

BREVET DE TECHNICIEN SUPÉRIEUR
MOTEURS À COMBUSTION INTERNE
SESSION 2018

E 4 – TECHNOLOGIE MOTEUR

Durée : 4 heures – Coefficient : 4

Éléments de Correction

CODE ÉPREUVE : MO4TM		EXAMEN BREVET DE TECHNICIEN SUPÉRIEUR	SPÉCIALITÉ : MOTEURS À COMBUSTION INTERNE
SESSION : 2018	CORRIGE	ÉPREUVE : E4 – TECHNOLOGIE MOTEUR	
Durée : 4h	Coefficient : 4	Corrigé N°02ED18	13 pages

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 ?

Diagramme des exigences ou requirement

1.2- Dans quel langage de modélisation est-il utilisé ?

Langage SYSML (Langage de modélisation des systèmes)

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.

Cf DR1

1.4- Compléter le texte de l'id = « 1.1.3.1 ».

Cf DR1

1.5- Compléter le « block » de l'id = « 1.1.3.1 » en mentionnant le nom de l'élément concerné.

Cf DR1

2^{ème} partie

Comparaison d'un carburant classique du commerce (SP95) et d'un 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 la référence.**

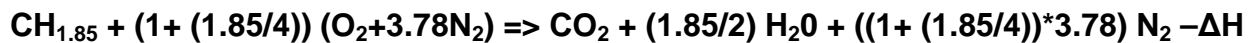
2.1- À partir du tableau donnant les caractéristiques des deux carburants, Document Technique 1 (DT1), exprimer le carburant de F1 sous la forme CH_y en déterminant la valeur de « y ».

CH_{12.9/6.32} soit CH_{2.04}

2.2- Donner la définition du Pouvoir Combustible (PCO) (Phrase).

C'est la masse d'air en gramme nécessaire pour brûler en combustion complète un gramme de carburant avec de l'air comme comburant.

Ecrire et équilibrer l'équation de combustion stœchiométrique pour le SP95.



Calculer le PCO du SP95.

$$\text{PCO} = (1 + (1.85/4)) (\text{MO}_2 + 3.78 \text{MN}_2) / (\text{MC} + 1.85 \text{MH}) = 14.55$$

2.3- Comparer les valeurs de PCO des deux carburants en calculant l'écart relatif puis conclure d'un point de vue motoriste (2 lignes).

$$\Delta\text{PCO} = (14.83 - 14.55) / 14.55 = 0.0192 \text{ soit } 1.92\%$$

Le PCO du SP95 est inférieur à celui du carburant de F1, ce qui signifie qu'à iso masse d'air, on introduit une masse de carburant plus importante de 1.92% avec le SP95.

2.4- Comparer les valeurs des PCI des deux carburants en calculant l'écart relatif puis conclure d'un point de vue motoriste (2 lignes).

$$\Delta\text{PCI} = (43900 - 42900) / 42900 = 0.0233 \text{ soit } 2.33\%$$

Le PCI du carburant de F1 est plus élevé que celui du SP95 ce qui signifie que pour une même masse de carburant introduite on augmente de 2.33% l'énergie introduite.

2.5- Comparer les rapports PCI/PCO des deux carburants en calculant l'écart relatif puis conclure d'un point de vue motoriste (2 lignes).

$$\text{PCI/PCO}_{\text{SP95}} = 42900 / 14.55 = 2948$$

$$\text{PCI/PCO}_{\text{F1}} = 43900 / 14.83 = 2960$$

$$\Delta\text{PCI/PCO} = (2960 - 2948) / 2948 = 0.004 \text{ soit } 0.4\%$$

Au final le carburant de F1 permet une augmentation de seulement 0.4% de l'énergie introduite.

2.6- Que représente l'indice d'octane d'un carburant ? (2 lignes)

L'indice d'octane représente le pouvoir anti détonant du carburant. Plus l'indice d'octane est élevé plus le carburant résiste au phénomène de cliquetis.

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).

Le carburant de F1 présente un indice d'octane nettement plus élevé que le SP95. Cela signifie que le délai d'auto inflammation des gaz frais dans la chambre de combustion sera plus long et permettra ainsi au front de flamme de les brûler avant la fin de leur DAI. En repoussant la limite cliquetis, le réglage d'avance à l'allumage en pleine charge se rapproche de l'avance optimale de travail maximum.

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 au moteur de compétition « classique » (sans limitation du débit de carburant), on se propose à travers la démarche de cette partie de justifier de 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 carburant de F1 seront utilisées et tous les calculs se feront au régime de 10500 tr/min (DT1).

Relation débit massique carburant, puissance effective, couple effectif et PME :

3.1- Ecrire la relation entre le rendement effectif (η_e) et la consommation spécifique effective (Cse) en g.kWh⁻¹.

$$Cse = 3600.10^3 / (\eta_e * PCI)$$

Calculer la Cse en g.kWh⁻¹.

$$Cse = 3600.10^3 / (0.38 * 43900) \quad Cse = 215.8 \text{ g/kWh}$$

3.2 - Ecrire la relation entre la puissance effective (\mathcal{P}_e) en kW et la Cse en g.kWh⁻¹.

$$\mathcal{P}_e = qmc * 10^3 / Cse$$

Calculer la \mathcal{P}_e maximale en kW.

$$\mathcal{P}_e = 100 * 10^3 / 215.8 \quad \mathcal{P}_e = 463.4 \text{ kW}$$

3.3 – Ecrire la relation entre le couple effectif (Ce) et la puissance effective.

$$Ce = (60 * \mathcal{P}_e) / (2\pi N) \quad \text{avec } \mathcal{P}_e \text{ en W}$$

Calculer le Ce en N.m.

$$Ce = (60 * 463400) / (2\pi * 10500) \quad Ce = 421 \text{ Nm}$$

3.4 - Ecrire la relation entre la pression moyenne effective (Pme) et le couple effectif. Retrouver la valeur de la Pme de ce moteur en bars.

$$Pme = (Ce * 4\pi) / V$$

$$AN : \quad Pme = (421 * 4\pi) * 10^{-5} / 1.6 * 10^{-3} \quad Pme = 33.1 \text{ bars}$$

Choix de la richesse et calcul du remplissage standard.

A partir du document technique 1, il faut justifier le choix de la richesse pour ce cahier des charges. Pour cette justification, vous devez:

3.5 - Ecrire la définition du rendement effectif en fonction de la puissance effective et du débit de carburant en mettant les unités.

$$\eta_e = \mathcal{P}_e / \mathcal{P}_c = \mathcal{P}_e / (q_{mc} \cdot PCI) \quad \text{avec } \mathcal{P}_e \text{ en W, } q_{mc} \text{ en g.s}^{-1} \text{ et PCI en J.g}^{-1}$$

3.6 - En déduire le choix du rendement puis celui de la richesse (\mathfrak{R}) puis donner un argument qui justifie cette valeur de richesse.

Le PCI étant constant, si le q_{mc} est constant à partir de 10500 tr/min alors

$\eta_e = \mathcal{P}_e / cste$, pour obtenir la \mathcal{P}_e maximale il faut que le η_e soit maximum.

Il faut choisir la richesse de rendement de combustion maximum (richesse correspondant à la plus grande tangente à la courbe de puissance introduite passant par l'origine). Cette richesse est située en mélange pauvre à une valeur d'environ 0.85 pour les moteurs conventionnels.

3.7 - Écrire la définition du remplissage en air standard (RAS) (phrase).

C'est le rapport de la masse d'air réelle admise sur un cycle sur la masse d'air qui occuperait le volume de la cylindrée dans les conditions de pression et température standards ($P_{air} = 10^5 Pa$ et $T_{air} = 25^\circ C$).

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.

Utilisez les données du Document Technique 1 quelles que soient les valeurs trouvées précédemment. $P_{me} = \rho_{air \text{ st}} \cdot RAS \cdot \mathfrak{R} \times (PCI / PCO) \cdot \eta_e$

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

$$RAS = (33.1 \cdot 10^5 \cdot 14.8 \cdot 10^3) / (1.17 \cdot 0.75 \cdot 43900 \cdot 0.38) \quad RAS = 3.35$$

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

Le remplissage d'un moteur atmosphérique de milieu de gamme pleine charge est compris entre 0.9 et 1, ce qui signifie que le remplissage est environ 3.5 fois plus élevé avec la suralimentation.

4^{ème} partie

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

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

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

$$P_{\text{compresseur}} = [C_{p_{\text{air}}} \times q_{m_{\text{air}}} \times (\pi_c^{(\gamma-1)/\gamma} - 1) \times T_{\text{air}}] / \eta_{\text{is.comp}}$$

4.1 - Calculer le débit massique d'air ($q_{m_{\text{air}}}$) en kg.s^{-1} à partir du débit massique de carburant en respectant le cahier des charges.

$$q_{m_{\text{air}}} = q_{m_c} \cdot \text{PCO} / (\mathfrak{K} \cdot 3600)$$

$$q_{m_{\text{air}}} = 100 \cdot 14,8 / (0,75 \cdot 3600) \quad q_{m_{\text{air}}} = 0,548 \text{ kg.s}^{-1}$$

4.2 - Calculer la masse d'air par cycle (m_{air}) en g.cycle^{-1} au régime de 10500 tr/min.

$$m_{\text{air}} = q_{m_{\text{air}}} \cdot 10^3 \cdot 60 / N$$

$$m_{\text{air}} = 0,548 \cdot 1000 \cdot 120 / 10500 \quad m_{\text{air}} = 6,26 \text{ g.cycle}^{-1}$$

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.

$$\rho_{\text{air}} = m_{\text{air}} / V_{\text{air}}$$

$$\rho_{\text{air}} = 6,26 / 1,6 \quad \rho_{\text{air}} = 3,91 \text{ g.dm}^3$$

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.

$$\rho_{\text{air}} = P_{\text{col}} / (r_{\text{air}} \cdot T_{\text{col}}) \quad P_{\text{col}} = \rho_{\text{air}} \cdot r_{\text{air}} \cdot T_{\text{col}}$$

$$P_{\text{col}} = 3,91 \cdot 287 \cdot (273,15 + 50) \quad P_{\text{col}} = 3,63 \cdot 10^5 \text{ Pa} \quad \text{soit} \quad 3.63 \text{ bars}$$

4.5 - Ecrire la définition du C_p .

C'est la quantité de chaleur en Joules nécessaire pour élever la température d'un kilogramme d'air de un degré.

4.6 - Donner la signification de terme π_c et le calculer.

π_c représente le rapport de pression P_{2c}/P_{1c} .

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).

Rendement isentropique compresseur = 0,79

N turbo = 100000 tr/min

Le turbo est adapté car :

- **Le point de fonctionnement se situe dans la zone du rendement isentropique optimum ;**
- **La marge à la limite de pompage est importante**
- **Le régime maximum du turbo n'est pas atteint**

4.9 - Calculer la puissance nécessaire au compresseur $\mathcal{P}_{\text{compresseur}}$ en kW.

$$\mathcal{P}_{\text{compresseur}} = (1000 * 0,548 * (3,63^{((1,4-1)/1,4)} - 1) * (273,15 + 25)) / 0,79$$

$$\mathcal{P}_{\text{compresseur}} = 92100 \text{ W soit } 92,1 \text{ kW}$$

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.

$$\mathcal{P}_{\text{récupérable MGU-H}} = \mathcal{P}_{\text{récupérable turbine}} - \mathcal{P}_{\text{compresseur}}$$

$$\mathcal{P}_{\text{récupérable MGU-H}} = 150 - 92 = 58 \text{ kW}$$

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.

Calculer la puissance totale $\mathcal{P}_{\text{totale}}$ des ensembles moteur thermique et électrique MGU-K.

$$\mathcal{P}_{\text{totale}} = \mathcal{P}_e + \mathcal{P}_{\text{MGU-K}} = 463,4 + 4000/35$$

$$\mathcal{P}_{\text{totale}} = 578 \text{ kW}$$

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 au régime moteur maximum autorisé de 15000 tr/min afin d'éviter l'affolement de soupape.

Etude 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} .

$$A_{m/s^2} = A_{mm/rad^2} \cdot \left(\frac{2 \cdot \pi \cdot N_{ac}}{60} \right)^2 \cdot 10^{-3} = A_{m/s^2} = A_{mm/rad^2} \cdot \left(\frac{\pi \cdot N_m}{60} \right)^2 \cdot 10^{-3}$$

5.2- Faire l'application numérique pour l'accélération puis la décélération maximum au régime moteur maximum de 15000 tr/min.

$$\text{Accélération maximum : } A_{1m/s^2} = 56 \cdot \left(\frac{\pi \cdot 15000}{60} \right)^2 \cdot 10^{-3} = 34544 \text{ m/s}^2$$

$$\text{Décélération maximum : } A_{2m/s^2} = -24,35 \cdot \left(\frac{\pi \cdot 15000}{60} \right)^2 \cdot 10^{-3} = -15020 \text{ m/s}^2$$

Etude du ressort pneumatique (Document Technique 2.2)

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 ($P \cdot V^\gamma = cte$)

$$p_0 \cdot V_0^\gamma = p_i \cdot V_i^\gamma \quad \text{Soit } p_i = p_0 \cdot \left(\frac{V_0}{V_i} \right)^\gamma \quad \text{avec } V_i = V_0 - S \cdot x \quad \text{et } S = \pi \cdot \frac{(D^2 - d^2)}{4}$$

$$\text{On a donc : } p_i = p_0 \cdot \left(\frac{V_0}{V_0 - 0,25 \cdot \pi \cdot (D^2 - d^2) \cdot x} \right)^\gamma$$

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 .

$$F_{azote/soupape+piston} = S \cdot p_i = \pi \cdot \frac{(D^2 - d^2)}{4} \cdot p_0 \cdot \left(\frac{V_0}{V_0 - 0,25 \cdot \pi \cdot (D^2 - d^2) \cdot x} \right)^\gamma$$

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

Hypothèses :

Liaison culbuteur/soupape supposée parfaite.

Poids des pièces négligés

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

Quels que soient les résultats précédents, on donne :

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

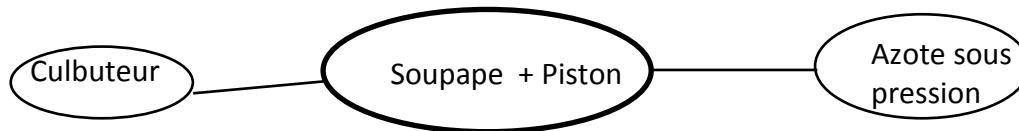
Effort F en N,

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 - Donner l'expression de chaque effort en présence

- **Action de l'azote sous pression sur l'ensemble soupape+piston**

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

- **Action du culbuteur sur l'ensemble soupape+piston**

$$\overrightarrow{F_{\text{culbuteur/soupape+piston}}} = F_{\text{culbuteur/soupape+piston}} \cdot \vec{x}$$

Et Représenter ces forces sur le document réponse 3 (DR3)

Cf DR3

5.6- Appliquer le principe fondamental de la dynamique sur l'ensemble soupape+piston. En déduire l'expression de la force $F_{\text{culbuteur/soupape+piston}}$ en fonction des autres paramètres.

Théorème de la résultante dynamique :

$$\overrightarrow{F_{\text{azote/soupape+piston}}} + \overrightarrow{F_{\text{culbuteur/soupape+piston}}} = M \cdot \vec{A}$$

Soit en projection sur l'axe x :

$$-F_{azote/soupape+piston} + F_{culbuteur/soupape+piston} = M.A$$

On a donc: $F_{culbuteur/soupape+piston} = M.A + F_{azote/soupape+piston}$

5.7 - Que se passe t-il lorsqu'il y a affolement de soupape. Que devient l'expression précédente ?

Il n'y a plus de contact entre culbuteur et l'ensemble soupape + piston, donc l'effort $F_{culbuteur/soupape+piston} = 0$

Dans ce cas $M.A + F_{azote/soupape+piston} = 0$

5.8- Préciser l'angle où l'affolement peut commencer à se produire ainsi que la levée x et l'accélération de soupape correspondantes.

Ceci n'est possible que si l'accélération A de la soupape est négative, soit au début de la phase de décélération (juste après la vitesse maxi pour la levée L1 de la soupape). Angle de 113°, x= L1= 3,41 mm ; $A_2 = -15020 \text{ m/s}^2$

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.

Dans ce cas $M.A + F_{azote/soupape+piston} = 0$ donc $F_{azote/soupape+piston} = -M.A_2$

$$\text{D'où : } 4,71.10^{-4} \cdot \left(\frac{12.10^{-6}}{12.10^{-6} - 4,71.10^{-4}.x} \right)^{1,4} p_0 = -M.A_2$$

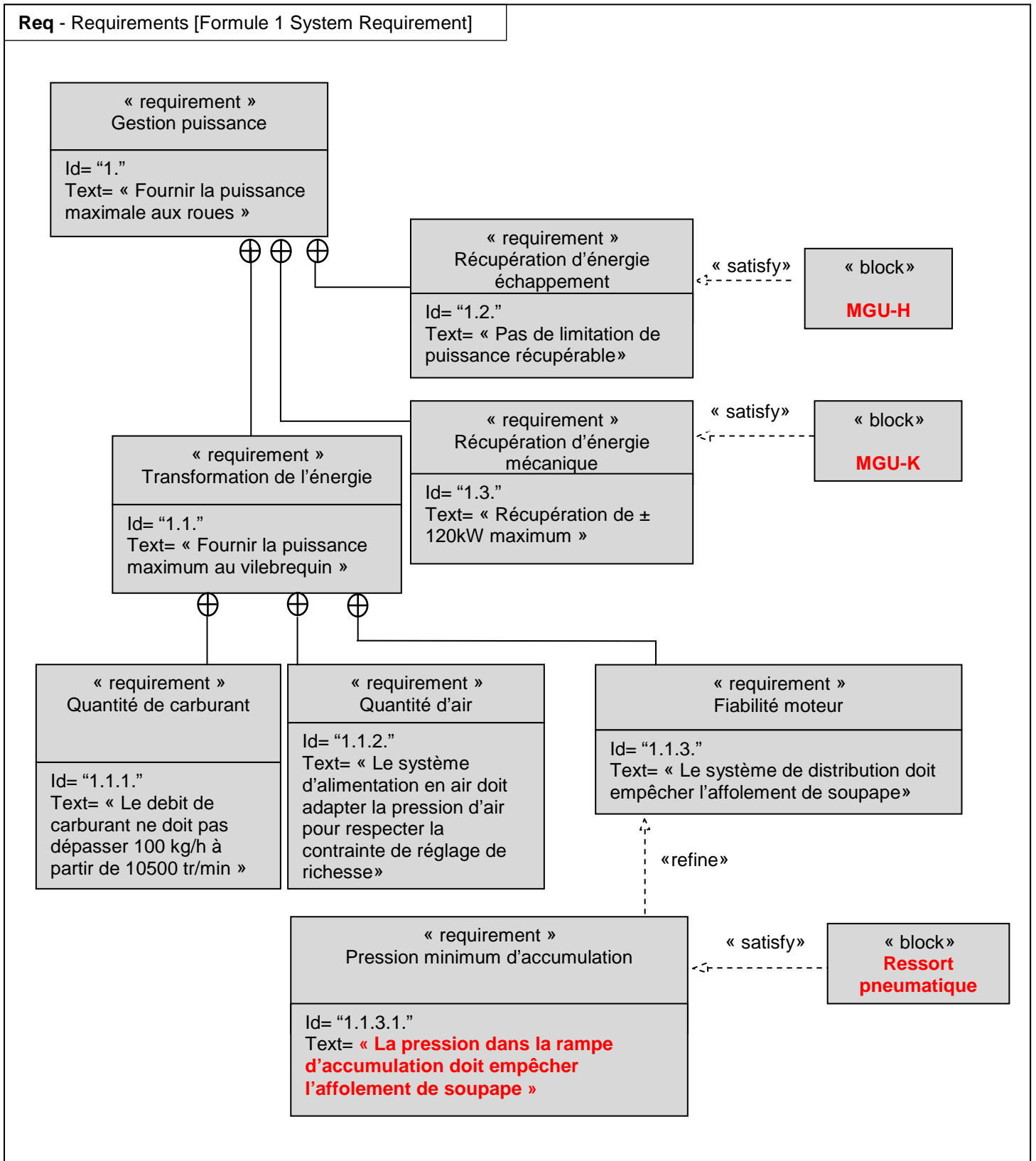
Avec : x= L1= 3,41.10⁻³ mm, M=42.10⁻³ kg et A₂= - 15020 m/s²

$$\text{Soit } p_0 = \frac{-M.A_2}{4,71.10^{-4}} \cdot \left(\frac{12.10^{-6} - 4,71.10^{-4}.x}{12.10^{-6}} \right)^{1,4}$$

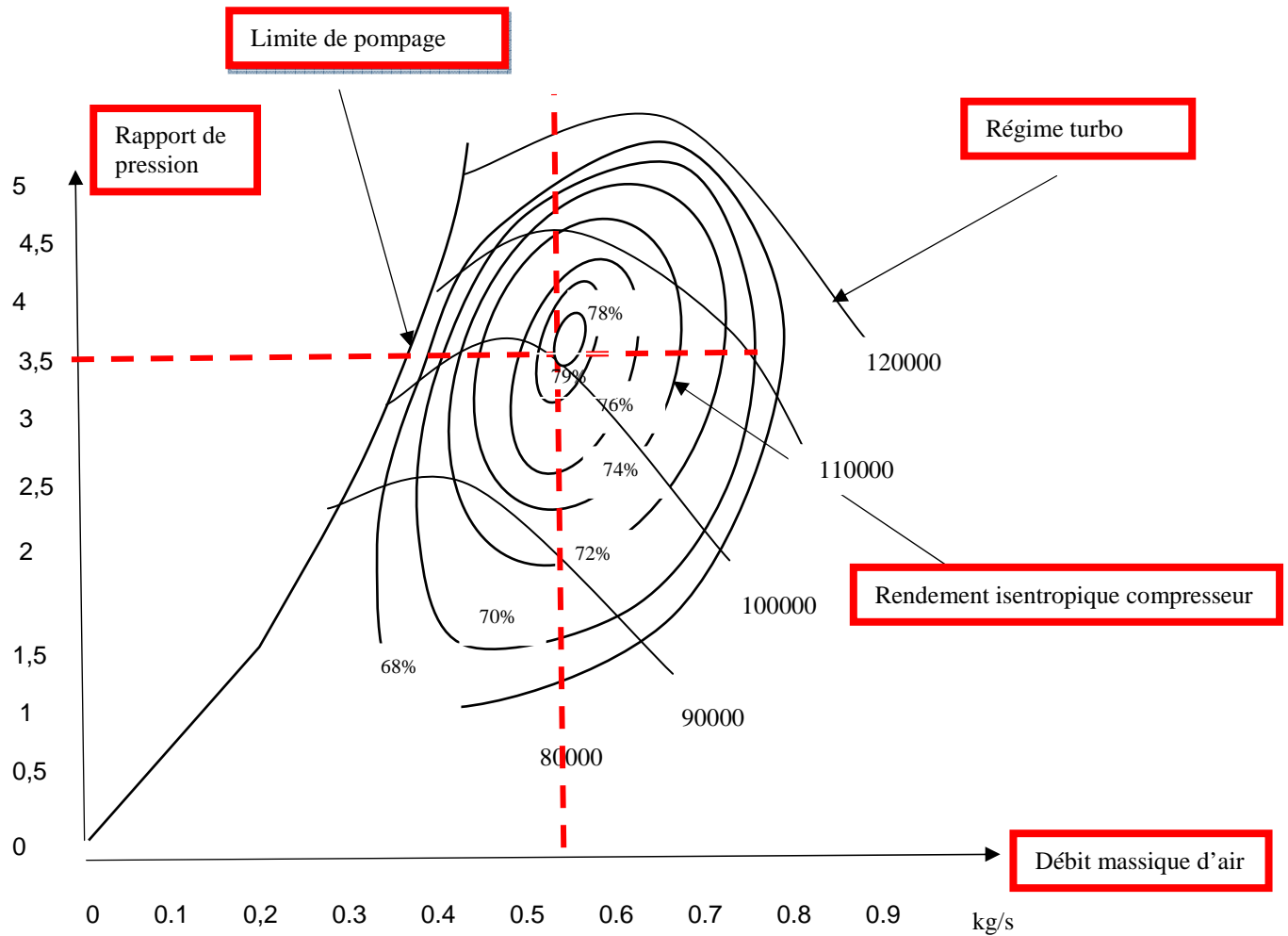
5.10 - Faire l'application numérique.

$$p_0 = \frac{42.10^{-3}.15020}{4,71.10^{-4}} \cdot \left(\frac{12.10^{-6} - 4,71.10^{-4}.3,41.10^{-3}}{12.10^{-6}} \right)^{1,4} = 1095302 \text{ Pa soit } 10,9 \text{ bars.}$$

Document Réponse 1 (DR1)



Document Réponse 2 (DR2)



Document Réponse 3 (DR3)

