Concours Commun INP (CCINP), France

Session 2019, filière TPC

Physique

Durée : 4 heures

Ce que traite le sujet

- Problème 1, partie I : principe de fonctionnement
- Problème 1, partie II : oscillations libres d'un circuit RLC série
- Problème 1, partie III : oscillateur quasi-sinusoïdal
- Problème 1, partie IV : détecteur de métaux
- Problème 2, partie I : moteur diesel à admission atmosphérique
- Problème 2, parties II.1 et II.2 : suralimentation et compresseur
- Problème 2, parties II.3 et II.4 : refroidissement et turbine

Sujet reproduit sans retouche à partir de la page suivante.

Résumé des parties, chapitres de cours liés et autres années :
prepahelp.com/annales/ccinp/tpc/2019/physique

Prepa Help ne revendique aucun droit sur le sujet, propriété de l'organisateur du concours.

CONCOURS COMMUN INP

ÉPREUVE SPÉCIFIQUE - FILIÈRE TPC

PHYSIQUE

Mardi 30 avril : 8 h - 12 h

N.B. : le candidat attachera la plus grande importance à la clarté, à la précision et à la concision de la rédaction. Si un candidat est amené à repérer ce qui peut lui sembler être une erreur d'énoncé, il le signalera sur sa copie et devra poursuivre sa composition en expliquant les raisons des initiatives qu'il a été amené à prendre.

Les calculatrices sont autorisées

Le sujet est composé de deux problèmes indépendants.
Chaque problème est constitué de parties indépendantes.

PROBLÈME 1

Détecteur de métaux

Les détecteurs de métaux sont des instruments électroniques capables d'indiquer la présence de masses métalliques de nature et de taille différentes. Les détecteurs fixes sont utilisés dans les aéroports, dans l'industrie agro-alimentaire ou pharmaceutique, sur les réseaux routiers, etc. Les détecteurs mobiles peuvent servir à localiser et suivre le cheminement de canalisations enterrées ou de fils électriques, à aider aux fouilles archéologiques, à repérer des engins dangereux, etc.



Figure 1 – Diverses utilisations de détecteurs de métaux

Partie I - Principe de fonctionnement

Les détecteurs de métaux fonctionnent selon des principes variés dépendant de l'utilisation souhaitée. Nous allons nous intéresser ici aux détecteurs de métaux basés sur le battement de fréquence dont le principe est expliqué dans le **document 1**.

Document 1 - Principe du détecteur à battement de fréquence
Le principe de fonctionnement d'un détecteur de métaux repose sur l'induction électromagnétique. Une bobine parcourue par un courant électrique variable génère un champ magnétique variable auquel sont soumis les objets situés dans la zone de détection. En réponse, les objets conducteurs, et en particulier les métaux, sont le siège de courants induits par ce champ magnétique variable, appelés courants de Foucault. Ces courants induits dans la matière engendrent à leur tour un champ magnétique qui est perçu par un circuit de détection. Plus précisément, un détecteur à battement de fréquence utilise deux oscillateurs dont les fréquences d'oscillations sont identiques en l'absence d'objets à détecter. Chacun d'eux contient notamment une bobine dont le rôle sera différent selon le circuit. …/…

Document 1 (suite) - Principe du détecteur à battement de fréquence
L'un des deux oscillateurs fonctionne comme émetteur. Sa fréquence d'oscillations sert de référence et ne doit pas varier au cours de l'expérience. La bobine qu'il contient doit être tenue loin des objets à détecter. L'autre oscillateur fonctionne comme récepteur. La bobine qu'il contient réagit au champ magnétique induit par les courants de Foucault, ce qui provoque une variation de sa fréquence d'oscillations par rapport au circuit de référence. La comparaison des fréquences des deux oscillateurs renseigne sur la détection d'un objet métallique. Une variation de la fréquence de travail et une analyse fine des réponses obtenues permet de cibler la détection de métaux particuliers.

Q1. Énoncer l'expression locale de l'équation de Maxwell qui décrit les phénomènes d'induction électromagnétique. Rappeler la loi de Faraday en définissant les grandeurs intervenant dans cette loi.

Q2. Expliquer pourquoi le détecteur est sensible aux métaux mais pas aux végétaux ni aux minéraux.

Partie II - Oscillations libres d'un circuit RLC série

L'élément déterminant du détecteur de métal est la bobine, indispensable à la détection, qui est utilisée dans un montage oscillateur. L'étude du fonctionnement de l'oscillateur va nous permettre de déterminer les caractéristiques de la bobine.

On réalise un circuit RLC série dont le schéma de principe est donné sur la **figure 2**. Il est constitué :

- d'un générateur basse fréquence (GBF), de résistance interne R_g et de force électromotrice $e(t)$;
- d'une résistance variable R, de valeur comprise entre $0\,\Omega$ et $10{,}0\,\text{k}\Omega$;
- d'un condensateur de capacité variable C, de valeur comprise entre $0{,}01\,\mu\text{F}$ et $1{,}00\,\mu\text{F}$;
- d'une bobine réelle d'inductance L et de résistance r inconnues.

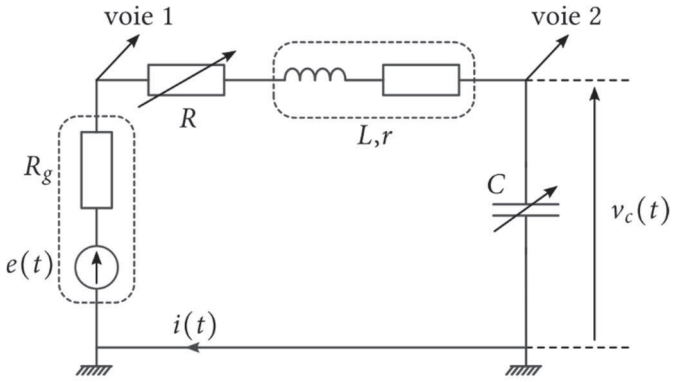


Figure 2 – Circuit RLC série

On pose :

- $R' = R + R_g + r$ la résistance totale du circuit ;
- $\omega_0 = \dfrac{1}{\sqrt{LC}}$ sa pulsation propre ;
- $Q = \dfrac{L\omega_0}{R'} = \dfrac{1}{R'}\sqrt{\dfrac{L}{C}}$ le facteur de qualité correspondant.

Un extrait des caractéristiques techniques du GBF est donné dans le **document 2**, page 4.

Document 2 - Extrait des caractéristiques techniques du GBF

Sortie du signal MAIN OUT

- Amplitude réglable en circuit ouvert : de 0 à 20 V (amplitude crête à crête)
  Précision : de 0,1 à 20 V < 5 % de 1 mHz à 10 MHz
  $\pm 1{,}5$ dB pour $f > 10$ MHz ($\pm$ 0,5 dB typique)
- Impédance : $50\,\Omega \pm 3\,\%$
- Tension continue de décalage : réglable de – 10 V à + 10 V en circuit ouvert (OFFSET)
  Précision : $\pm$ 5 % de l'amplitude (offset résiduel $< \pm 5$ mV)

Source 2018 : notice Metrix GX 320

Q3. Montrer que l'équation différentielle satisfaite par la tension v_c aux bornes du condensateur se met sous la forme :

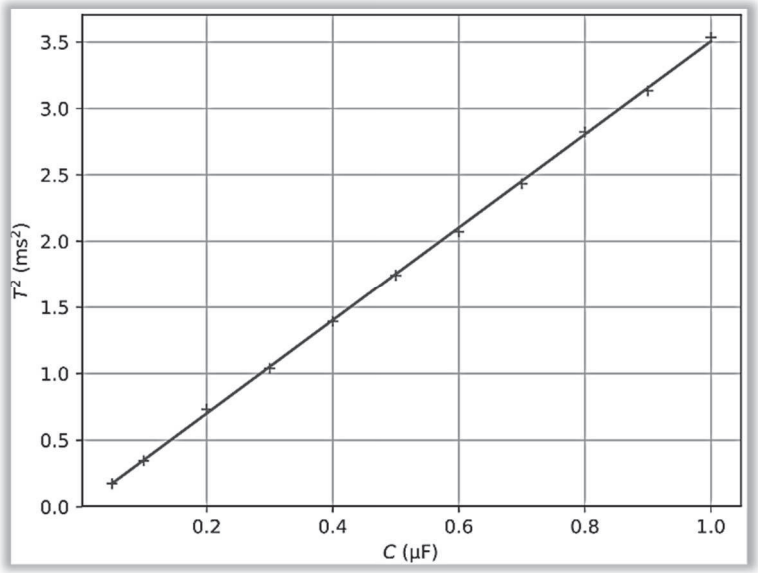
$$\frac{d^2v_c}{dt^2} + \frac{\omega_0}{Q}\frac{dv_c}{dt} + \omega_0^2 v_c = \omega_0^2 e(t).$$

On suppose que $Q > \frac{1}{2}$.

Q4. En régime libre $e(t) = 0$, montrer que la pseudo-période T des oscillations peut s'écrire $T = \frac{T_0}{\sqrt{1 - \frac{1}{4Q^2}}}$ et déterminer l'expression littérale de T_0.

Q5. En déduire que l'on peut écrire $T^2 = \frac{aC}{1 - bC}$ et exprimer a et b en fonction des caractéristiques du circuit.

Q6. La pseudo-période a été mesurée pour différentes valeurs de la capacité C ; la fonction T^2 a été tracée en fonction de C. Une modélisation affine a été superposée à ces données.



Modélisation affine :
- coefficient de corrélation : 0,999 ;
- ordonnée à l'origine : $-3{,}0 \cdot 10^{-9}$ SI ;
- pente : 3,3 SI.

Figure 3 – Carré de la pseudo-période en fonction de la capacité

En déduire la valeur de l'inductance de la bobine en expliquant la démarche et en justifiant d'éventuelles approximations.

On appelle résistance critique totale, $R_c^{'} = R_c + R_g + r$, la valeur de la résistance totale du circuit permettant d'atteindre le régime critique, la résistance R_c étant simplement appelée résistance critique. Aucune hypothèse n'est faite sur la valeur de *Q*.

Q7. Montrer que la résistance critique totale vaut $R_c^{'} = 2\sqrt{\frac{L}{C}}$.

Q8. Tous les autres paramètres étant fixés, la réponse du circuit à un échelon de tension donne lieu à différents régimes selon la valeur de la résistance variable R. Identifier et nommer les trois régimes associés aux courbes 1, 2 et 3 de la **figure 4** (en voie 1 de l'oscilloscope, l'échelon de tension ; en voie 2, la superposition des réponses du circuit).

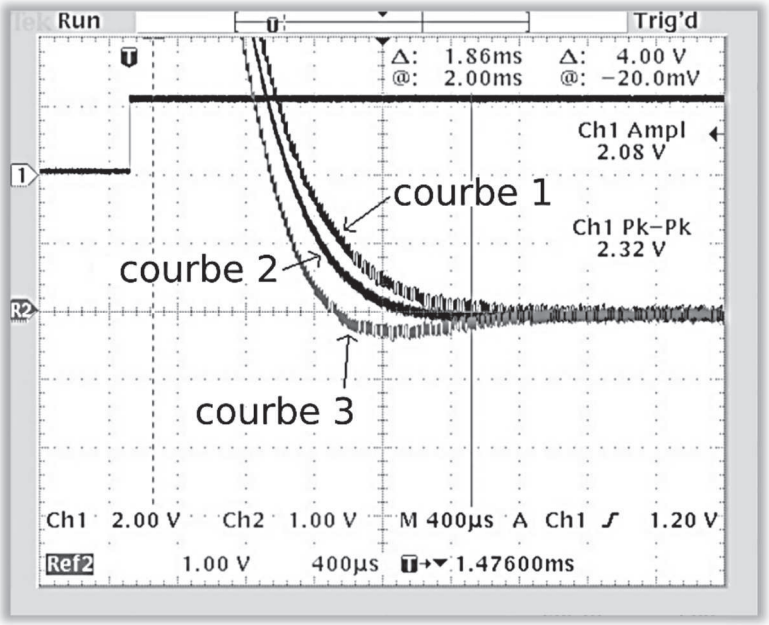
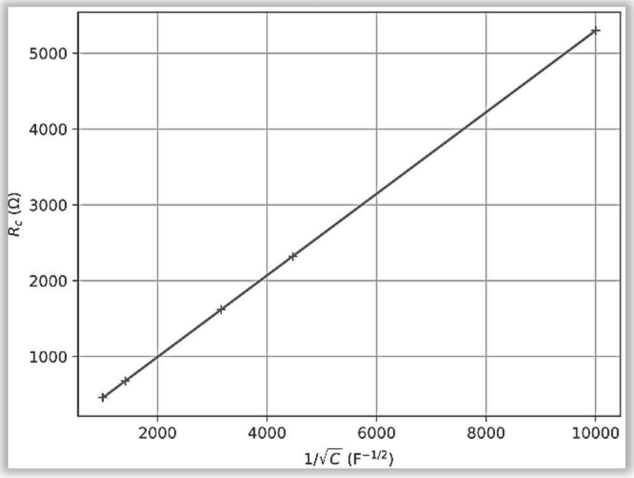


Figure 4 – Superposition des réponses du circuit soumis à un échelon de tension, pour trois valeurs différentes de R

Q9. La résistance critique $R_c = R_c^{'} - R_g - r$ a été mesurée pour différentes valeurs de C. Déduire du tracé de R_c en fonction de $\frac{1}{\sqrt{C}}$ (**figure 5**) et du **document 2** une estimation de la valeur de *r*. Pourquoi cette mesure est-elle peu précise ?



Modélisation affine :
- coefficient de corrélation : $0,999$;
- ordonnée à l'origine : $-81\,\text{SI}$;
- pente : $0,58\,\text{SI}$.

Figure 5 – Résistance critique en fonction de l'inverse de la racine carré de la capacité

Q10. Afin de valider les mesures précédentes, une dernière courbe a été tracée dont la nature n'est pas précisée et dont la légende a été perdue (**figure 6**). En précisant votre démarche, expliquer selon vous de quelle courbe il s'agit, comment elle a été réalisée et justifier son éventuelle compatibilité avec les données précédentes.

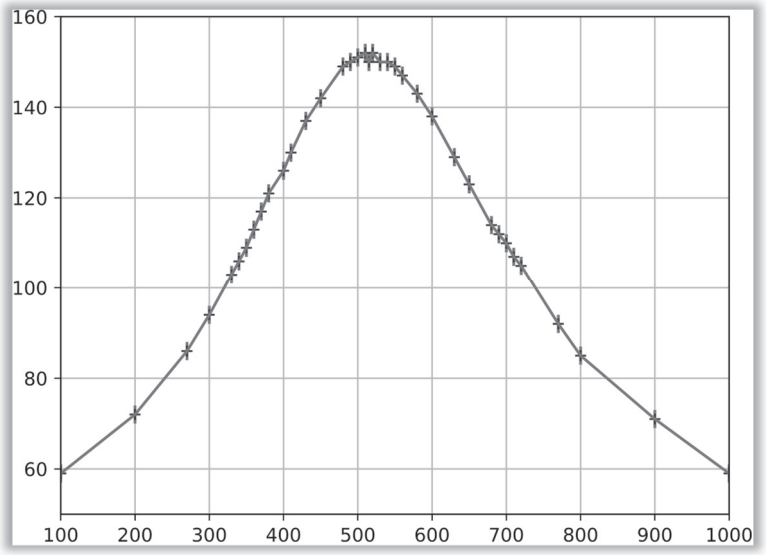


Figure 6

Partie III - Oscillateur quasi-sinusoïdal

III.1 - Montage à résistance négative

Les pertes par effet Joule empêchent le maintien des oscillations libres du circuit RLC. Afin de les entretenir, le montage doit comporter une source d'énergie. Celle-ci est apportée par un amplificateur linéaire intégré, ou ALI, qui est un composant électronique dont l'alimentation ne sera pas représentée et dont le fonctionnement idéal est décrit lorsqu'il est nécessaire. En plus de l'ALI, le montage étudié (**figure 7**) comporte 3 résistances dont une variable, la résistance R_3.

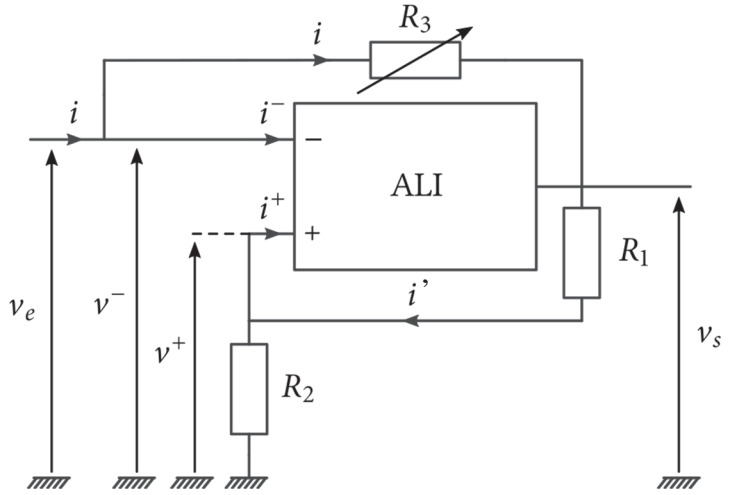


Figure 7 – Montage à résistance négative

Q11. Sachant que le fonction de l'ALI est telle que $i^- = 0$, déterminer la relation liant v_e, v_s, R_3 et i.

Q12. Sachant que le fonction de l'ALI est telle que $i^+ = 0$ et que $v^+ = v^-$, déterminer la relation liant v_e, v_s, R_1 et R_2.

Q13. En déduire que l'on peut écrire $v_e = R_n i$, où R_n est une grandeur négative homogène à une résistance, que l'on exprimera en fonction de R_1, R_2 et R_3.

III.2 - Circuit oscillateur de référence

On étudie maintenant le circuit constitué de l'association des deux circuits précédents (**figures 2** et **7**), dont le schéma est représenté sur la **figure 8**.

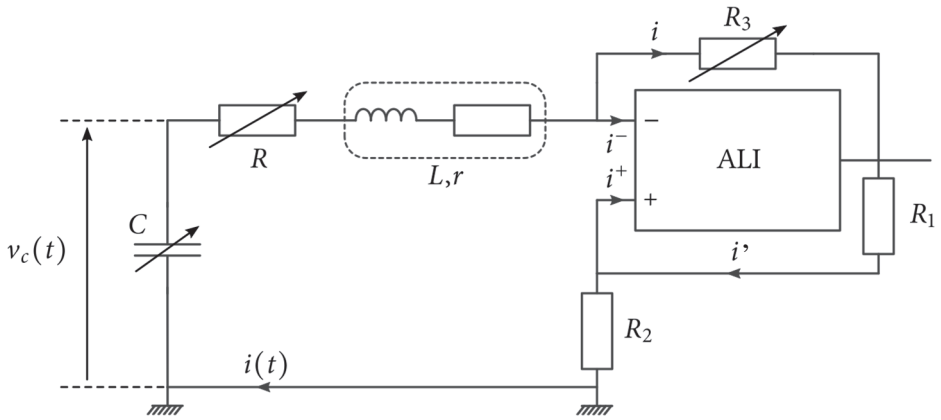


Figure 8 – Circuit oscillateur

Q14. Montrer que l'équation différentielle satisfaite par l'intensité $i(t)$ du circuit de l'oscillateur se met sous la forme

$$\frac{d^2 i}{dt^2} + 2\xi\omega_0 \frac{di}{dt} + \omega_0^2 i = 0 \quad \text{avec } \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}.$$

Donner l'expression du coefficient ξ en fonction de R_n, R, r, C et L.

Q15. Déterminer la valeur de R_n qui conduit à des oscillations purement harmoniques non amorties. Quelle est la source d'énergie permettant de compenser l'effet Joule présent dans les résistances du montage ?

Partie IV - Détecteur de métaux

Document 3 - Extrait de la notice d'un détecteur de métaux

Alimentation : 6 piles alcalines 1,5 V AA LR06 (*piles non fournies*)
Courant de fonctionnement : en veille ~ 65 mA
max ~ 150 mA
Plage de tension de fonctionnement : 7,2 ~ 9,6 V
Fréquence de fonctionnement : 7,5 kHz $\pm$ 1 kHz
Sensibilité : Min. 20 cm (8 pouces)
Plage de température : $-$ 20 °C à $+$ 60 °C
Taille : 540 mm (l) ; 345 mm (L) ; 1 300 mm (h)
Poids net : 1,1 kg



Source 2018 : notice COGEX

Pour fabriquer le détecteur de métaux, on associe deux circuits oscillateurs semblables au précédent (voir **document 1**). On note f_r la fréquence fixe du circuit de référence et f_d la fréquence variable du circuit de détection. En l'absence de détection, les fréquences d'oscillations des oscillateurs sont identiques :

$$f_r = f_d = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}.$$

Les valeurs des composants sont différentes de celles des parties précédentes.

Q16. Dans la pratique, peut-on concevoir deux oscillateurs de fréquences d'oscillations identiques ? Si oui expliquer pourquoi, si non, proposer une façon d'ajuster au mieux les fréquences.

Circuit de détection

Lorsqu'un métal est présent dans le champ de la bobine de détection, d'inductance propre L, on admet que le métal détecté se comporte comme une bobine d'inductance propre L_m. Le couplage entre les deux inductances est matérialisé par une inductance mutuelle notée M. L'inductance propre du circuit de détection se trouve alors modifiée et devient L'.

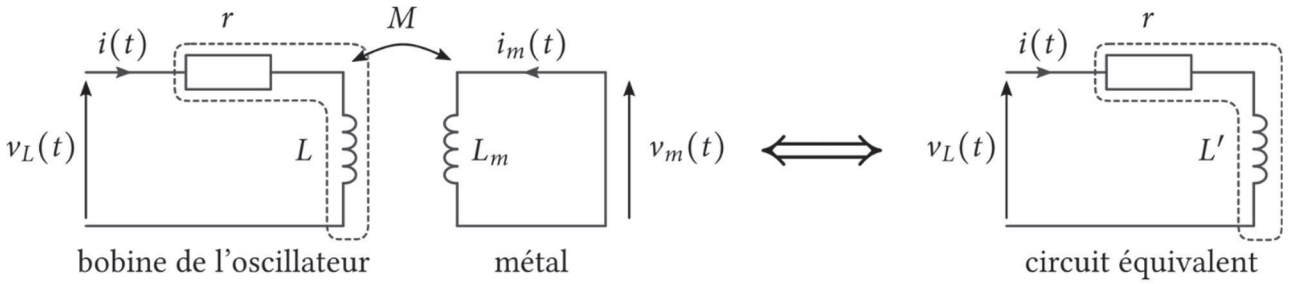


Figure 9 – Circuit de détection équivalent en présence d'un métal

Q17. Exprimer $v_m(t)$ et en déduire que $\frac{di_m}{dt} = -\frac{M}{L_m}\frac{di}{dt}$.

En déduire alors que la tension $v_L(t)$ peut se mettre sous la forme

$$v_L(t) = ri + L'\frac{di}{dt} \quad \text{avec} \quad L' = L\left(1 - \frac{M^2}{LL_m}\right).$$

Q18. Sachant que $M^2 \ll LL_m$, en déduire que la détection d'un métal engendre une variation relative de la fréquence d'oscillation du détecteur de la quantité $\dfrac{\Delta f_d}{f_d} = \dfrac{1}{2}\dfrac{M^2}{LL_m}$.

On note respectivement $v_r(t) = v_{r0}\cos(2\pi f_r t)$ et $v_d(t) = v_{d0}\cos(2\pi f_d t)$ les tensions de chacun des oscillateurs respectivement de référence et de détection. Afin de déterminer la variation de fréquence, on utilise le montage de la **figure 10** comprenant un multiplieur réalisant l'opération $v_X(t) = K \cdot v_d(t) \cdot v_r(t)$ et un filtre dont la nature est à déterminer.

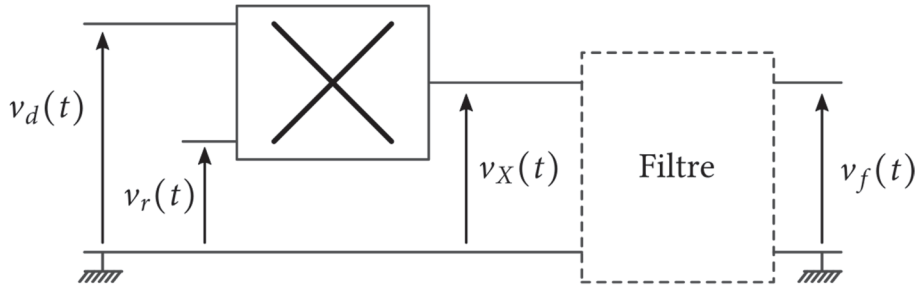


Figure 10 – Circuit de détection de différence de fréquences

Rappel : $\cos a \cdot \cos b = \dfrac{1}{2}\left[\cos(a+b) + \cos(a-b)\right]$.

Q19. Établir l'expression de la tension $v_X(t)$ en sortie du multiplieur et représenter son spectre.

Q20. Sachant que l'on souhaite obtenir en sortie du filtre un signal permettant de déterminer la différence de fréquence $\Delta f = |f_r - f_d|$ entre les oscillateurs, proposer un montage passif simple permettant d'isoler la composante pertinente du signal. Déduire du **document 3** une valeur numérique plausible de sa fréquence de coupure.

Q21. Lors d'une tentative de détection, le signal $v_X(t)$ suivant (**figure 11**) a été enregistré en sortie du multiplieur. En déduire l'écart entre les deux fréquences des oscillateurs et prévoir ce qui sera détecté en sortie du filtre.

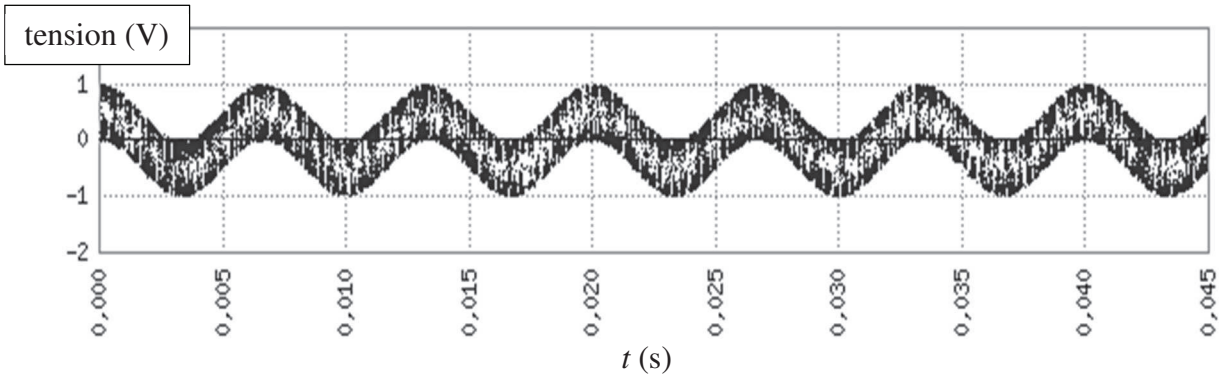


Figure 11 – Tension enregistrée en sortie du multiplieur

PROBLÈME 2

Suralimentation des moteurs par turbocompresseur

Les motorisations diesel sont de plus en plus montrées du doigt et connaissent un déclin depuis 2017 pour leurs rejets de particules fines, d'oxydes de carbone et d'oxydes d'azote.
Cependant, il n'en n'a pas été toujours ainsi : dans les années 80, le diesel avait la cote. En effet, ce carburant était considéré comme très économique et performant. À grand renfort de campagnes publicitaires, les constructeurs automobiles vantent même ces moteurs qui, pour parcourir la même distance avec la même puissance, consomment entre 10 et 20 % de carburant en moins. L'arrivée des systèmes de suralimentation par turbocompresseur plus communément appelé « turbo » contribue alors dans ces années à implanter davantage ce type de motorisation sur le parc automobile français.
C'est l'objet de cette partie que d'étudier ces moteurs ainsi que le principe des turbocompresseurs.



Partie I - Moteur diesel à admission atmosphérique

On étudie tout d'abord un moteur dit à admission atmosphérique, c'est-à-dire non équipé d'un système de suralimentation.
Un piston entraîné par un vilebrequin (**figure 12**), descend du point mort haut au point mort bas : le volume balayé correspondant est appelé cylindrée et noté $\mathcal{C}$. Il crée un phénomène d'aspiration par la soupape d'admission ouverte. L'air ambiant pénètre alors dans le cylindre. Le piston remonte, toujours entraîné par le vilebrequin et compresse le mélange air/carburant. Ce mélange compressé et échauffé est enflammé et la combustion s'enclenche, c'est l'explosion, créant une force de pression sur le piston qui le repousse au point mort bas.
Lors de la remontée du piston, les gaz brûlés sont évacués par l'échappement.

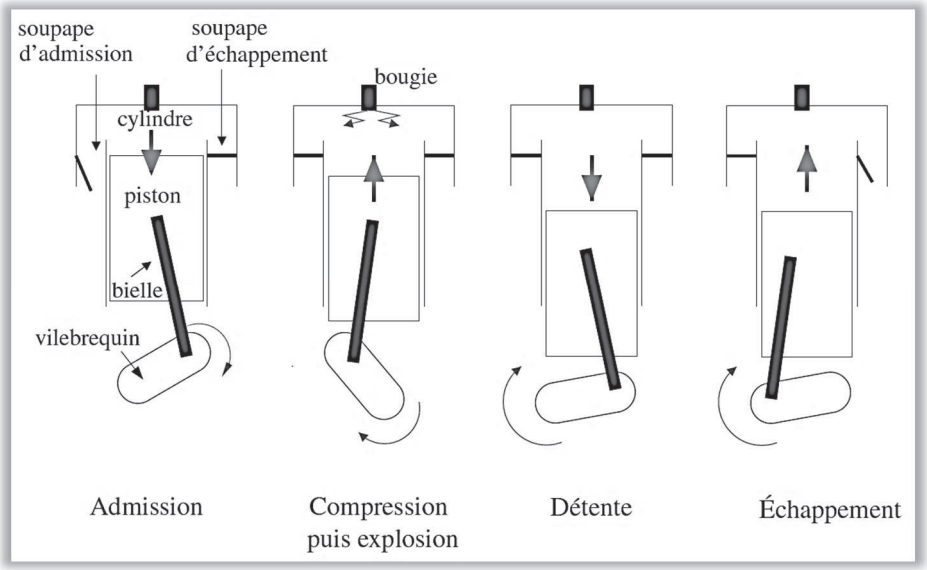


Figure 12 – Fonctionnement d'un moteur à 4 temps

La modélisation du cycle consiste alors en :
- une compression adiabatique AB ;
- un échauffement isochore BC ;
- un échauffement isobare CD ;
- une détente adiabatique DE ;
- une détente isochore EA.

On raisonnera sur un cycle fictif fermé sans se préoccuper des étapes consistant à évacuer les gaz issus de la combustion (échappement) pour les remplacer par de l'air frais (admission) que l'on modélisera par l'évolution isochore EA, suivie par l'injection de carburant juste avant l'explosion.

Q22. Dans un moteur diesel de voiture, quel élément représente la source chaude ? la source froide ?

Q23. Faire un schéma conventionnel d'un moteur ditherme de voiture dans lequel on fera apparaître les éléments suivants :
- source froide ;
- source chaude ;
- air d'admission ;
- vilebrequin.

On fera apparaître sur ce schéma les grandeurs énergétiques reçues par l'air effectuant un cycle :
- W le travail reçu ;
- Q_f le transfert thermique reçu et provenant de la source froide ;
- Q_c le transfert thermique reçu et provenant de la source chaude.

On précisera sur le schéma le signe de ces grandeurs.

Q24. Représenter le cycle ABCDEA sur un diagramme de Clapeyron. Vérifier graphiquement qu'il s'agit d'un cycle moteur.

Q25. Exprimer le rendement du moteur en fonction des transferts thermiques Q_f et Q_c.

Q26. Donner, en la redémontrant, l'expression du rendement de Carnot associé à ce cycle fonctionnant entre les températures extrêmes $T_f = 300\ \text{K}$ et $T_c = 2\,765\ \text{K}$. Faire l'application numérique.

Q27. Un moteur 4 cylindres à admission atmosphérique développe en moyenne une puissance de $125\ \text{ch}$ (chevaux) à $3\,600\ \text{tours}\cdot\text{min}^{-1}$. Sachant que la combustion du mélange produit un transfert thermique de $5\,587\ \text{J}$ sur un cycle, soit deux tours du piston, calculer le rendement de ce moteur.
On rappelle que $1\ \text{ch} = 735\ \text{W}$.
Commenter.

Partie II - Moteur diesel équipé d'un turbocompresseur

II.1 - Principe de la suralimentation

La puissance délivrée par un moteur à pistons est directement liée à la quantité de carburant brûlée au cours d'un cycle. Cette quantité est limitée par une proportion massique carburant/air optimale assurant la combustion la plus complète possible. L'enjeu d'un accroissement de puissance consiste alors à augmenter la quantité d'air admise dans les cylindres afin d'augmenter d'autant la quantité de combustible : c'est le principe de la suralimentation.

Elle consiste donc à densifier le gaz pour qu'à volume équivalent, une plus grande masse d'air occupe la chambre de combustion. La masse volumique de l'air d'admission est augmentée à l'aide d'un turbocompresseur et d'un échangeur placé entre le compresseur et les cylindres d'admission. Compresseur et échangeur sont montés en série sur le circuit d'admission ; tout l'air d'admission traverse le compresseur (**figure 13**).

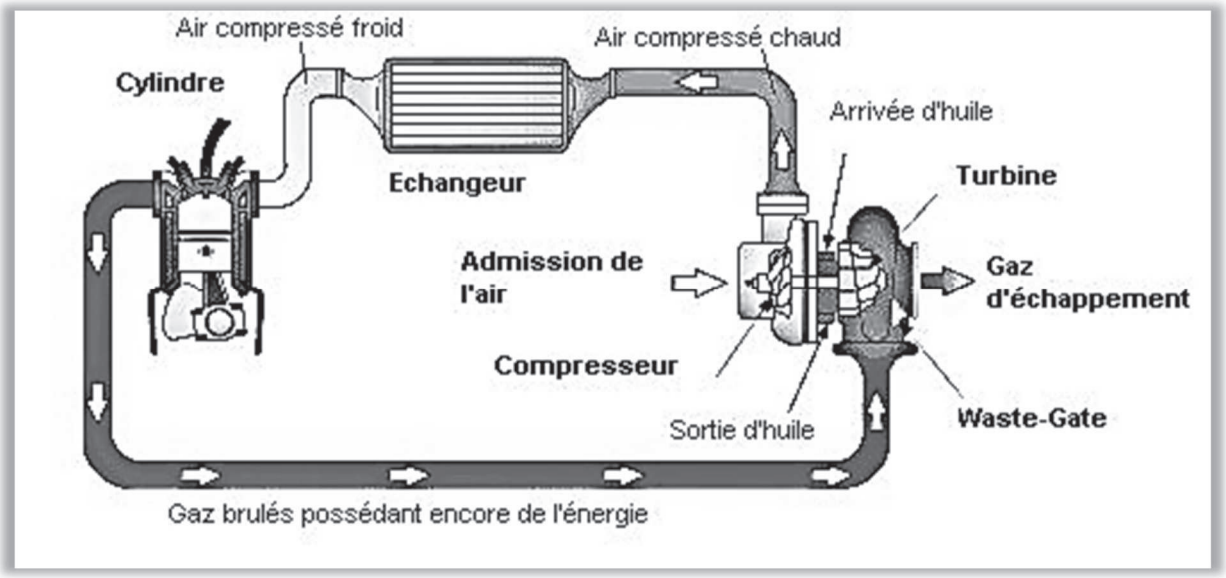


Figure 13 – Installation d'un turbocompresseur sur un moteur automobile

La turbine est placée sur le circuit de gaz d'échappement, qui par sa détente, entraîne mécaniquement le compresseur via une hélice.
L'air d'admission comme les gaz d'échappement seront considérés comme des gaz parfaits.
On donne :

- constante des gaz parfaits $R = 8,314\ \text{J}\cdot\text{K}^{-1}\cdot\text{mol}^{-1}$;
- masse molaire de l'air $M = 29,0\ \text{g}\cdot\text{mol}^{-1}$;
- rapport des capacités thermiques de l'air à volume et à pression constants $\gamma = 1,38$.

Q28. Exprimer la masse volumique de l'air d'admission ρ en fonction de sa pression p, de sa température T et d'une constante r que l'on exprimera en fonction des données.

Q29. Justifier la présence d'un compresseur et d'un échangeur (**figure 13**) pour augmenter la puissance du moteur.

Document 4 - Turbocompresseur

Un turbocompresseur, plus communément appelé turbo, est constitué d'une turbine **2** placée sur le circuit d'éjection des gaz d'échappement **1**, entre le moteur et le pot d'échappement. Les gaz, issus de la combustion dans les cylindres, entrent dans la turbine, la puissance cédée sert à entraîner un compresseur **3** : ce dernier comprime de l'air ambiant **5**, qui est ensuite injecté dans les cylindres après refroidissement.

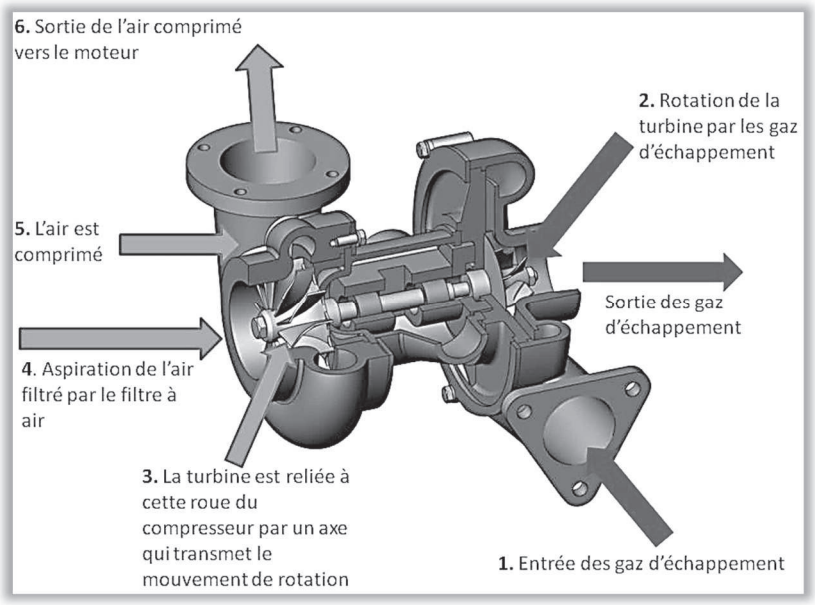


Figure 14 – Schéma de principe d'un turbocompresseur

On modélise, comme indiqué sur la **figure 15**, le turbocompresseur décrit dans le **document 4**.

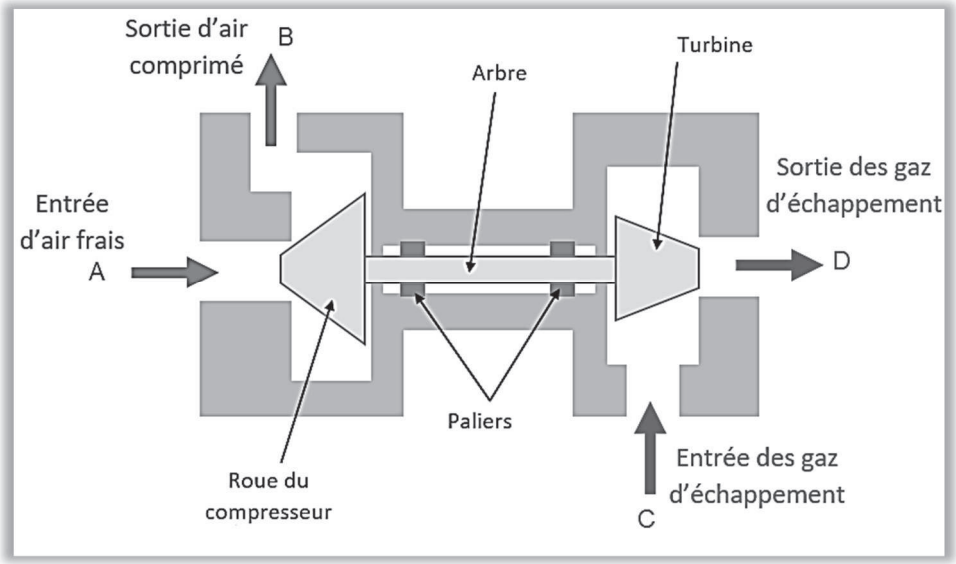


Figure 15 – Modélisation du turbocompresseur

L'air frais ambiant est admis en A dans le compresseur et ressort comprimé en B. Les gaz d'échappement, issus de la combustion dans les cylindres, entrent dans la turbine en C et ressortent en D.

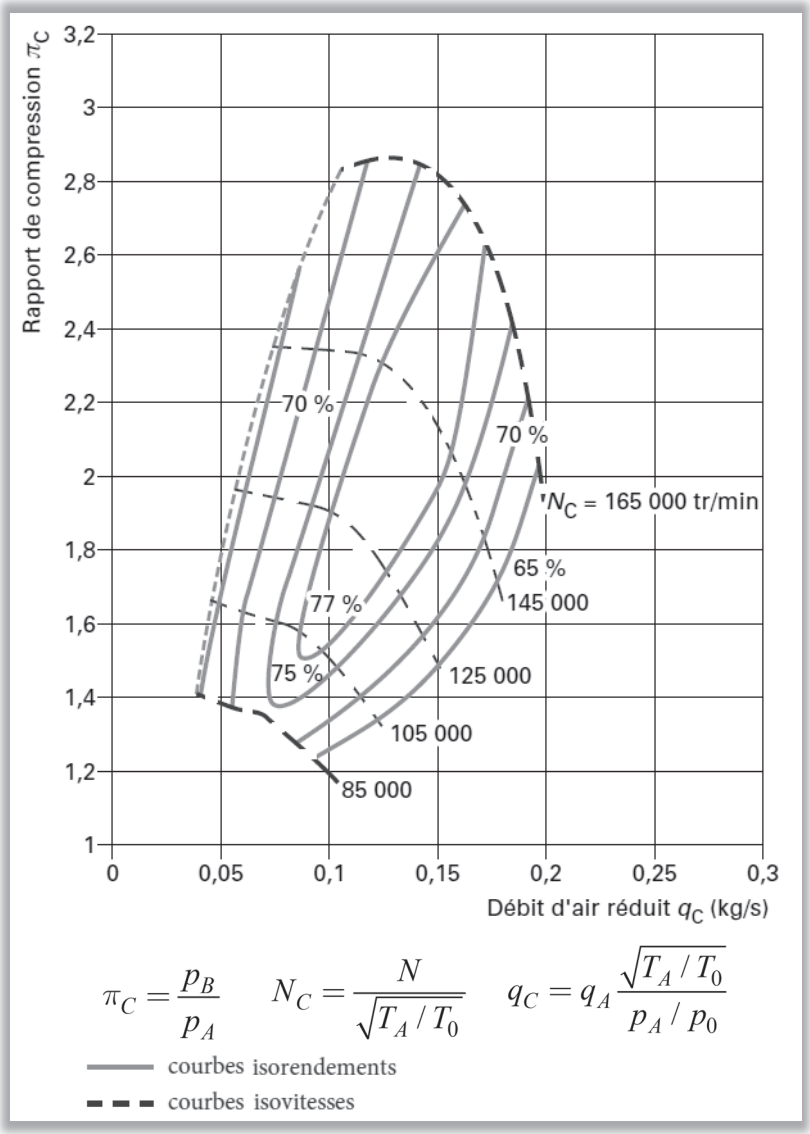
Hypothèses :

- on négligera les variations d'énergies cinétique et potentielle devant la variation d'enthalpie des gaz ;
- les pertes thermiques et mécaniques seront négligées devant les travaux utiles ;
- la capacité thermique massique à pression constante c_p reste constante et la même pour l'air d'admission comme pour les gaz d'échappements considérés tous deux comme gaz parfait.

On donne : $c_p = 1{,}05\ \text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$.

Document 5 - Mesure des paramètres d'un turbocompresseur

La Peugeot 207 1,6 HDI est équipée d'un moteur 4 cylindres.
Elle dispose sur certaines finitions d'un turbocompresseur GARRETT modèle GT2860RS.
Les performances d'un compresseur sont représentées dans une carte débit-pression, dite carte de performance, sur laquelle sont indiquées les courbes isovitesses du compresseur, les courbes isorendement et les limites de fonctionnement.
Pour le GARRETT modèle GT2860RS, la carte de performance fournie par le constructeur est la suivante (l'utilisation de valeurs réduites permet de garder les cartes invariantes par rapport aux conditions d'entrée du fluide) :



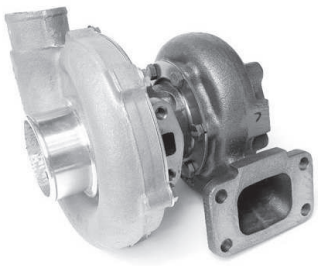


Figure 16 – Carte de performance du turbocompresseur Garrett GT2860RS (source Garrett)

Légende :

- p_A et p_B désignent respectivement la pression en amont et aval du compresseur ;
- T_A la température d'entrée du compresseur ;
- p_0 et T_0 une pression et une température de référence du constructeur ;
- N la vitesse de rotation du turbocompresseur et N_C sa vitesse réduite ;
- q_A le débit d'air d'admission du compresseur et q_C le débit réduit.

…/…

Document 5 (suite) - Mesure des paramètres d'un turbocompresseur

Les mesures effectuées en fonctionnement stabilisé et autonome sur ce turbocompresseur ont été consignées dans le **tableau 1**.

Moteur	
Régime moteur ….....(tr/min*)	4 400
Puissance du moteur ……(kW)	120
Cylindrée (volume d'un cylindre)…..……...(dm^3)	2,50
Pression atmosphérique …….....(hPa)	1 000
Conditions Compresseur	
Pression avant compresseur ……(hPa)	950
Pression après compresseur ……(hPa)	2 018
Température avant compresseur ……...(°C)	25,0
Température après compresseur ……...(°C)	127
Débit d'air d'admission ……(g/s)	166,7
Débit réduit ……...(g/s)	180,6
Vitesse du turbocompresseur ……(10^3 tr/min)	160
Vitesse réduite du turbocompresseur ……(10^3 tr/min)	157
Conditions Échangeur	
Efficacité…….	0,56
Conditions Turbine	
Pression avant turbine ……..(hPa)	2 247
Pression à la sortie de la turbine ……...(hPa)	1 300
Température avant turbine …….(°C)	750
Température après turbine …….(°C)	450
Débit des gaz d'échappement ……....(g/s)	176

* Cette unité, tr/min, a été exceptionnellement conservée conformément au document d'origine.

Tableau 1 – Conditions de fonctionnement du turbocompresseur Garrett GT2860RS (source Garrett)

Source du document : Technique de l'ingénieur - Suralimentation des moteurs de véhicules par turbocompresseur

Q30. D'après le **document 5**, déterminer les valeurs de référence p_0 et T_0 choisies par le constructeur Garrett pour tracer ses cartes de performance.

Q31. Reproduire sur la copie le tableau suivant et le compléter à l'aide de la **figure 15** et du **tableau 1** :

	Admission		Échappement	
Points i	A	B	C	D
Température T_i (°C)				
Pression p_i (bar)				

Q32. Rappeler la loi de Laplace reliant la pression p et la température T d'un gaz parfait lors d'une transformation isentropique.

Q33. Peut-on considérer la transformation dans le compresseur comme isentropique ? Et dans la turbine ? Commenter.

II.2 - Étude du compresseur

Q34. Énoncer l'expression générale du premier principe de la thermodynamique pour un système ouvert en régime stationnaire, en définissant chaque grandeur introduite.

Q35. En déduire l'expression de la puissance $\mathcal{P}_C$ reçue par l'air d'admission dans le compresseur en fonction de q_A, c_p, T_A et T_B.

Q36. On définit, pour le compresseur, le rendement de compression isentropique η_C comme le rapport entre la puissance d'une compression théorique isentropique et la puissance de compression réelle. Montrer que η_C s'écrit

$$\eta_C = \frac{T_A}{T_B - T_A}\left(\pi_C^{1-\frac{1}{\gamma}} - 1\right)$$

avec $\pi_C = \dfrac{p_B}{p_A}$ le rapport de compression.

Q37. À l'aide de la carte de performance (**figure 16**), déterminer la valeur du rendement de compression isentropique du turbocompresseur dans les conditions fournies par le **tableau 1**.

Q38. Pour une température d'entrée $T_A = 25\,°\text{C}$, quelle serait alors la valeur théorique de la température de sortie T_B et celle de la puissance théorique $\mathcal{P}_C$ demandée au compresseur ? Comparer T_B à sa valeur effective fournie par le **tableau 1**.

Q39. À l'aide du résultat de la question **Q28**, calculer l'augmentation relative de la masse volumique de l'air d'admission $\dfrac{\rho_B - \rho_A}{\rho_A}$ et conclure.

II.3 - Refroidissement de l'air d'admission

Avant de pénétrer dans le moteur, l'air d'admission sortant du compresseur à la température T_B est refroidi jusqu'à la température T_{Be} à l'aide d'un refroidisseur dit échangeur. Ces refroidisseurs d'air de suralimentation peuvent être air-air ou, pour une plus grande efficacité, air-eau. On envisage le cas d'un échangeur air-air dont les caractéristiques sont données dans le **document 6**, page 17.

Document 6 - Intercooler

Le refroidisseur d'air de suralimentation (RAS), aussi appelé intercooler est un élément important qui améliore le rendement des moteurs équipés d'un turbocompresseur. Il existe plusieurs types d'intercooler. Selon les véhicules, il est placé à proximité du radiateur ou dans le passage de roue.

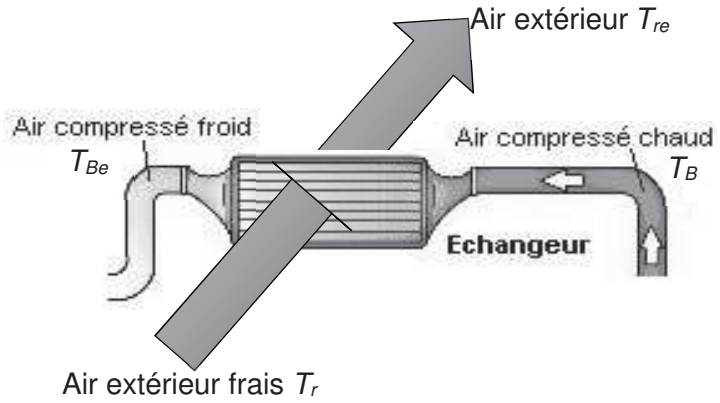


Figure 17 – Principe d'un échangeur air-air

L'efficacité d'un intercooler est définie comme le rapport entre la chute de température du fluide comprimé et la différence entre la température d'entrée de ce fluide à celle du fluide de refroidissement :

$$\varepsilon = \frac{T_B - T_{Be}}{T_B - T_r}.$$

Intercooler de la Peugeot 207 1.6 HDI

L'intercooler est en aluminium et est placé juste devant le radiateur à eau du véhicule.



Un tel placement permet de récupérer un maximum d'air extérieur frais mais possède néanmoins l'inconvénient de réchauffer l'air au voisinage du radiateur d'eau du véhicule, ce qui rend ce dernier moins performant pour le refroidissement du moteur. Le constructeur tolère une différence de température $\Delta T_r = 10\ ^\circ\mathrm{C}$ entre la face avant et la face arrière de l'intercooler pour l'air extérieur.

Q40. En supposant que le débit d'air comprimé en entrée de l'échangeur est toujours $q_A = 0,23\ \mathrm{kg \cdot s^{-1}}$, évaluer quelle doit être la surface avant S de l'intercooler sur une Peugeot 207 afin de respecter les conditions imposées par le constructeur. Cette question s'inscrit dans le cadre d'une résolution de problème, on précisera clairement les hypothèses faites, les valeurs choisies, les théorèmes utilisés, etc. On s'aidera des données du **document 5**.

II.4 - Turbine

Après passage par le compresseur et l'échangeur, l'air d'admission entre alors dans les 4 cylindres du moteur, dans lesquels il subit la suite de transformations mentionnées dans la première partie. Les gaz d'échappement chauds et encore comprimés sont ensuite dirigés vers la turbine avant de ressortir par le pot d'échappement (en passant au préalable par un filtre à particules, puis par un pot catalytique).

Q41. Sachant qu'un cycle moteur correspond à deux tours de vilebrequin, quelle est la valeur du débit massique q_g des gaz rejetés dans la turbine dans les conditions (T_C, p_C) lorsque le moteur tourne à la vitesse de $4\,400$ tours$\cdot$min^{-1} ? Comparer aux mesures du **document 5**.

Q42. Exprimer la puissance mécanique $\mathcal{P}_T$ reçue par les gaz d'échappement de la part de la turbine en fonction de q_g, c_p, T_C et T_D. Commenter le signe de $\mathcal{P}_T$.

Q43. Calculer le rendement global du turbocompresseur η_{TC} défini par :

$$\eta_{TC} = \frac{\mathcal{P}_C}{|\mathcal{P}_T|}.$$

Quelles peuvent être les origines des pertes énergétiques ?

L'accélération du moteur suralimenté par turbocompresseur est très influencée par la montée en régime du turbocompresseur, le couple moteur dépendant d'une part de la quantité de combustible pouvant être introduite, donc de la rapidité de l'augmentation de la pression d'admission et d'autre part des effets négatifs de la contrepression d'échappement due au turbocompresseur.
On définit pour le compresseur :

- le système $\mathcal{S}$ correspondant à l'ensemble {arbre + turbine + roue de compresseur} (**figure 15**) ;
- $N(t)$ sa vitesse angulaire de rotation prise par rapport au sol fixe ;
- J son moment d'inertie par rapport à l'axe de rotation.

On suppose le véhicule à l'arrêt, moteur démarré.
Ce système reçoit ainsi :

- une puissance $\mathcal{P}_T'$ de la part des gaz d'échappement ;
- une puissance $\mathcal{P}_C'$ de la part de l'air d'admission ;
- une puissance $\mathcal{P}_f = -fN^2$ correspondant aux pertes par frottements.

Q44. Quelle est la relation entre $\mathcal{P}_C'$ et $\mathcal{P}_C$ d'une part puis entre $\mathcal{P}_T'$ et $\mathcal{P}_T$ d'autre part ?

Q45. Rappeler l'expression de l'énergie cinétique de rotation du système $\mathcal{S}$.

Q46. Appliquer le théorème de l'énergie cinétique au système et déterminer l'équation différentielle vérifiée par $N(t)$.

Q47. Soient Γ_T et Γ_C les couples positifs projetés sur l'axe de rotation et s'exerçant respectivement sur la turbine et sur la roue du compresseur. Montrer que l'équation précédente s'écrit :

$$\frac{dN}{dt} + \frac{N}{\tau} = \frac{\Gamma_T - \Gamma_C}{J}.$$

On donnera l'expression de τ en fonction de f et J.

Q48. En supposant que les couples Γ_T et Γ_C sont approximativement constants au démarrage de la rotation du turbocompresseur, choisi comme instant initial, trouver l'évolution de $N(t)$.

Q49. Comment doit être la valeur de Γ_T par rapport à celle de Γ_C pour que le turbocompresseur puisse être mis en rotation ?

Q50. Aujourd'hui, les concepteurs de turbocompresseurs cherchent à remplacer les alliages constituant la roue du compresseur, l'axe et la turbine par des céramiques (masse volumique trois fois plus faible). Quel en serait l'intérêt ?

Q51. Expliquer de même l'intérêt de la lubrification du turbocompresseur comme on le voit sur la **figure 18.**

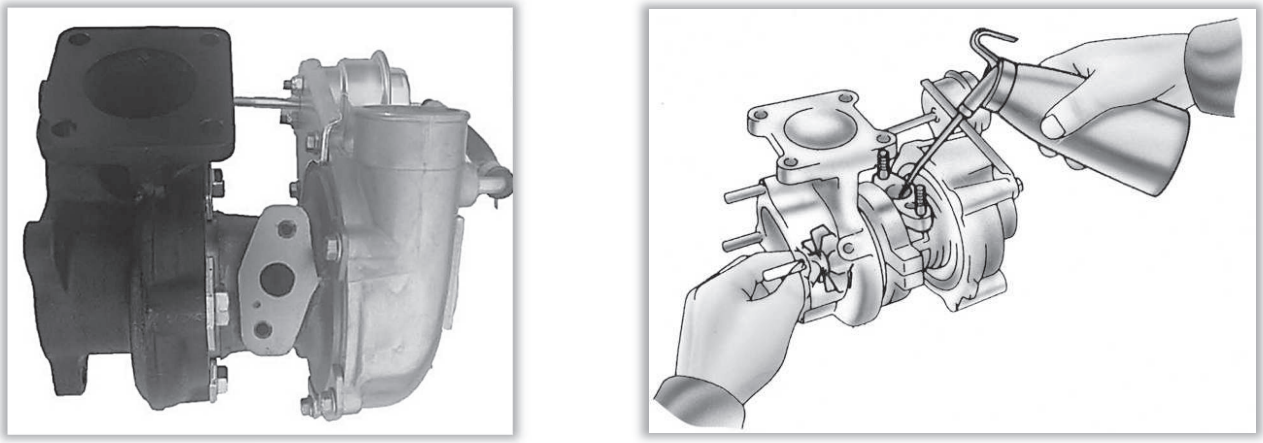


Figure 18 – Lubrification du turbocompresseur (le schéma de droite correspond seulement à l'amorçage du turbocompresseur, celui-ci étant ensuite alimenté en huile en permanence)

FIN

IMPRIMERIE NATIONALE – 19 1165 – D'après documents fournis

Travailler les chapitres de ce sujet

Prepa Help suit le programme de TPC chapitre par chapitre : cours détaillé, méthodes, pièges, exercices et problèmes corrigés pas à pas, tirés des concours. L'essai gratuit donne accès aux chapitres offerts de ta filière, sans carte bancaire.

Chapitres liés à ce sujet

- Régimes transitoires
- Équations différentielles linéaires du second ordre
- Circuits électriques dans l'ARQS
- Signaux périodiques et filtrage linéaire
- Trigonométrie et signaux sinusoïdaux
- Mécanique du solide et frottement solide

Ouvrir l'essai gratuit

Scanne le code ou clique sur le bouton.

prepahelp.com/#essai

Une question sur le concours ou sur ta filière : **écrire sur WhatsApp**

Les autres années et épreuves : prepahelp.com/annales/ccinp/tpc