

Examen : Brevet de Technicien Supérieur	Session : 2004
Spécialité : Maintenance et Après-Vente Automobile	Code : MAVPM
Epreuve : U4 Vérification des performances d'un mécanisme	NOTE

A lire aux candidats en début d'épreuve

Mardi 25 mai 2004, à 9h00

Epreuve U4

Page 2/16

En bas de la page, dans le tableau :

En face Cylindrée (cm³) lire : 1998 (au lieu de V = 1998)

PREMIER THEME : MOTEUR HPI A INJECTION DIRECTE ESSENCE**A - PRINCIPE DE L'INJECTION DIRECTE HPI**

Dans un système à injection directe, le carburant est directement injecté sur la tête des pistons qui a une forme particulière.

L'injection est réalisée à très haute pression grâce à une rampe d'injection commune aux injecteurs électromagnétiques.

La pression d'injection peut atteindre les valeurs suivantes :

- 100 bars (pression maxi),
- 70 bars au ralenti,
- 30 bars en régime transitoire.

Le moteur HPi utilise deux modes de fonctionnement :

1 Fonctionnement à mélange air/essence très pauvre et stratifié :

Ce mode de fonctionnement est utilisé lorsque les performances demandées par le conducteur sont faibles (richesse moyenne entre 0,2 et 0,6 ou excès d'air 1,7 à 5).

La combustion est effectuée avec un excès d'air (mélange pauvre).

Le papillon motorisé est ouvert au maximum, indépendamment de la position de la pédale d'accélérateur. La vanne EGR est commandée, on recycle une partie des gaz brûlés.

La charge moteur est alors commandée par le temps d'injection (masse de carburant admise dans les cylindres).

L'injection du carburant s'effectue en fin de phase compression, juste avant l'allumage, de sorte qu'une partie de la faible quantité d'essence injectée n'ait pas le temps de se vaporiser totalement dans le cylindre. Ainsi on obtient à proximité de la bougie, une zone de mélange suffisamment riche pour initier la combustion lors de l'allumage.

La combinaison du tourbillon d'air et du jet de carburant sur la tête du piston crée un mélange stratifié (couches successives de mélange à richesse décroissante dans la chambre de combustion).

Le pot catalytique stocke les oxydes d'azote. Sa capacité d'accumulation dépend beaucoup de la température des gaz d'échappement. Elle atteint un maximum dans la plage de 300° C à 400°C.

Ce nouveau mode de fonctionnement du moteur permet des gains importants de consommation de carburant en roulage urbain.

2 Fonctionnement à mélange air/essence homogène :

Ce mode de fonctionnement est utilisé pour obtenir les performances maximales du moteur (richesse à environ 1).

L'injection du carburant s'effectue dès la course d'admission de sorte que le mélange air/essence ait le temps de s'homogénéiser parfaitement avant la combustion.

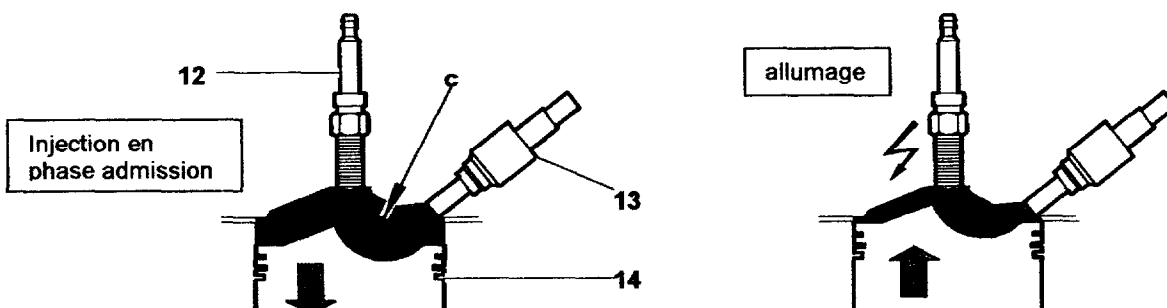
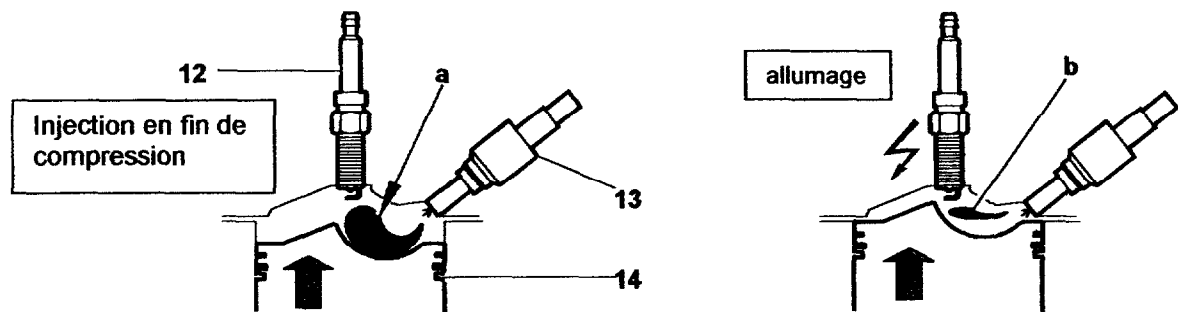
La charge moteur est commandée par la position du papillon motorisé.

Le fonctionnement est semblable à celui d'un moteur à injection indirecte.

La pression dans la tubulure d'admission se situe alors entre 0,3 et 0,9 bar suivant l'ouverture du papillon des gaz.

Le déstockage des oxydes d'azote se produit lors d'un fonctionnement du moteur à mélange air/essence homogène.

Fonctionnement à mélange air/essence très pauvre et stratifié



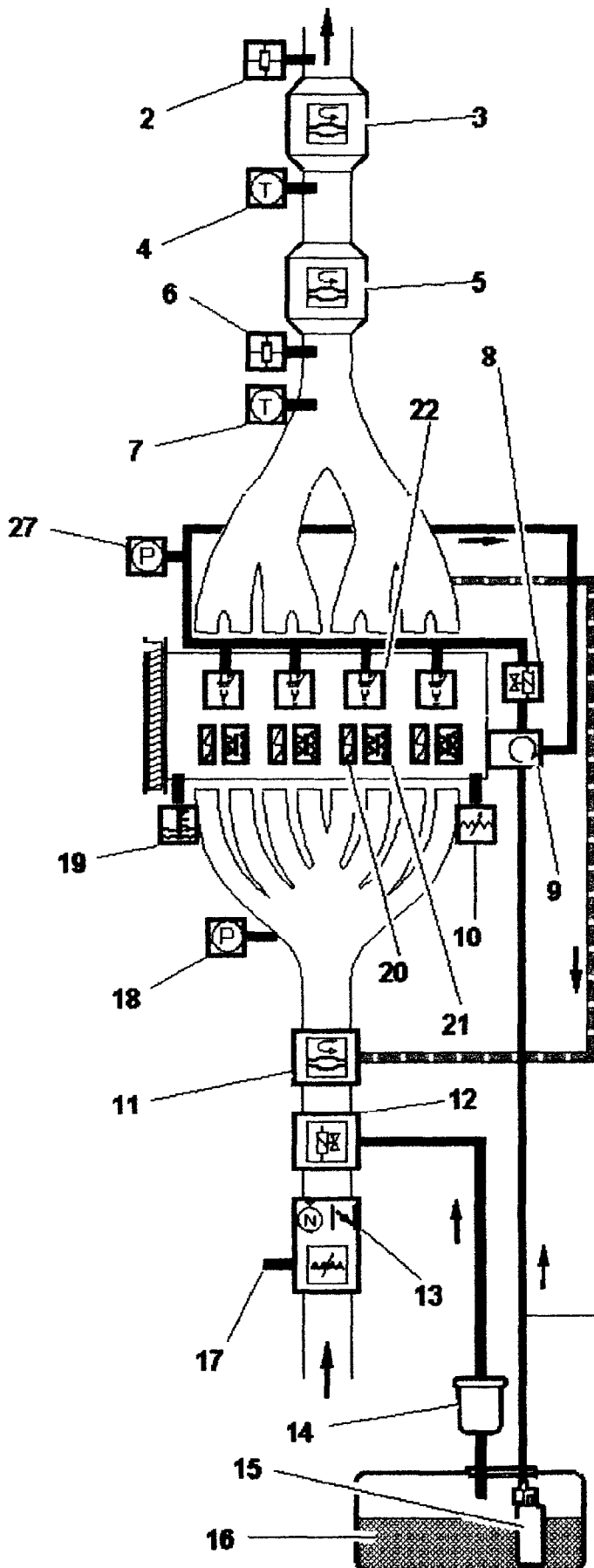
Fonctionnement à mélange air/essence homogène

- a - Carburant amené vers la bougie d'allumage par la forme du piston.
- b - Carburant concentré près de la bougie d'allumage.
- c - Mélange air/essence homogène.
- 12 - Bougie d'allumage.
- 13 - Injecteur essence.
- 14 - Piston.

B - CARACTERISTIQUES DU MOTEUR HPI 16 EW10D

Code moteur	EW10 D
Nombre de cylindres	$n = 4$
Alésage x course (mm)	85 x 88
Cylindrée (cm ³)	$V = 1998$
Rapport volumétrique ϵ	$\epsilon = 11.4$
Puissance maxi (C.E.E.)	$P_e = 103 \text{ kW}$
Régime puissance maxi	$N = 6000 \text{ tr/min}$
Couple maxi (C.E.E.)	$C_e = 19,2 \text{ daN.m}$
Régime couple maxi	4100 tr/min
Système d'injection	Multipoint à haute pression
Marque / type	SIEMENS / Sirius 81

SYNOPTIQUE MOTEUR



Rep.	Désignation
2	Sonde à oxygène
3	Pot catalytique à accumulateur de NOx
4	Capteur de température échappement
5	Précatalyseur à trois voies
6	Sonde à oxygène
7	Capteur de température échappement
8	Régulateur pression essence
9	Pompe essence haute pression
10	Capteur de cliquetis
11	Vanne EGR
12	Electrovanne de purge canister
13	Boîtier papillon motorisé
14	Canister
15	Pompe de gavage essence
16	réservoir
17	sonde de température d'air
18	Capteur de pression tubulure d'admission
19	Sonde de température d'eau moteur
20	Bougies d'allumage
21	Boîtier bobines compact
22	Injecteurs
27	Capteur haute pression essence

Circuit de recyclage des gaz brûlés

Circuit d'alimentation essence

C – OBJET DE L'ETUDE

On étudiera dans un premier temps le cycle thermodynamique du moteur à injection directe en mode "à mélange homogène" puis en mode "pauvre et stratifié".

Objectifs :

- Déterminer en mode stratifié la température du mélange admis nécessaire à l'obtention de températures à l'échappement correspondant aux conditions de stockage des oxydes d'azote (voir page 1 et les capteurs 4 et 7 page3).
- Comparer d'un point de vue énergétique les deux modes de fonctionnement.

On étudiera dans un second temps les caractéristiques d'injection dans les deux modes de fonctionnement.

Objectif :

- Dimensionner les injecteurs et la pompe haute pression de sorte qu'ils soient compatibles avec les deux modes de fonctionnement.

D – DONNEES

Ces valeurs caractéristiques sont communes aux deux modes de fonctionnement

Gaz admis dans le cylindre = gaz parfait :

- Constante caractéristique $r_{\text{air}} = r_{\text{mélange}} = r = 287 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$
- Capacité thermique massique à volume constant :
 $c_v = c_{v\text{air}} = c_{v\text{mélange}} = 713 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$

Carburant :

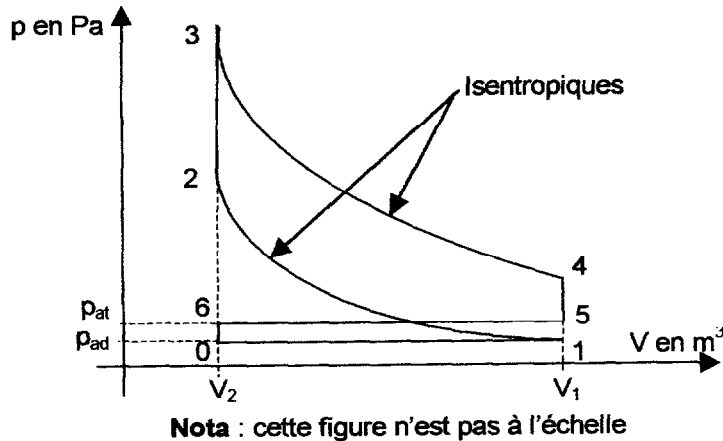
- Pouvoir calorifique inférieur $P_{\text{ci}} = 4,5 \cdot 10^7 \text{ J}/\text{kg}$
- Dosage stœchiométrique $d_s = 1/15$

Conditions ambiantes :

- Température ambiante 20°C
- Pression atmosphérique 10^5 Pa

Moteur :

- voir caractéristiques page 2
- le moteur est toujours étudié à mi-charge, car cette phase correspond à une situation où l'injection peut adopter l'un ou l'autre mode de fonctionnement.
- On a renouvellement de tous les gaz lors d'un cycle.

1 – Etude du cycle moteur en mode injection directe à mélange homogène.

L'injection est réalisée pendant la phase d'admission d'air dans les cylindres, on se retrouve dans une situation identique à celle de l'injection indirecte classique avec une masse de mélange définie lors de la fermeture des soupapes.

Le cycle théorique étudié est un cycle à admission partielle dérivé du cycle de Beau de Rochas . On admet qu'il est formé de deux boucles.

La boucle supérieure 1, 2, 3, 4, 1 constituée de deux isentropiques et de deux isochores. La boucle inférieure (0, 1, 5, 6, 0) formée de deux opérations mécaniques de transvasement (l'admission 0→1 et l'échappement 5→6) et de deux isochores. L'étude proposée concerne un cylindre.

Remarque : on fournira l'expression littérale puis l'application numérique lors des calculs.

- 1.1. Déterminer, en fonction de V et ε , les volumes V_1 et V_2 en m^3 ; avec $V_1 - V_2 = V$ cylindrée unitaire du moteur.
- 1.2. Calculer γ exposant isentropique
- 1.3. A mi-charge, la pression de fin d'admission est de $p_1 = 0,5 \cdot 10^5$ Pa et la température $\theta_1 = 20^\circ C$.
 - Déterminer la masse de mélange $m_{mél}$ au point 1 du cycle, on suppose que cette masse occupe tout le volume V_1 .
- 1.4. En fin de compression
 - Calculer la pression p_2 ,
 - Calculer la température T_2 .
- 1.5. En mode "mélange homogène" la richesse est $Ri = 1$. On considère le rendement de combustion $\eta_{comb} = 1$
 - Déterminer la masse d'essence brûlée m_e .
 - Déterminer la quantité de chaleur apportée au cours d'un cycle : Q_{23} .
- 1.6. En fin de combustion :
 - Déterminer la température T_3 .
 - Calculer la pression p_3 .
- 1.7. On donne : $T_1 = 293$ K, $T_2 = 776$ K, $T_3 = 4720$ K, $T_4 = 1783$ K, $V = 499,5$ cm^3 , $p_{ad} = p_0 = p_1 = 0,5$ bar et $p_{at} = p_5 = p_6 = 1$ bar.
 - Calculer le travail échangé au cours du cycle moteur W_{cycle} ($W_{01234560}$).
 - En déduire son rendement η_c .

2 – Etude du cycle en mode injection directe à mélange très pauvre et stratifié

Dans cette phase en mélange très pauvre ($0,2 < Ri < 0,6$) on a recours à une injection stratifiée (voir page1) avec une richesse locale (autour de la bougie) suffisante pour que la combustion se déroule correctement.

Afin que les cycles soient comparables on considère :

- Une même quantité d'essence injectée qu'au cycle précédent $m_e = 20,3 \cdot 10^{-6} \text{ kg}$.
- Le moteur fonctionne encore à mi-charge, mais avec une pression dans la tubulure d'admission de $0,9 \cdot 10^5 \text{ Pa}$ (papillon motorisé en pleine ouverture).

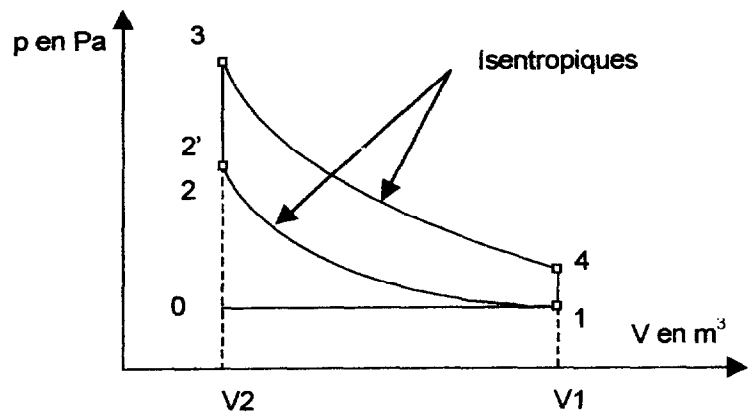
Modélisation adoptée pour cette étude théorique:

On considère que toute la masse d'essence est injectée en fin de compression juste avant l'allumage au cours du passage $2 \rightarrow 2'$.

Les points 2 et 2' sont **supposés confondus** sur le cycle théorique (durée d'injection négligeable). On admettra par conséquent que les volumes et les pressions sont identiques aux points 2 et 2'. Seules la température et la masse évoluent au cours du passage $2 \rightarrow 2'$. ($T_2 \neq T_2'$)

On admet que :

- La pression d'admission étant voisine de la pression atmosphérique on néglige la boucle inférieure et on assimile le cycle théorique au cycle de Beau de Rochas.
- Le point 2, début d'injection, est situé à la fin de la phase compression. La masse de gaz contenue dans le cylindre est égale m_a (masse de gaz admis).
- Le point 2' est situé à la fin de la phase d'injection de la masse d'essence m_e . Le cylindre contient maintenant une masse de mélange $m_a + m_e$.



$$\text{On donne : } T_4 = \frac{1}{m_a + m_e} \left[\frac{m_e P_{ci}}{C_v} \varepsilon^{1-\gamma} + \frac{P_1 V_1}{r} \right]$$

- 2.1. Dédurre de la relation précédente l'expression littérale de la masse de mélange $m_a + m_e$ en fonction de T_4 ; V_1 ; p_1 ; r ; ε ; γ ; m_e ; P_{ci} et C_v .
 - 2.2. On considère que la température des gaz d'échappement en sortie de cylindre doit être $T_4 = 1200 \text{ K}$ pour obtenir un bon fonctionnement du catalyseur. On rappelle que la masse d'essence injectée par cylindre est $m_e = 20,3 \cdot 10^{-6} \text{ kg}$ (même masse que dans le mode précédent).
- Calculer à partir de ces valeurs la masse m_a de gaz admis dans un cylindre.

2.3. On redonne : $T_4 = \frac{1}{m_a + m_e} \left[\frac{m_e P_{ci}}{C_v} \epsilon^{1-\gamma} + m_a T_1 \right]$.

- A l'aide de la relation fournie ci-dessus exprimer la température T_1 en fonction de T_4 ; m_a ; ϵ ; γ ; m_e ; P_{ci} et C_v .
- Puis calculer T_1 utile dans le cas d'une température des gaz d'échappement imposée $T_4 = 1200K$.

2.4. Comparer T_1 utile avec la température ambiante de l'air d'admission. Quelle est sur ce moteur la solution utilisée pour augmenter la température des gaz admis dans le cylindre (voir page 3) ?

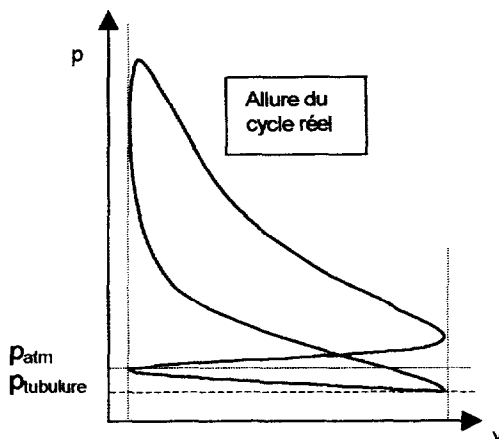
2.5. En considérant une masse de gaz admis $m_a = 526 \cdot 10^{-6} kg$, à la température de 324 K.

- Calculer les valeurs numériques de T_2 , T_2 et T_3 . (Voir page 6 pour T_2)
- Montrer que le rendement du cycle théorique peut se mettre sous la forme : $\eta = 1 - \frac{T_4 - T_1}{T_3 - T_2}$. En déduire la valeur du rendement thermodynamique de ce cycle en injection stratifiée à mélange pauvre.

2.6. Comparer les rendements des deux cycles théoriques précédents (mélange homogène et mélange pauvre) et conclure.

2.7. Dans le cycle réel moteur, la boucle basse de changement de charge induit un travail résistant $W_{\text{boucle basse}}$ dû essentiellement aux pertes de charge à l'admission.

- Comment évolue l'aire de cette boucle lorsque l'on passe du mode homogène au mode stratifié. Justifier en fonction de la pression dans la tubulure d'admission. On rappelle $|W_i| = |W_{\text{boucle haute}}| - |W_{\text{boucle basse}}|$
- Montrer que le rendement de forme en charge stratifiée $\eta_{\text{forme}} = \frac{W_{\text{indiqué}}}{W_{\text{cycle théorique}}}$ s'en trouve amélioré par rapport au fonctionnement en charge homogène : faire une figure.



Mode de fonctionnement :	Pression tubulure
Mélange homogène	$0,5 \cdot 10^5 Pa$
Mélange stratifié	$0,9 \cdot 10^5 Pa$

3 – Dimensionnement des injecteurs d'essence.

Pour dimensionner un injecteur il faut évaluer le débit maximal requis. Celui-ci correspond au fonctionnement en phase d'injection stratifiée où l'on impose une durée d'injection extrêmement courte. La situation de débit maxi en mode stratifié est réalisée à mi-charge et à 3500 tr/min (au delà de ces valeurs le calculateur passe en mode « mélange homogène »). On rappelle qu'à mi-charge, la masse d'essence injectée par cycle moteur est $m_e = 20,3 \cdot 10^{-6}$ kg pour un cylindre.

Données d'étude :

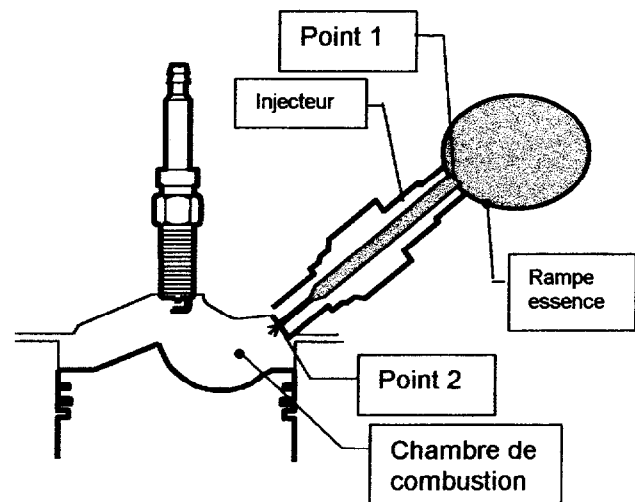
Pression essence dans la rampe d'injection	$p_r = 100 \cdot 10^5$ Pa
Pression air dans la tubulure admission	$p_{\text{tub}} = 0,9 \cdot 10^5$ Pa
Pression air dans cylindre en phase injection	$p_{\text{cyl}} = 20 \cdot 10^5$ Pa
Durée d'injection (angle vilebrequin)	$\alpha_i = 25^\circ$
Régime maxi de phase stratifiée	$N = 3500$ tr/min
Masse d'essence par cycle et par cylindre	$m_e = 20,3 \cdot 10^{-6}$ kg

- 3.1. Calculer dans les conditions données ci-dessus la durée d'injection t_i en secondes.
- 3.2. Déterminer le débit masse d'essence d'un injecteur q_{m_i} en kg/s.
- 3.3. Expression littérale de q_{m_i} :

- 3.3.1. Appliquer l'équation de Bernoulli entre les sections 1 et 2 de l'écoulement.

On remarque que $z_2 - z_1 = 46$ mm, donc le terme $g(z_2 - z_1)$ est négligeable. De même V_1^2 (C_1^2) est négligée devant V_2^2 (C_2^2), ainsi que les pertes de charge $J_{1 \rightarrow 2}$. V_1 et V_2 sont les vitesses d'écoulement de l'essence à l'entrée et à la sortie de l'injecteur.

- 3.3.2. Justifier l'hypothèse précédente : " V_1^2 est négligeable devant V_2^2 ", en écrivant la conservation du débit masse entre 1 et 2 et en considérant que S_2 est très petit devant S_1 . (S_1 et S_2 étant respectivement les sections à l'entrée et à la sortie de l'injecteur).
- 3.3.3. Tirer de l'équation de Bernoulli simplifiée l'expression littérale de V_2 en fonction de la différence de pressions ($p_2 - p_1$) et de la masse volumique de l'essence ρ_{ess} .
- 3.3.4. En déduire l'expression littérale du débit masse d'un injecteur q_{m_i} en fonction de $p_2 - p_1$; ρ_{ess} et S_2 .



- 3.4. Calculer le diamètre d_2 de l'injecteur avec $\rho_{\text{ess}} = 760$ kg/m³.