le sujet vous est remis, assurez-vous qu'il soit complet.

Le sujet comporte 16 pages numérotées de la façon suivante :

- Page de garde : page 1
- Dossier de présentation : pages 2 et 3
- Dossier d'étude : pages 4 à 8
- Dossier technique : DT1, DT2.1, DT2.2, DT2.3 et DT3 pages 9 à 13
- Dossier des documents réponse : DR1, DR2 et DR3 pages 14 à 16

Les candidats rédigeront les réponses aux questions posées sur feuilles de copie ou, lorsque cela est indiqué sur le sujet, sur les documents réponse prévus à cet effet.

Tous les documents réponse sont à remettre en un seul exemplaire en fin d'épreuve.

CODE ÉPREUVE : MO4TM		EXAMEN BREVET DE TECHNICIEN SUPÉRIEUR	SPÉCIALITÉ : MOTEURS À COMBUSTION INTERNE
SESSION : 2018	SUJET	ÉPREUVE : E4 – TECHNOLOGIE MOTEUR	
Durée : 4h	Coefficient : 4	SUJET N°02ED18	Pages 1/16

Présentation

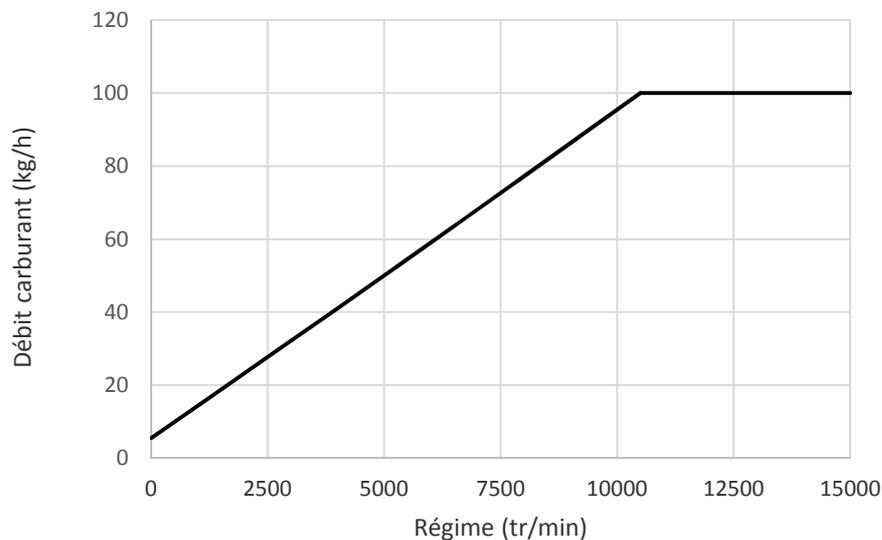
Un constructeur automobile développe une motorisation hybride pour la formule 1 en fonction d'une réglementation en vigueur depuis 2015.

Cette motorisation hybride regroupe un ensemble de six composants :

- Un groupe motopropulseur (moteur thermique et boîte de vitesses) ;
- Un moteur générateur électrique appelé **MGU-K** (Motor Generator Unit - Kinetic) accouplé mécaniquement à la transmission qui récupère une partie de l'énergie cinétique au freinage et la transforme en énergie électrique qui est stockée dans la batterie. Cette énergie électrique est ensuite utilisée sur les phases d'accélération ou de pleine charge ;
- Un moteur générateur électrique appelé **MGU-H** (Motor Generator Unit – Heat) accouplé au turbocompresseur qui récupère une partie de l'énergie thermique des gaz d'échappement transmis à la turbine du turbocompresseur. Cette énergie électrique est soit stockée dans la batterie soit utilisée directement par le MGU-K. À l'inverse la batterie peut alimenter le MGU-H pour augmenter rapidement le régime du turbocompresseur lors des accélérations ;
- Une batterie **ES** (Energy Store) pour stocker l'énergie électrique ;
- Un turbocompresseur ;
- Un système électronique qui gère l'ensemble des stratégies associées aux composants.



Une des particularités de ce règlement est de limiter le débit massique instantané de carburant à 100 kg/h à partir du régime de 10500 tr/min.



Objectif général :

Valider les choix de réglage et le dimensionnement d'une motorisation de Formule 1.

Lecture du sujet 20 minutes

L'étude comprend cinq parties indépendantes :

- **Première partie**, d'une durée conseillée de 15 min :
Analyse globale de la Formule 1.
- **Deuxième partie**, d'une durée conseillée de 40 min :
Comparaison du carburant de Formule 1 et du carburant sans plomb 95 du commerce (SP95).
- **Troisième partie**, d'une durée conseillée de 55 min :
Calcul des performances du moteur et de la puissance totale disponible.
- **Quatrième partie**, d'une durée conseillée de 55 min :
Choix de la pression de suralimentation.
- **Cinquième partie**, d'une durée conseillée de 55 min :
Étude de la distribution pneumatique.

1^{ère} partie

L'objectif de cette première partie est de réaliser l'analyse globale de la formule 1.

Pour ce faire on vous demande, après avoir pris connaissance de l'ensemble du sujet, de compléter le Document Réponse 1 (DR1) en répondant aux questions suivantes.

- 1.1- Quel est le nom du diagramme représenté sur le DR1 ?
- 1.2- Dans quel langage de modélisation est-il utilisé ?
- 1.3- Compléter les «block» relatifs aux id = « 1.2 » et id = « 1.3 » en mentionnant le nom de l'élément concerné dans la case prévue à cet effet.
- 1.4- Compléter le texte de l'id = « 1.1.3.1 ».
- 1.5- Compléter le « block » de l'id= «1.1.3.1 » en mentionnant le nom de l'élément concerné.

2^{ème} partie

Comparaison du carburant classique du commerce (SP95) et du carburant utilisé en Formule 1.

Les carburants utilisés en F1 doivent être proches de ceux du commerce. Toutefois des différences dans leur composition existent et l'objectif de cette partie est de les mettre en évidence par comparaison de leurs caractéristiques. **Le SP95 sera considéré comme carburant de référence.**

- 2.1- À partir du tableau donnant les caractéristiques des deux carburants, Document Technique 1 (DT1), exprimer le carburant de F1 sous la forme CH_y en déterminant la valeur de « y ».
- 2.2- ● Donner la définition du Pouvoir Combustible (PCO) (Phrase).
 - Écrire et équilibrer l'équation de combustion stœchiométrique pour le SP95.
 - Calculer le PCO du SP95.
- 2.3- Comparer les valeurs de PCO des deux carburants en calculant l'écart relatif en % puis conclure d'un point de vue motoriste (2 lignes).
- 2.4- Comparer les valeurs des PCI des deux carburants en calculant l'écart relatif en % puis conclure d'un point de vue motoriste (2 lignes).
- 2.5- Comparer les rapports PCI/PCO des deux carburants en calculant l'écart relatif en % puis conclure d'un point de vue motoriste (2 lignes).
- 2.6- Que représente l'indice d'octane d'un carburant (2 lignes) ?
- 2.7- En comparant les indices d'octane des deux carburants, justifier la nécessité d'utiliser un carburant spécifique en F1 d'un point de vue motoriste (5 lignes).

3^{ème} partie

L'objectif de cette troisième partie est de valider le choix de la richesse de fonctionnement de ce moteur compte tenu des contraintes réglementaires imposées sur le débit de carburant.

Contrairement à un moteur de compétition « classique » (sans limitation du débit de carburant), on se propose à travers la démarche de cette partie de justifier la valeur atypique de ce réglage puis d'en déduire le besoin en air du moteur qui imposera un choix de suralimentation.

Les données du Document Technique 1 (DT1) seront utilisées et tous les calculs se feront au régime de 10500 tr/min.

Relation débit massique carburant, puissance effective, couple effectif et pression moyenne effective

- 3.1- Écrire la relation entre le rendement effectif (η_e) et la consommation spécifique effective (C_{se}) en g.kWh⁻¹. Calculer la C_{se} en g.kWh⁻¹.
- 3.2- Écrire la relation entre la puissance effective (P_e) en kW et la C_{se} en g.kWh⁻¹. Calculer la P_e maximale en kW.
- 3.3- Écrire la relation entre le couple effectif (C_e) et la puissance effective. Calculer le C_e en N.m.
- 3.4- Écrire la relation entre la pression moyenne effective (P_{me}) et le couple effectif. Calculer la valeur de la P_{me} de ce moteur en bars.

Choix de la richesse et calcul du remplissage standard

À partir du Document Technique 1 (DT1), il faut justifier le choix de la richesse de ce cahier des charges. Pour cette justification, vous devez :

- 3.5- Écrire la relation du rendement effectif en fonction de la puissance effective et du débit de carburant. Préciser les unités des différents termes.

Pour avoir la puissance effective maximum, quel choix de rendement s'impose ?

- 3.6- Le constructeur a fait le choix d'une richesse de 0,75. Justifier ce choix pour ce point de fonctionnement.
- 3.7- Écrire la définition du remplissage en air standard (RAS) (phrase).
- 3.8- ● Calculer la valeur du RAS à partir de la relation générale de la P_{me} donnée ci-dessous. Les unités sont exigées pour le calcul final.
(Quelles que soient les valeurs calculées précédemment, utiliser les données du Document Technique 1)

$$P_{me} = \rho_{air\ st} \cdot RAS \cdot \mathfrak{K} \times (PCI / PCO) \cdot \eta_e$$

- Comparer cette valeur de remplissage à celle d'un moteur essence atmosphérique de milieu de gamme (2 lignes).

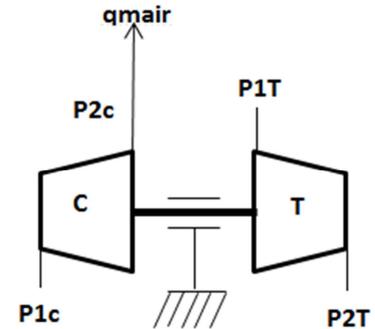
4^{ème} partie

Capacité du MGU-H au régime de 10500 tr/min et calcul de la puissance maximale de la chaîne de propulsion. (Document Technique 1 DT1)

L'objectif de cette quatrième partie est de vérifier la bonne adaptation du turbo compresseur au regard du besoin en air du moteur.

Pour calculer la puissance nécessaire au compresseur, on utilise la relation suivante :

$$\mathcal{P}_{\text{compresseur}} = [C_{p_{\text{air}}} \cdot \dot{m}_{\text{air}} \cdot (\pi_c^{(\gamma-1)/\gamma} - 1) \times T_{\text{air}}] / \eta_{\text{is.comp}}$$



- 4.1- Calculer le débit massique d'air (\dot{m}_{air}) en $\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$ à partir du débit massique de carburant en respectant le cahier des charges.
- 4.2- Calculer la masse d'air par cycle (m_{air}) en $\text{g}\cdot\text{cycle}^{-1}$ au régime de 10500 tr/min.
- 4.3- Calculer la masse volumique de l'air emprisonné dans les cylindres à partir de la masse d'air par cycle et du volume balayé par les pistons.
- 4.4- L'air qui rentre dans les cylindres est à la température $\theta_{\text{collecteur}}$ de 50°C. On suppose un rendement volumétrique de 1.
Calculer la pression de suralimentation absolue P_{2c} (exprimée en bars), à l'entrée des cylindres, à partir de la masse volumique trouvée précédemment.
- 4.5- Écrire la définition de C_p .
- 4.6- Donner la signification du terme π_c et le calculer.
- 4.7- Remplir sur le Document Réponse DR2 les 5 cases vierges en indiquant dans chacune le nom des différentes caractéristiques du champ compresseur.
- 4.8- Placer le point de fonctionnement dans le champ compresseur et en déduire son rendement isentropique ainsi que son régime de rotation.
Conclure sur la bonne adaptation du turbocompresseur (donner 3 critères au minimum).
- 4.9- Calculer la puissance nécessaire au compresseur $\mathcal{P}_{\text{compresseur}}$ en kW.

Estimation de la puissance récupérable

- 4.10- Sachant que la puissance récupérable à la turbine est de 150 kW et celle nécessaire au compresseur de 92 kW, calculer la puissance récupérable à l'entrée du MGU-H. On négligera les pertes mécaniques du compresseur.
- 4.11- La réglementation impose une limite de restitution au moteur électrique MGU-K de 4 MJ par tour de circuit avec une utilisation moyenne de 35 s.
La puissance effective est supposée égale à 465 kW.
Calculer la puissance totale $\mathcal{P}_{\text{totale}}$ des ensembles moteur thermique et électrique MGU-K.

5^{ème} partie

L'objectif de cette cinquième partie est de déterminer la pression P_0 dans la rampe d'accumulation d'azote du système de distribution pneumatique pour un régime moteur maximum autorisé de 15000 tr/min afin d'éviter l'affleurement de soupape.

Étude des mouvements de la soupape

Le Document Technique 3 (DT3), figure 1, nous donne les courbes réelles de levée, vitesse et accélération d'une soupape en fonction de l'angle de rotation de l'arbre à cames.

Pour simplifier l'étude, nous travaillerons sur les courbes simplifiées de levée, vitesse et d'accélération données sur le Document Technique 3, figure 2.

- 5.1- L'accélération est exprimée en mm/rad², déterminer l'expression de celle-ci en m/s² en fonction du régime arbre à cames N_{ac} , puis en fonction du régime moteur N_{mot} .
- 5.2- Faire l'application numérique pour l'accélération puis la décélération maximum au régime moteur maximum de 15000 tr/min.

Étude du ressort pneumatique (Documents Techniques 2.2 et 2.3)

- 5.3- Donner l'expression de la pression P_i dans la chambre en fonction de la levée x du piston, des diamètres de soupape (d), de chambre (D) et de la pression P_0 .
On considèrera la transformation adiabatique ($P \cdot V^\gamma = cte$)
- 5.4- En déduire l'expression de l'effort de pression exercé par l'azote sur le piston en fonction de la levée x du piston, des diamètres de soupape (d), de chambre (D) et de la pression P_0 .

Étude dynamique de la soupape (cf schéma cinématique du document DR3)

Hypothèses :

Liaison linguet/soupape supposée parfaite.

Action de la culasse négligée

Poids des pièces négligé

Masse de l'ensemble mobile (piston+soupape) non négligée : $M = 42 \text{ g}$

Quels que soient les résultats précédents, on donne :

$$F_{\text{azote/soupape+piston}} = 4,71 \cdot 10^{-4} \cdot \left(\frac{12 \cdot 10^{-6}}{12 \cdot 10^{-6} - 4,71 \cdot 10^{-4} \cdot x} \right)^{1,4} \cdot p_0$$

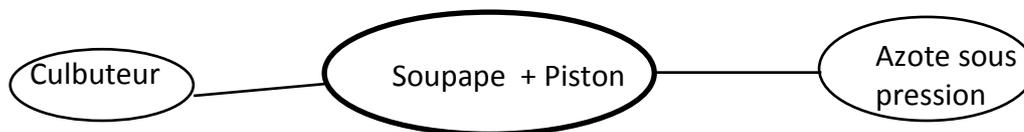
Effort F en N,

Levée x en m,

Pression P_0 en Pa

De plus accélération soupape : $A_1 = 34543 \text{ m/s}^2$
 décélération soupape : $A_2 = -15020 \text{ m/s}^2$

On isole la soupape + piston du ressort pneumatique



5.5- Faire le bilan des efforts extérieurs en présence puis représenter l'allure de ces forces sur le Document Réponse 3 (DR3).

5.6- Appliquer le principe fondamental de la dynamique, et plus précisément le théorème de la résultante dynamique, sur l'ensemble soupape+piston.

En déduire l'expression de la force $F_{\text{culbuteur/soupape+piston}}$.

5.7- Que se passe-t-il lorsqu'il y a affolement de soupape ?

Que devient l'expression de la question précédente ?

5.8- Préciser l'angle où l'affolement peut commencer à se produire ainsi que la levée x et l'accélération de soupape correspondantes. Pour cela, étudier la figure 2 du Document Technique 3.

5.9- Donner l'expression de la valeur minimum de la pression P_0 pour qu'il n'y ait pas de risque d'affolement.

5.10- Faire l'application numérique.

Document Technique 1 (DT1)

Données générales

Conditions d'essais standards :

- Pression atmosphérique : $P_{\text{air}} = 10^5 \text{ Pa}$
- Température de l'air d'admission : $\theta_{\text{air}} = 25^\circ\text{C}$ ou $T_{\text{air}} = 298 \text{ K}$
- Cp de l'air : $C_{p_{\text{air}}} = 1000 \text{ J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$
- Gamma de l'air : $\gamma = 1,4$
- Constante d'état de l'air : $r_{\text{air}} = 287 \text{ J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$
- Masse volumique de l'air standard : $\rho_{\text{air st}} = 1,17 \text{ kg.m}^{-3}$

Caractéristiques du moteur :

- Moteur 6 cylindres, 4 temps, suralimenté, injection directe
- Cylindrée totale : $V = 1,6 \text{ L}$
- Débit massique du carburant à partir de 10500 tr/min : $q_{\text{mcar}} = 100 \text{ kg/h}$
- Rendement effectif maxi pleine charge : $\eta_e = 0,38$ à 10500 tr/min
- Richesse de pleine charge de 9000 à 12000 tr/min: $\mathfrak{R} = 0,75$
- Pression absolue entrée compresseur : $P_{1C} = 1 \text{ bar}$
- Pression absolue de suralimentation en bars : $P_{2C} = 3,63 \text{ bars}$
- $P_{\text{me max}} = 33 \text{ bars}$

Caractéristiques de l'air :

- Composition de l'air, pour une mole d'air ($\text{O}_2 + 3.78\text{N}_2$)
- Masse atomique $\text{H}=1 \text{ g.mol}^{-1}$, $\text{C}= 12 \text{ g.mol}^{-1}$, $\text{N}=14 \text{ g.mol}^{-1}$, $\text{O}=16 \text{ g.mol}^{-1}$

Caractéristiques des carburants :

Carburant		F1	SP95	Unités
Nombre d'atomes	C	6,32		
Nombre d'atomes	H	12,9		
Nombre d'atomes	O	0		
	y		1,85	
Indice Octane	RON	102,5	95	SU
Indice Octane	MON	88	85	SU
Masse volumique	ρ_{carb}	730	745	g/dm^3
Pouvoir Calorifique Inférieur	PCI	43900	42900	J/g
Pouvoir Combustible	PCO	14,83		SU

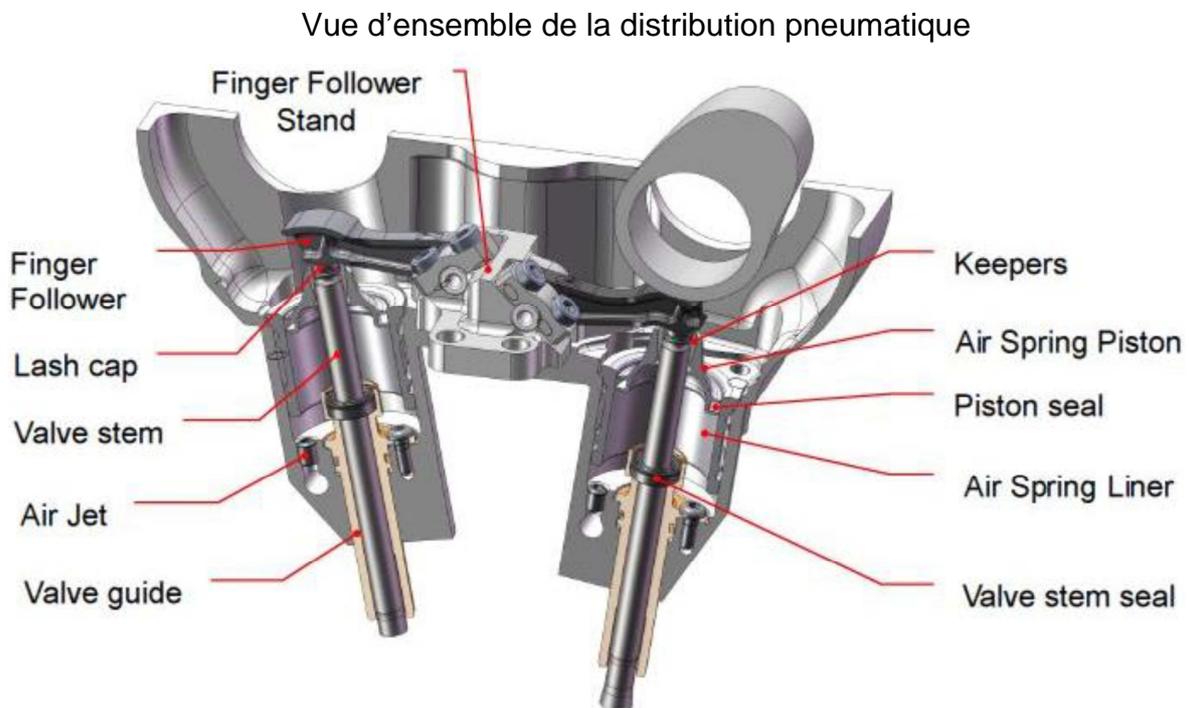
Document Technique 2.1 (DT2.1)

Le moteur objet de notre étude utilise une distribution pneumatique.

Avec cette solution, les motoristes se dispensent du ressort de rappel ou du couple de ressorts métalliques concentriques frottant l'un dans l'autre. Les ressorts étant sollicités en efforts alternés de manière continue, ils sont soumis à la fatigue qui réduit leur durée de vie.

Autre avantage, la sensible réduction de l'inertie par le gain de poids de la partie en mouvement de la distribution, ce qui permet, toutes proportions gardées, un gain en régime de rotation intéressant. De plus l'ensemble est plus léger qu'une distribution classique et ce dans la partie haute du moteur.

Par ailleurs, le rappel pneumatique des soupapes autorise une meilleure harmonisation des profils des lois de cames d'ouverture-fermeture des soupapes pour, en fait, obtenir de meilleures performances du moteur.



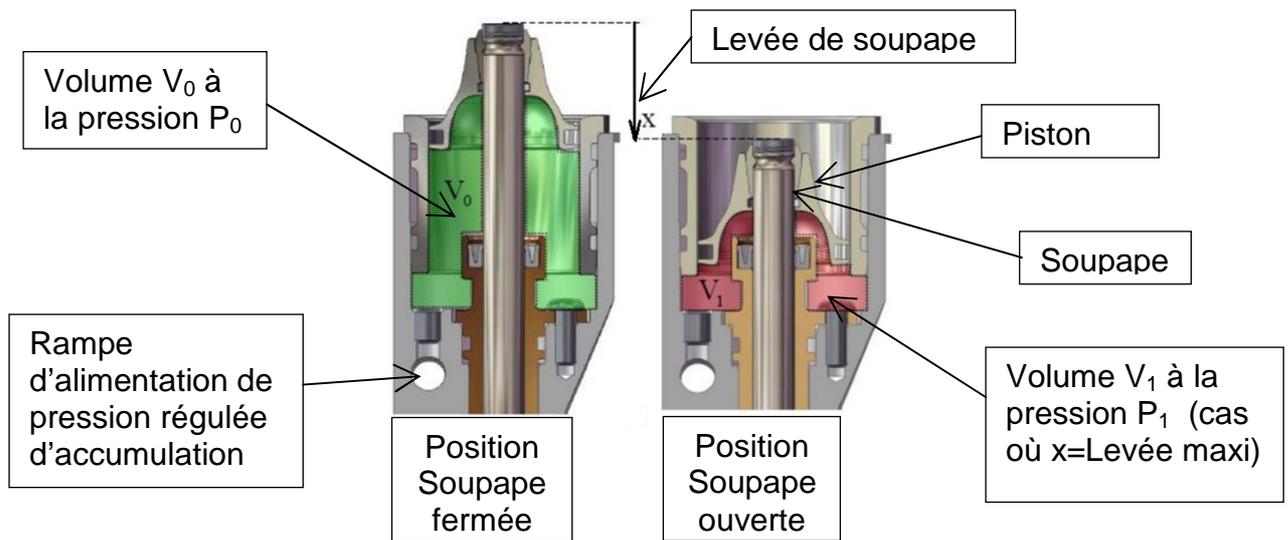
- Finger Follower Stand : Support de Linguet
- Finger Follower : Linguet
- Lash Cap : Grain
- Valve Stem : Queue de Soupape
- Air Jet : Trou d'Air
- Valve Stem Seal : Joint de Queue de Soupape

- Valve Guide : Guide de Soupape
- Keepers : Bicônes
- Air Spring Piston : Piston de Vérin
- Piston Seal : Joint de Piston
- Air Spring Liner : Chemise de Vérin

Document Technique 2.2 (DT2.2)

Dans le système de rappel pneumatique de la distribution, chaque soupape dispose de son ensemble propre de rappel pneumatique. Constitué d'un petit cylindre concentrique à l'axe de la soupape, il occupe la place du ressort hélicoïdal traditionnel. La fonction piston est assurée par la coupelle supérieure dont la périphérie reçoit un joint à lèvres qui permet l'étanchéité avec le cylindre.

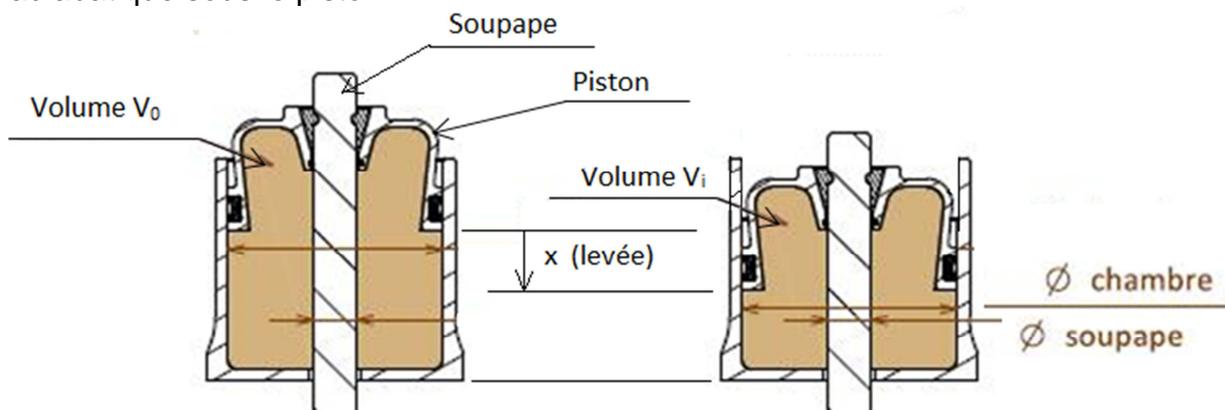
Le cylindre est alimenté en permanence en gaz à une basse pression P_0 régulée, dite d'accumulation, depuis une réserve haute pression.



Principe de fonctionnement du ressort pneumatique :

Soupape fermée, la pression sous le piston sera notée p_0 et correspond à la pression régulée en fonction du régime moteur dans la rampe d'accumulation.

Lors de la descente du piston (levée x de la soupape), la pression dans la chambre augmente car le volume passe de V_0 à V_1 . On considère que la transformation est adiabatique sous le piston.



Document Technique 2.3 (DT2.3)

Caractéristiques du ressort pneumatique :

Géométrie (soupape fermée)		Pression et température de fonctionnement du gaz (azote) dans la chambre (soupape fermée)	
Volume de gaz total dans la chambre (soupape fermée)	$V_0 = 12 \text{ cm}^3$	Pression (pression régulée)	$P_0 ?$ (inconnue à déterminer à la fin de l'étude)
Øchambre : (Diamètre de la chemise du ressort pneumatique)	$D = 25 \text{ mm}$	Température du gaz	$T_0 = 90^\circ\text{C}$
Øsoupape (Diamètre de la queue de soupape)	$d = 5 \text{ mm}$	Constante thermodynamique « r » du gaz présent dans la chambre	$r = 287 \text{ J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$
Masse des pièces mobiles en translation (piston +soupape)	$M = 42\text{g}$	Gamma de l'azote	$\gamma = 1,4$

Document Technique 3 (DT3)

Figure 1 : Courbes réelles mesurées d'accélération par unité d'angle (mm/rad^2), de vitesse par unité d'angle (mm/rad) et de levée de la soupape (mm), en fonction de l'angle arbre à cames.

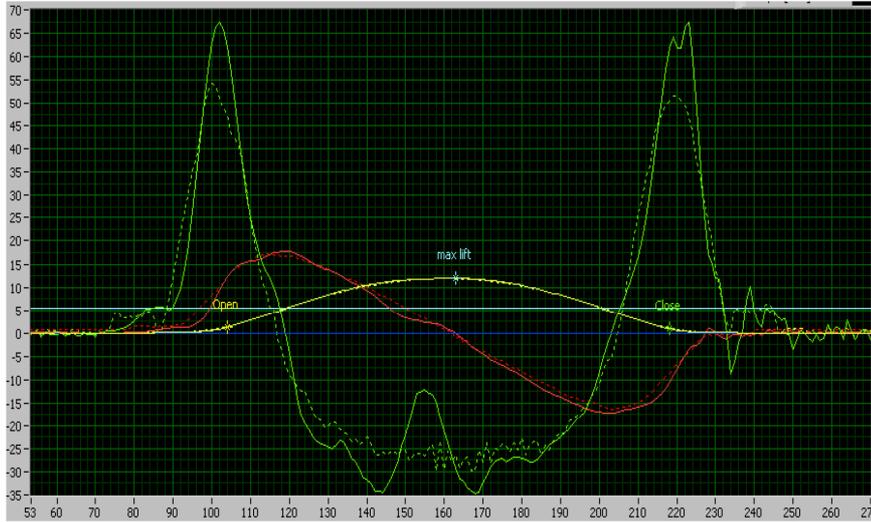
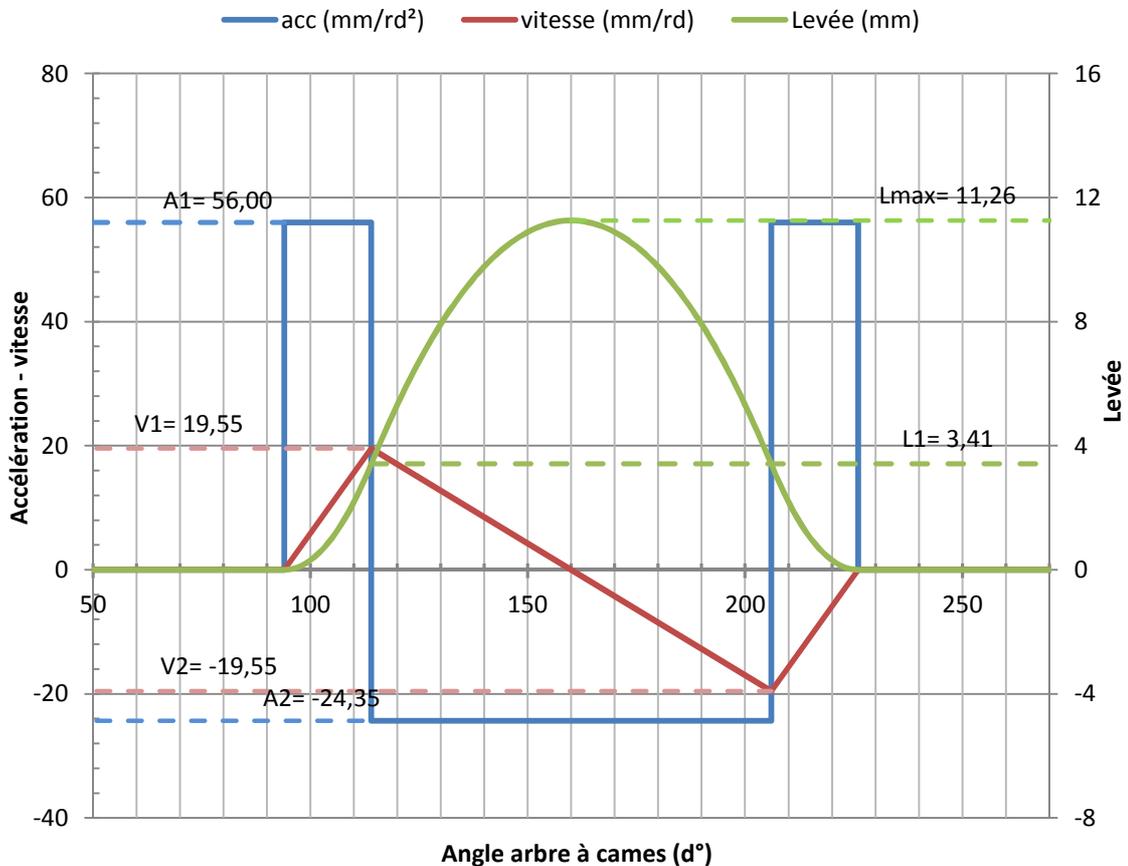
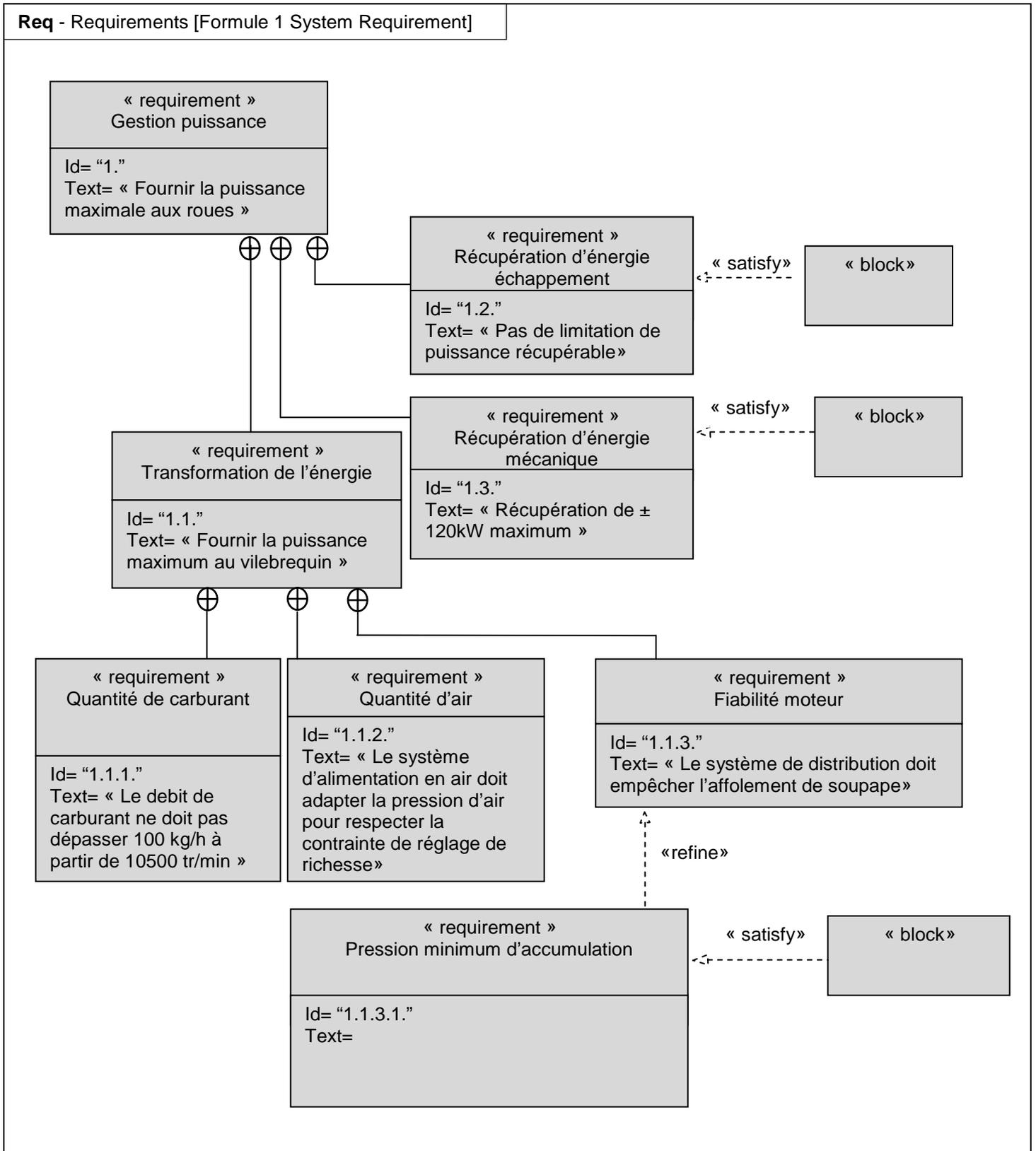


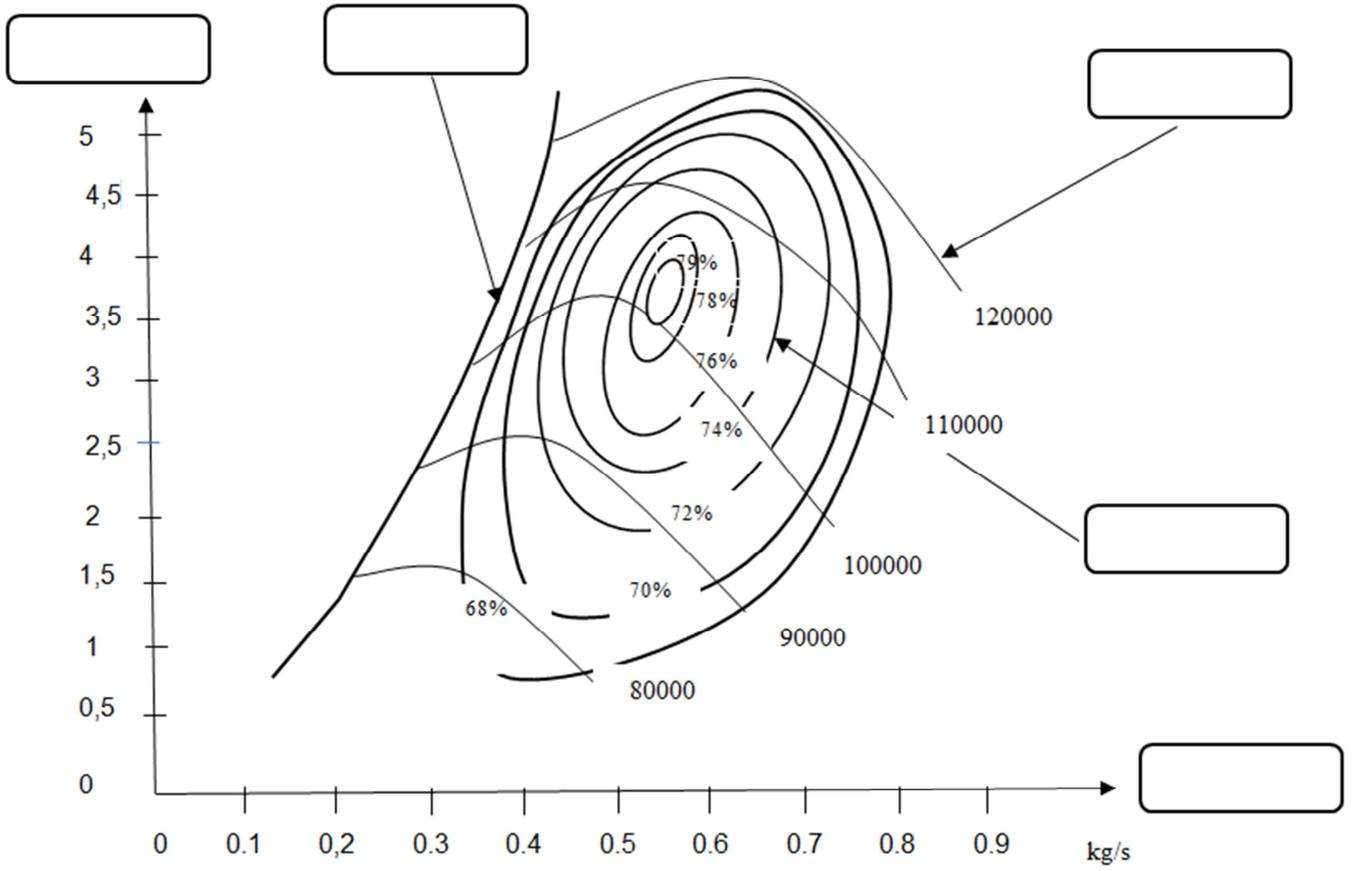
Figure 2 : Courbes simplifiées d'accélération par unité d'angle (mm/rad^2), de vitesse par unité d'angle (mm/rad) et de levée de la soupape (mm), en fonction de l'angle arbre à cames.



Document Réponse 1 (DR1)



Document Réponse 2 (DR2)



Document Réponse 3 (DR3)

