

Corrigé

Physique-chimie et automobile

Concours Commun INP – Session 2019 – Filière PSI

Corrigé proposé par Hervé Daffix (PSI, Lycée Paul Cézanne, Aix-en-Provence) et Emmanuel Guillaud (PSI*, Lycée Dumont d'Urville, Toulon). N'hésitez pas à nous contacter par la voie habituelle pour toute remarque ou suggestion.

Ce corrigé peut être diffusé auprès des élèves.

Première partie. Aspects aérodynamiques.

- On précise ci-dessous les zones d'écoulement laminaire et turbulent.



▲ **Figure C1.** Nature de l'écoulement autour du véhicule.

Le coefficient de trainée aérodynamique est influencé par le **nombre de Reynolds** de l'écoulement ainsi que par la **forme de l'objet**.

- Si on tient compte uniquement de la force de trainée comme source de dissipation de l'énergie, alors toute la puissance développée par le moteur sert à contrer la trainée, soit :

$$P = F_x \cdot v_{\max} = \frac{1}{2} \cdot C_x \cdot \rho_0 \cdot v_{\max}^3 \quad \blacksquare \quad (1)$$

soit :

$$v_{\max} = \sqrt[3]{\frac{2 \cdot P}{C_x \cdot \rho_0 \cdot S}} \quad \blacksquare \quad (2)$$

Application numérique.

$$v_{\max} = \sqrt[3]{\frac{6 \cdot 62,5 \cdot 10^3}{1,2 \cdot 2,5}} \approx 10 \cdot \sqrt[3]{\frac{6 \cdot 200}{3 \cdot 3}} \approx 10 \cdot \sqrt[3]{133} \approx 10 \cdot \sqrt[3]{125} \approx 50 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \approx \underline{180 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}}. \text{La}$$

valeur est raisonnable pour un véhicule de tourisme.

- L'énergie obtenue par combustion de l'essence est proportionnelle à la quantité d'essence brûlée, donc au volume. En première approximation, cette énergie est convertie en **énergie cinétique**, proportionnelle à V^2 , donc $x = 2$.
- Le fluide étant en écoulement incompressible, il y a **conservation du débit volumique** en régime stationnaire. En outre, la section du tube de courant est constante, donc la vitesse se conserve, et donc $v_1 = v_2$ et $dm_1 = dm_2$.
- La quantité de mouvement du système varie entre t et $t + dt$ de :

$$d\vec{p} = (\vec{p}_{A'B'CD} + \vec{p}_{CC'D'D}) - (\vec{p}_{AA'B'B} + \vec{p}_{A'B'CD}) \quad \blacksquare \quad (3)$$

(il n'y a pas de dépendance temporelle car l'écoulement est stationnaire). On obtient par conséquent :

$$d\vec{p} = \vec{p}_{CC'D'D} - \vec{p}_{AA'B'B} = dm \cdot (\vec{v}_2 - \vec{v}_1), \quad \blacksquare \quad (4)$$

où l'on a posé $dm = dm_1 = dm_2$. Or, $dm = \rho_0 \cdot S_e \cdot v_1 \cdot dt$, donc :

$$d\vec{p} = \rho_0 \cdot S_e \cdot v_1 \cdot dt \cdot (\vec{v}_2 - \vec{v}_1), \quad \blacksquare \quad (5)$$

soit :

$$\boxed{\frac{d\vec{p}}{dt} = \rho_0 \cdot S_e \cdot v_1 \cdot (\vec{v}_2 - \vec{v}_1)} \quad \blacksquare \quad (6)$$

D'après la deuxième loi de Newton, $\frac{d\vec{p}}{dt} = \vec{F}_{\text{ext}}$, avec \vec{F}_{ext} la force exercée sur le tube de courant, soit finalement :

$$\boxed{\vec{F}_{\text{ext}} = \rho_0 \cdot S_e \cdot v_1 \cdot (\vec{v}_2 - \vec{v}_1)} \quad \blacksquare \quad (7)$$

- On déduit de ce qui précède, en vertu de la troisième loi de Newton, que :

$$\boxed{\vec{F}_{\text{air} \rightarrow \text{véhicule}} = \rho_0 \cdot S_e \cdot v_1 \cdot (\vec{v}_1 - \vec{v}_2)} \quad \blacksquare \quad (8)$$

On projette suivant la direction verticale :

$$F_{\text{air} \rightarrow \text{véhicule}}^N = -\rho_0 \cdot S_e \cdot v_1^2 \cdot (\sin(\alpha) + \sin(\beta)). \quad \blacksquare \quad (9)$$

Quelles que soient les valeurs de α et β , la force plaque la voiture au sol, l'appui étant d'autant plus important que la vitesse est grande.

Deuxième partie. Alimentation électrique.

Composition de l'atome de plomb

7. Le noyau de plomb contient 82 protons et $207 - 82 = \underline{125 \text{ neutrons}}$.

Diagramme potentiel-pH du plomb

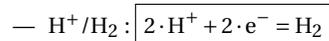
8. Nombre d'oxydation du plomb :

- PbO_2 : +IV;
- Pb_3O_4 : +8/3;
- Pb^{2+} , PbO et HPbO_2^- : +II;
- Pb : 0.

On place les espèces dans le diagramme potentiel-pH de sorte que le nombre d'oxydation croît avec E, et les espèces les plus basiques apparaissent aux pH les plus élevés. À noter que HPbO_2^- , ou $\text{PbO}(\text{OH})^-$ est plus basique que PbO .

Pb_3O_4 semble ne pas respecter la quantification de la charge. Dans les faits, il s'agit d'un **composé à valence mixte**, l'élément plomb étant présent à la fois aux degrés d'oxydation +II et +IV (deux Pb^{2+} et un Pb^{4+} pour quatre O^{2-}). **La quantification de la charge est donc bien respectée.**

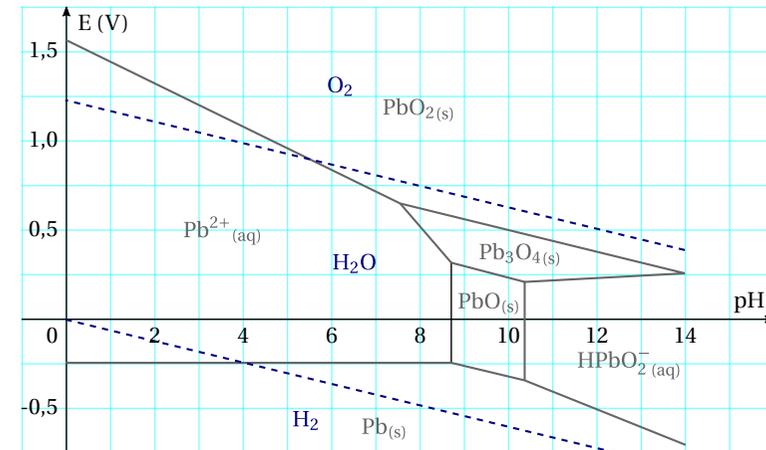
9. Couples de l'eau :



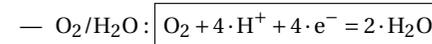
$$E = E^\circ(\text{H}^+ / \text{H}_2) + \frac{0,06}{2} \cdot \log\left(\frac{[\text{H}^+]^2 \cdot p^\circ}{p_{\text{H}_2}}\right), \quad \blacksquare \quad (10)$$

soit pour $p_{\text{H}_2} = p^\circ$:

$$\boxed{E = -0,06 \cdot \text{pH} \text{ (en V)}}. \quad \blacksquare \quad (11)$$



▲ Figure C2. Diagramme E – pH du plomb (allure).



$$E = E^\circ(\text{O}_2 / \text{H}_2\text{O}) + \frac{0,06}{4} \cdot \log\left(\frac{[\text{H}^+]^4 \cdot p_{\text{O}_2}}{p^\circ}\right), \quad \blacksquare \quad (12)$$

soit pour $p_{\text{O}_2} = p^\circ$:

$$\boxed{E = 1,23 - 0,06 \cdot \text{pH} \text{ (en V)}}. \quad \blacksquare \quad (13)$$

10. Cf. Fig. C2. En milieu acide, les domaines de $\text{Pb}_{(s)}$ et H_2O sont disjoints ; **le plomb est donc a priori oxydé**. Les demi-réactions redox associées s'écrivent :



soit la réaction :



En milieu basique, **le plomb est thermodynamiquement stable** (existence d'un domaine commun avec l'eau).

Solubilité du sulfate de plomb dans une solution d'acide sulfurique

11. On écrit l'équilibre de mise en solution du sulfate de plomb : $\text{PbSO}_4 = \text{Pb}^{2+} + \text{SO}_4^{2-}$. À l'équilibre, $K_s = [\text{Pb}^{2+}]_{\text{éq}} \cdot [\text{SO}_4^{2-}]_{\text{éq}}$. On suppose que la solubilité s est faible devant la concentration en acide sulfurique, de sorte que $[\text{SO}_4^{2-}]_{\text{éq}} \approx 0,5 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$. On a alors :

$$s = [\text{Pb}^{2+}]_{\text{éq}} = \frac{K_s}{[\text{SO}_4^{2-}]_{\text{éq}}} = \frac{1,6 \cdot 10^{-8}}{0,5} = 3,2 \cdot 10^{-8} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}. \quad \blacksquare \quad (16)$$

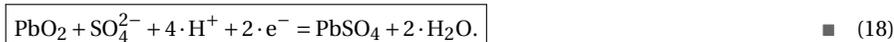
Le résultat est cohérent avec l'hypothèse faite.

Accumulateur au plomb en fonctionnement générateur

12. Couple $\text{PbO}_2/\text{PbSO}_4$:



soit :



Ce compartiment est le lieu d'une **réduction**, c'est donc la **cathode**.

Couple PbSO_4/Pb :

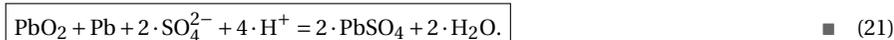


soit :



Ce compartiment est le lieu d'une **oxydation**, c'est donc l'**anode**.

On en déduit l'équation-bilan de décharge de la batterie :



13. Les ions H^+ intervenant dans le bilan global, la force électromotrice dépend du pH, avec :

$$e = e^\circ + \frac{0,06}{2} \cdot \log\left([\text{H}^+]^4 \cdot [\text{SO}_4^{2-}]^2\right). \quad \blacksquare \quad (22)$$

La force électromotrice est d'autant plus grande que la solution est acide, donc on a intérêt à utiliser de l'acide sulfurique **très concentré**. En outre, la résistance interne de la batterie en sera d'autant plus faible, ce qui est également un avantage.

Masse d'une batterie au plomb

14. Plus on met d'éléments en **série**, plus la **tension** délivrée est grande. À l'inverse, plus on met d'éléments en **parallèle**, plus la **capacité** est grande.
15. La tension à vide d'un élément est donnée par, d'après les courbes intensité-potential, $U_0^{\text{élément}} = 1,68 + 0,33 = 2,01 \text{ V}$ donc il faut **six cellules en série** pour atteindre 12 V.
- Remarque.** En pratique, du fait de la chute de tension en charge, il vaut mieux prévoir sept cellules pour maintenir une tension supérieure à 12 V lorsque la batterie débite.
16. Pour un équivalent de plomb consommé, deux équivalents d'électrons circulent dans le circuit. La capacité de la batterie est donnée par $Q = n_e \cdot \mathcal{F}$, avec n_e le nombre de moles d'électrons échangés, soit :

$$Q = 2 \cdot n_{\text{Pb}} \cdot \mathcal{F} = 2 \cdot \frac{m_{\text{Pb}}}{M_{\text{Pb}}} \cdot \mathcal{F}, \quad \blacksquare \quad (23)$$

d'où :

$$m_{\text{Pb}} = \frac{M_{\text{Pb}} \cdot Q}{2 \cdot \mathcal{F}}. \quad \blacksquare \quad (24)$$

Troisième partie. Aspects liés à la sécurité routière.

1 Limitations de vitesse

17. On propose deux méthodes équivalentes :

Avec le principe fondamental de la dynamique. Vue la gomme sur la route, on suppose qu'il y a glissement dans toute la phase de freinage.

\vec{N} s'oppose au poids, donc $T = f \cdot m \cdot g \approx 0,8 \cdot 1200 \cdot 10 \approx 9600 \text{ N}$.

On applique le principe fondamental de la dynamique à la voiture, dans le référentiel de la route, supposé galilé, projeté suivant la direction tangentielle à la trajectoire.

$$m \cdot \ddot{x} = -T, \quad \blacksquare \quad (25)$$

soit, en notant \dot{x}_0 la vitesse du véhicule avant freinage :

$$\dot{x}(t) = \dot{x}_0 - \frac{T}{m} \cdot t. \quad \blacksquare \quad (26)$$

La vitesse s'annule à t_0 tel que $\dot{x}_0 = T \cdot t_0 / m$, soit $t_0 = \dot{x}_0 \cdot m / T$.

On intègre une deuxième fois par rapport au temps, en choisissant arbitrairement $x(0) = 0$:

$$x(t) = -\frac{T}{2 \cdot m} \cdot t^2 + \dot{x}_0 \cdot t. \quad \blacksquare \quad (27)$$

La distance de freinage d est égale à $x(t_0)$, i.e. :

$$d = \dot{x}_0 \cdot \frac{m}{T} - \frac{T}{2 \cdot m} \cdot \frac{\dot{x}_0^2 \cdot m^2}{T^2} = \frac{\dot{x}_0^2 \cdot m}{2 \cdot T}, \quad \blacksquare \quad (28)$$

soit :

$$\dot{x}_0 = \sqrt{\frac{2 \cdot T \cdot d}{m}}. \quad \blacksquare \quad (29)$$

La distance de freinage est délicate à évaluer compte-tenu de l'angle de la prise de vue. Elle correspond grosso modo à cinq périodes sur les bandes larges du bas-côté, soit $d \approx 32,5$ m (on pourrait très certainement donner une valeur plus élevée, ndlr). On en déduit :

$$\dot{x}_0 \approx \sqrt{\frac{2 \cdot 10000 \cdot 30}{1200}} \approx \sqrt{500} \approx 20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \approx \underline{72 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}}. \quad \blacksquare \quad (30)$$

La valeur obtenue est **en accord avec la législation** sur route départementale (mais si on prend une valeur plus importante pour d , on risque dépasser la limite).

Avec le théorème de l'énergie cinétique. Les hypothèses sont les mêmes que ci-dessus. On évalue le travail de la composante tangentielle de la réaction du support pendant la phase de freinage :

$$W = -T \cdot d. \quad \blacksquare \quad (31)$$

La vitesse finale étant nulle, la variation d'énergie cinétique au cours du mouvement est donnée par :

$$\Delta E_c = -\frac{1}{2} \cdot m \cdot \dot{x}_0^2 = W, \quad \blacksquare \quad (32)$$

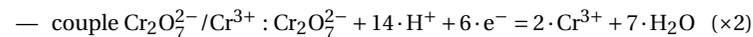
soit :

$$\dot{x}_0 = \sqrt{\frac{-2 \cdot W}{m}} = \sqrt{\frac{2 \cdot T \cdot d}{m}}. \quad \blacksquare \quad (33)$$

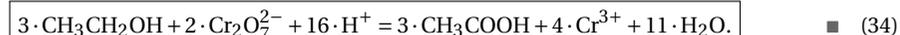
On retrouve – évidemment – le même résultat.

2 Contrôle d'alcoolémie

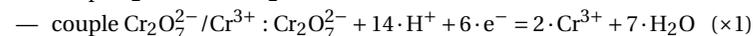
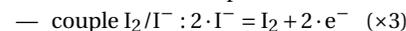
18. Réaction de l'éthanol sur le dichromate de potassium :



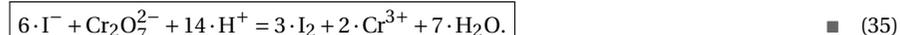
d'où l'équation-bilan :



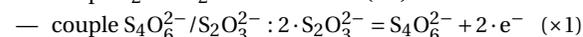
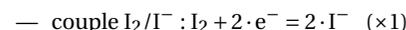
Réaction de l'iodure de potassium sur le dichromate de potassium :



d'où l'équation-bilan :



Réaction du diiode sur le thiosulfate de sodium :



d'où l'équation-bilan :



19. Le diiode est **brun/jaune** en solution aqueuse. La solution va donc **devenir incolore** à l'équivalence (suivi **colorimétrique**).

20. Reprenons le mode opératoire étape par étape :

— La quantité d'alcool est donnée par $n_0 = C_0 \cdot V_0$, répartie (après distillation) dans un volume V_2 , soit $C_2 = \frac{C_0 \cdot V_0}{V_2}$.

— On fait réagir avec le dichromate de potassium et on dilue. On part de $n_4 = C_2 \cdot V_4 = \frac{C_0 \cdot V_0 \cdot V_4}{V_2}$ moles d'éthanol. Si n_{Cr} est la quantité d'ions dichromate

ajoutés dans la fiole, il en reste après la réaction $n'_{\text{Cr}} = n_{\text{Cr}} - \frac{2}{3} \cdot n_4 = n_{\text{Cr}} - \frac{2 \cdot C_0 \cdot V_0 \cdot V_4}{3 \cdot V_2}$.

— On obtient après réaction sur les iodures $3 \cdot n'_{\text{Cr}}$ moles de diiode dont on détermine la valeur par dosage : $C_6 \cdot V_{\text{éq6}} = 6 \cdot n'_{\text{Cr}}$, soit : $n'_{\text{Cr}} = \frac{C_6 \cdot V_{\text{éq6}}}{6}$.

— On détermine n_{Cr} par réaction « à blanc » : $n_{\text{Cr}} = \frac{C_6 \cdot V_{\text{éq7}}}{6}$.

Au final, en combinant les trois dernières relations, on obtient :

$$\frac{C_6 \cdot V_{\text{éq6}}}{6} = \frac{C_6 \cdot V_{\text{éq7}}}{6} - \frac{2 \cdot C_0 \cdot V_0 \cdot V_4}{3 \cdot V_2}, \quad \blacksquare \quad (37)$$

soit :

$$C_0 = \frac{1}{4} \cdot C_6 \cdot \frac{V_2 \cdot (V_{\text{éq7}} - V_{\text{éq6}})}{V_0 \cdot V_4}. \quad \blacksquare \quad (38)$$

Quatrième partie. Aspects communication.

1 Communication radio, modulation d'amplitude

21. L'amplitude de l'enveloppe varie entre $U \cdot (1 - m)$ et $U \cdot (1 + m)$. Graphiquement, on lit $U \cdot (1 - m) \approx 3 \text{ V}$ et $U \cdot (1 + m) \approx 7 \text{ V}$, soit $\frac{1 - m}{1 + m} \approx \frac{3}{7}$, i.e. $7 - 7 \cdot m \approx 3 + 3 \cdot m$ d'où $m \approx 0,4$.

Pour l'enveloppe, $T_0 \approx 6,5 \text{ ms}$ d'où $f_0 \approx \frac{10000}{65} \approx \frac{10000}{200/3} \approx 150 \text{ Hz}$.

Pour la porteuse, $20 \cdot T_p \approx 12 \text{ ms}$ d'où $f_p \approx \frac{20000}{12} \approx 1,7 \text{ kHz}$.

22. k s'exprime en V^{-1} . Pour le AD633, généralement utilisé en Travaux Pratiques, $k = 0,1 V^{-1}$.

23. En sortie de multiplieur, on a :

$$\begin{aligned} s_m(t) &= k \cdot U \cdot (1 + m \cdot \cos(\omega_0 \cdot t)) \cdot \cos(\omega_p \cdot t) \cdot E_p \cdot \cos(\omega_p \cdot t) \\ &= k \cdot U \cdot E_p \cdot (\cos(\omega_p \cdot t) + m \cdot \cos(\omega_0 \cdot t) \cdot \cos(\omega_p \cdot t)) \cdot \cos(\omega_p \cdot t) \\ &= \frac{k \cdot U \cdot E_p}{4} \cdot (m \cdot \cos((2 \cdot \omega_p + \omega_0) \cdot t) + m \cdot \cos((2 \cdot \omega_p - \omega_0) \cdot t) \\ &\quad + 2 \cdot m \cdot \cos(\omega_0 \cdot t) + 2 \cdot \cos(2 \cdot \omega_p \cdot t) + 2). \end{aligned} \quad \blacksquare \quad (39)$$



▲ Figure C3. Allure du spectre.

24. Pour récupérer le signal (composante à ω_0), il faut réaliser un filtrage passe-bas ($\omega_c \gtrsim \omega_0$) puis éventuellement un filtrage passe-haut ($\omega_c \ll \omega_0$) pour éliminer la composante continue.

2 Communication radio, modulation de fréquence

25. La rétroaction sur la borne inverseuse est un indice de stabilité du montage.

26. Ayant $i_+ = i_- = 0$, on peut appliquer la relation du pont diviseur de tension :

$$V_+ = V_d \cdot \frac{R_4}{R_3 + R_4}, \quad \blacksquare \quad (40)$$

et :

$$(V_- - V_m) = (V_s - V_m) \cdot \frac{R_1}{R_1 + R_2}, \quad \blacksquare \quad (41)$$

d'où :

$$V_- = V_m + \frac{R_1}{R_1 + R_2} \cdot (V_s - V_m) = V_m \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2} + V_s \cdot \frac{R_1}{R_1 + R_2}. \quad \blacksquare \quad (42)$$

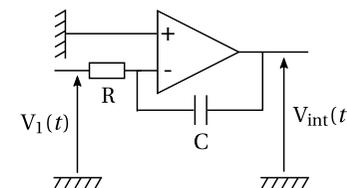
En régime linéaire, $V_+ = V_-$ donc :

$$V_d \cdot \frac{R_4}{R_3 + R_4} = V_m \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2} + V_s \cdot \frac{R_1}{R_1 + R_2}. \quad \blacksquare \quad (43)$$

On prend $R_1 = R_2 = R_3 = R_4$. La relation précédente se simplifie alors en :

$$V_s = V_d - V_m. \quad \blacksquare \quad (44)$$

27. On peut réaliser un montage intégrateur comme suit :



▲ Figure C4. Montage intégrateur.

On a alors $V_{\text{int}} = -\frac{1}{j \cdot R \cdot C \cdot \omega} \cdot V_1$, soit en notation réelle :

$$\frac{dV_{\text{int}}}{dt}(t) = -\frac{1}{R \cdot C} \cdot V_1(t). \quad \blacksquare \quad (45)$$

Remarque. En pratique, la tension de décalage de l'ALI (continue) crée une dérive de la tension de sortie de l'intégrateur. On préfère donc un montage dit « pseudo-intégrateur », dans lequel on ajoute un conducteur ohmique de grande résistance (e.g. 10 MΩ) en parallèle avec le condensateur.

28. On connaît $V_1 = V_{1m} \cdot \cos(\omega_1 \cdot t)$ et $V_2 = V_{2m} \cdot \cos(\omega_2 \cdot t)$, d'où :

$$V_d = V_{2m} \cdot \cos\left(\omega_2 \cdot t - \frac{\pi}{2}\right) = V_{2m} \cdot \sin(\omega_2 \cdot t), \quad \blacksquare \quad (46)$$

et $V_m(t) = k \cdot V_{\text{int}}(t) \cdot V_2(t)$ avec $V_{\text{int}}(t) = -\frac{1}{R \cdot C} \cdot \frac{V_{1m}}{\omega_1} \cdot \sin(\omega_1 \cdot t)$, d'où :

$$V_m(t) = -k \cdot \frac{1}{R \cdot C \cdot \omega_1} \cdot V_{1m} \cdot V_{2m} \cdot \sin(\omega_1 \cdot t) \cdot \cos(\omega_2 \cdot t). \quad \blacksquare \quad (47)$$

La tension en sortie est donc donnée par :

$$\begin{aligned} V_s(t) &= V_d(t) - V_m(t) \\ &= V_{2m} \cdot \sin(\omega_2 \cdot t) + k \cdot \frac{1}{R \cdot C \cdot \omega_1} \cdot V_{1m} \cdot V_{2m} \cdot \sin(\omega_1 \cdot t) \cdot \cos(\omega_2 \cdot t) \\ &= V_{2m} \cdot \left(\sin(\omega_2 \cdot t) + k \cdot \frac{1}{R \cdot C \cdot \omega_1} \cdot V_{1m} \cdot \sin(\omega_1 \cdot t) \cdot \cos(\omega_2 \cdot t) \right). \end{aligned} \quad \blacksquare \quad (48)$$

Or, d'après le formulaire, $a \cdot \cos(\omega_2 \cdot t) + b \cdot \sin(\omega_2 \cdot t) = \sqrt{a^2 + b^2} \cdot \sin(\omega_2 \cdot t + \varphi)$ avec $\tan(\varphi) = a/b$, donc en posant $a = \frac{k \cdot V_{1m}}{R \cdot C \cdot \omega_1} \cdot \sin(\omega_1 \cdot t)$ et $b = 1$, on obtient :

$$V_s(t) = V_{2m} \cdot \sqrt{1 + \epsilon^2 \cdot \sin^2(\omega_1 \cdot t)} \cdot \sin(\omega_2 \cdot t + \varphi), \quad \blacksquare \quad (49)$$

$$\text{avec } \tan(\varphi) = \frac{k \cdot V_{1m}}{R \cdot C \cdot \omega_1} \cdot \sin(\omega_1 \cdot t) \quad \text{et} \quad \epsilon = \frac{k \cdot V_{1m}}{R \cdot C \cdot \omega_1}.$$

29. Pour ϵ et φ petits devant 1, $V_s(t) = V_{2m} \cdot \sin(\omega_2 \cdot t + \varphi)$ avec $\varphi \approx \frac{k \cdot V_{1m}}{R \cdot C \cdot \omega_1} \cdot \sin(\omega_1 \cdot t)$, soit :

$$m = \frac{k \cdot V_{1m}}{R \cdot C \cdot \omega_1}. \quad \blacksquare \quad (50)$$

30. La phase instantanée est donnée par $\Psi(t) = \omega_2 \cdot t + \frac{k \cdot V_{1m}}{R \cdot C \cdot \omega_1} \cdot \sin(\omega_1 \cdot t)$ donc :

$$\Omega(t) = \frac{d\Psi}{dt}(t) = \omega_2 + \frac{k \cdot V_{1m}}{R \cdot C} \cdot \cos(\omega_1 \cdot t), \quad \blacksquare \quad (51)$$

soit :

$$\Omega(t) = \omega_2 + \frac{k}{R \cdot C} \cdot V_1(t). \quad \blacksquare \quad (52)$$

Il existe une relation linéaire entre la fréquence instantanée du signal modulé et le signal à transmettre, d'où le terme « modulation de fréquence ».

3 Effet de l'ionosphère, positionnement satellite et taille des antennes

31. Pour $\omega < \omega_p$, il n'y a **pas propagation** de l'onde dans l'ionosphère, donc pas de communication possible avec un satellite. Par contre, tout le rayonnement est réfléchi, ce qui permet, par suite de réflexions entre la surface des océans et l'ionosphère, de transporter des informations sur de grandes distances à la surface de la Terre (**propagation ionosphérique**). La fréquence f_1 correspond donc à la radio MA, et la fréquence f_3 à la communication par satellite.
32. 100 MHz correspond à $\lambda = c/f \approx 3$ m, soit une antenne de environ 75 cm.

L'antenne d'un GPS est plus courte (quelques centimètres, parfois noyée dans le boîtier), soit une fréquence environ 10 fois plus grande *i.e.* environ 1 GHz, ce qui convient pour une communication par satellite.