

MP33 – RÉGIMES TRANSITOIRES

23 Février 2017

Camille Eloy & David Dumont

*J'ai bien peur que l'étape transitoire nécessaire entre le
communisme et le capitalisme ne reste l'alcoolisme.*

JACK WOMACK

Bibliographie

- ⚡ *Électronique expérimentale*, **Krob** → Circuit RLC
- ⚡ *Thermodynamique et applications*, **Quaranta** → expérience du glycérol (théorie et expérimental)
- II**
- ⚡ *Exercices et problèmes de thermodynamique*, → Rückardt et diffusion du glycérol,
- Diu**
- ⚡ *Précis Bréal Thermodynamique PCSI*, **G. Fa-** → Expérience de Rückardt
verjon
- ⚡ *BUP n Σ 808 p 1615*, **le prof de sup préféré** → la théorie de Rückardt, en particulier l'origine des pertes
de Benjamin C. (attention erreur de calculs)
- ⚡ *Notice du tube de précision* → expérience de Rückardt
- ⚡ *Physique expérimentale*, **Jolidon** → Temps de réponse de la photorésistance.

Table des matières

1 Les régimes transitoires : circuit RLC	1
1.1 Les différents régimes	2
1.2 Le régime pseudo-périodique	3
1.3 La réponse impulsionnelle	3
2 Transitoire diffusif	3
3 L'expérience de Rückardt.	4
4 Temps de réponse d'une photorésistance	5

Introduction

Face à un problème nouveau, le physicien commence d'abord par étudier le régime stationnaire, faisant fi de la dépendance temporelle puisque cette approximation simplifie souvent bien les équations. De manière tout aussi générale, suite à une perturbation (de nouvelles conditions aux limites, des excitations...), un système physique évolue de son état d'équilibre initial vers un nouvel état d'équilibre¹. Ces états d'équilibre sont appelés états stationnaires s'ils sont périodiques ou permanents s'ils sont véritablement indépendants du temps. Néanmoins la physique ne se réduit pas à l'étude de ces états aux temps longs : le régime intermédiaire est lui aussi riche en informations. On appelle *régime transitoire* l'évolution du système entre deux états d'équilibre. Ce montage se destine à montrer les différents régimes transitoires qui peuvent apparaître dans différents domaines de la physique et sur des temps plus ou moins longs. L'intérêt des régimes transitoires pour les appareils de mesures sera lui aussi entrevu.

⚡ *Le circuit RLC rassemble les différents types de régimes transitoires observables. Commençons par étudier ces 3 régimes.*

1 Les régimes transitoires : circuit RLC

⚡ *Électronique expérimentale*, Krob p.47

Toute la diversité des régimes transitoires d'un SLIT (Système Linéaire Indépendant du Temps) est contenue dans un circuit RLC. C'est pourquoi on étudie un tel circuit. L'intérêt du montage considéré (représenté FIGURE 1) est double. D'une part, pour un RLC classique² comme $Q = \frac{1}{R} \sqrt{\frac{L}{C}}$, si un facteur de qualité Q important est nécessaire,

1. On dirait presque qu'on fait de la chimie
2. Un RLC quantique ça existe ?

il faut choisir à la fois une résistance faible R , un condo³ de faible capacité et une bob⁴ de forte inductance ce qui pose plusieurs problèmes :

- la résistance d'entrée R doit être grande devant 50Ω pour éviter les problèmes d'adaptation d'impédance avec le GBF,
- la capa du condo doit être grande devant les capa des coax,
- plus la bob est grande et moins sa résistance interne est négligeable.

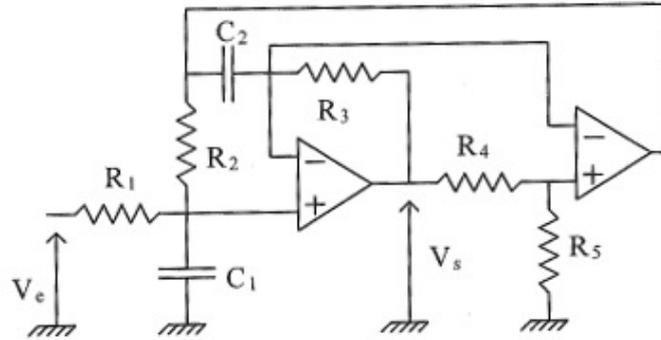


Fig. 1 Ce montage est réalisé avec $R_2 = R_3 = R_4 = R_5 \equiv R = 10k\Omega$ et $C_1 = C_2 \equiv C = 10nF$. La résistance R_1 est choisie variable. La tension d'entrée est V_e et la tension de sortie est V_s .

Le montage de la FIGURE 1 s'affranchit de ces ennuis en éliminant la bob et permettant l'emploi de grande résistance d'entrée. On a alors

$$\begin{cases} Q = \frac{R_1}{R} \\ \omega_0 = \frac{1}{RC} \end{cases}$$

L'équation d'évolution définissant l'expression des facteurs Q et ω_0 est :

$$\frac{d^2V_s}{dt^2} + \frac{\omega_0}{Q} \frac{dV_s}{dt} + \omega_0^2 = H_o \frac{\omega_0}{Q} \frac{dV_e}{dt}$$

1.1 Les différents régimes

Le facteur de qualité détermine le régime du transitoire :

- $Q < 1/2$ On parle de *régime apériodique*. Il n'y a pas d'oscillations entre les états initial et final,
- $Q = 1/2$ C'est le cas limite où l'on parle de *régime critique*. Si Q diffère de $1/2$ alors on est dans un des deux autres régimes,
- $Q > 1/2$ C'est le régime pseudo-périodique : des oscillations amorties sont observées pendant le transitoire. Le facteur de qualité Q donne l'ordre de grandeur du nombre d'oscillations.

🔧 Mesure de la résistance critique R_C

🔗 Programme de CE1

⌚ 2min

En faisant varier la valeur de la résistance R_1 (boîte à décades) on observe les 3 régimes et on détermine la résistance critique R_C pour laquelle on bascule du régime apériodique au régime pseudo-périodique.

On obtient $R_C = \dots \pm \dots k\Omega$. Cette résistance critique doit donner une facteur de qualité $Q = 1/2$. Comme $Q = \frac{R_1}{R}$, on s'attend à une résistance critique $R_C = \frac{R}{2} \sim 5k\Omega$. On retrouve bien^a cette valeur ou à défaut l'ordre de grandeur.

^a. parce que l'expérimentateur est badass.

🌀 On a souvent l'habitude de déterminer les caractéristiques d'un système dans le régime stationnaire. Il est tout à fait possible de faire de même en régime transitoire

3. condensateur d'après le fils de Gayvalet

4. bobine d'après le fils de Gayvalet

1.2 Le régime pseudo-périodique

On se place à $Q > 1/2$ pour observer les oscillations amorties du régime pseudo-périodique. Il est tout à fait possible d'estimer les caractéristiques du système (ici Q et la pulsation de résonance ω_0) en étudiant le transitoire. Dans cette optique, on mesure le décrément logarithmique δ défini par

$$\delta = \frac{1}{n} \ln \left(\frac{V_s(t)}{V_s(t + n\tau_P)} \right)$$

ainsi que la pseudo-période τ_P . On peut montrer que ces deux grandeurs sont reliées au facteur Q et à la pulsation de résonance ω_0 par les expressions

$$Q = \frac{1}{2} \sqrt{1 + \frac{4\pi^2}{\delta^2}} \quad \text{et} \quad \omega_0 = \frac{\delta}{\tau_P} \sqrt{1 + \frac{4\pi^2}{\delta^2}} = \frac{2Q\delta}{\tau_P}.$$

☛ Estimation de Q et de ω_0

☛ Krob p.50

⊗ 7min

On mesure le décrément logarithmique pour plusieurs périodes et on moyenne. La pseudo-période est aussi déterminée sur plusieurs périodes pour minimiser l'erreur.

Au final, on obtient $\tau_P = \dots \pm \dots s$ et $\delta = \dots \pm \dots$. Et $Q = \dots \pm \dots$ et $\omega_0 = \dots \pm \dots rad.s^{-1}$.

⚡ La caractérisation peut se faire par des mesures ponctuelles comme on vient de le faire, on peut aussi le caractériser complètement en mesurant sa réponse impulsionnelle.

1.3 La réponse impulsionnelle

☛ Diagramme de Bode

☛ Fait en techno en classe de CE2

⊗ 6 min

On envoie en entrée du circuit un échelon de tension (un créneau de basse fréquence) et l'on mesure la tension de sortie v_s avec Latis-Pro. Une petite TF et l'on trace son amplitude multipliée par la fréquence en fonction de la fréquence. On obtient le diagramme de Bode d'un passe bande. On mesure la fréquence de résonance f_0 ainsi que la bande passante. On retrouve alors le facteur de qualité $Q = \frac{f}{\Delta f}$.

On obtient $\omega_0 = \dots \pm \dots rad.s^{-1}$ et $Q = \dots \pm \dots$. On retrouve les valeurs mesurées précédemment.

⚡ Les régimes transitoires que l'on vient d'étudier s'établissent sur des temps caractéristiques inférieurs à la seconde (suivant la fréquence de travail). Il existe néanmoins des régimes transitoires s'étalant sur des temps bien différents, de l'ordre de l'heure par exemple pour les phénomènes de diffusion.

2 Transitoire diffusif

☛ Quaranta II p.466

☛ Exercices et problèmes de thermodynamique, Diu p.357

L'expérience consiste à observer la diffusion du glycérol dans de l'eau⁵. Les deux phases diffusent alors selon l'axe vertical Oz : la concentration molaire en glycérol dépend donc de l'altitude z et du temps t : $c = c(z, t)$. L'influence de la pesanteur est négligée et on suppose que l'indice optique de la solution s'exprime comme la moyenne pondérée des indices des deux composants purs : Il faut distinguer les erreurs transitoires et passagères des erreurs permanentes.

$$n = (1 - c)n_e + cn_g.$$

Ainsi, l'indice optique de la solution dépend, tout comme la concentration c , de l'altitude z et du temps t . C'est pourquoi à la traversée de la cuve, un rayon lumineux est dévié dans le plan vertical d'un angle θ par rapport au trajet

5. On connaît ça depuis tout petit : c'est la diffusion d'un sirop dans de l'eau!

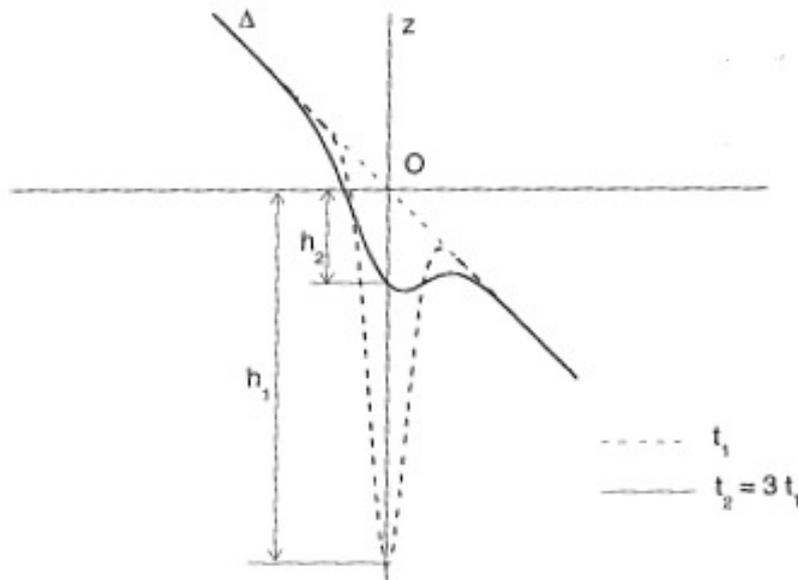


Fig. 2 Désolé pour la qualité du schéma... Il a au moins le mérite de fixer les idées. La déviation s'observe principalement au centre. Les mesures de la hauteur h se font le long de l'axe Oz. En fait on regarde les variations de l'indice en un point précis proche de l'interface.

qu'il aurait eu dans une cuve homogène. On peut montrer que

$$\theta(z, t) = -e(n_g - n_e) \frac{\exp -z^2/4Dt}{\sqrt{4\pi Dt}}.$$

L'observation de cette déviation est rendue possible par l'emploi d'une nappe laser inclinée à 45° par rapport à la verticale et envoyée sur la cuve. Un écran est ensuite placé à une distance fixée de la cuve. La FIGURE 2 donne un aperçu de ce que l'on observe. La hauteur h est donnée par l'équation

$$h(t) = \frac{eL(n_g - n_e)}{\sqrt{4\pi Dt}}.$$

🔦 Mesure du coefficient de diffusion du glycérol

🔗 Quaranta p466

⌚ 7min

L'expérience peut se réaliser avec du glycérol pur si vous avez quelques jours de liberté. Par nécessité temporelle^a, on travaille ici avec un mélange eau-glycérol à 60% en glycérol^b. Reste à connaître l'indice (noté n_{eg}) d'un tel mélange : conformément aux hypothèses précédemment énoncées, on prend ici $n_{eg} = 0.6n_g + 0.4n_e$.

Protocole : remplir à une grosse moitié le récipient prévu à cet effet. Ajouter avec délicatesse et précaution un ou deux centimètres de mélange eau-glycérol au fond de la cuve à l'aide d'une pipette de chimie. Utiliser un bout de cylindre en verre pour « faire » la nappe laser. Tracer un trait vertical et passant par le pic à $t=0$ puis repérer l'intersection entre la nappe laser et cet axe à des temps donnés. Tracer $\left(\frac{eL(n_{eg}-n_e)}{\sqrt{4\pi h}}\right)^2 = f(t)$. On attend une droite de pente D . Le handbook donne $D = 1.06 \times 10^{-5} \text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ pour du glycérol pur dans de l'eau à 25°C . On obtient $D = \dots \pm \dots \text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$

^a. Nous avons envisagé de nous placer dans un cadre relativiste afin de s'affranchir de cette contrainte mais la mise en place de cette idée s'est révélée délicate. Si vous avez des propositions...

^b. molaire ou massique? Aucune indication sur le facon mais on supposera molaire dans le doute... et par simplicité pour la suite!

🌀 Là encore, le régime transitoire permet de caractériser le système. Ce régime transitoire est dépourvu d'oscillations, c'est une régime aperiodique. Étudions à présent un régime transitoire pseudo-périodique.

3 L'expérience de Rückardt.

🔗 Précis Bréal Thermodynamique PCSI p.96

- ⚡ Exercices et problèmes de thermodynamique, Diu p.175
- ⚡ BUP 808 p.1615
- ⚡ Notice du tube de précision

Considérons une cuve de grande taille et surmontée d'un tube de section a muni d'une masselote de masse m parfaitement ajustée de sorte à ce que les frottements soient négligeables⁶ et que l'air ne puisse passer entre le tube et la masselote.

La pression à l'intérieur de la cuve s'écrit

$$p_0 = p^{ex} + \frac{mg}{a}.$$

En supposant que les déplacements de gaz se font de manière adiabatique et réversible, on peut montrer en appliquant le PFD à la masselote

$$m \frac{d^2 z}{dt^2} = -\frac{\gamma a^2 p_0}{V_0} (z - z_0),$$

où V_0 est le volume de la cuve (le volume du tube est négligé) et z est la position de la masselote. Cette dernière oscille donc autour de sa position d'équilibre z_0 avec une pulsation ω telle que $\omega^2 = \frac{\gamma a^2 p_0}{m V_0}$. Ainsi, la mesure de cette pulsation ω fournit le rapport des capacités calorifiques :

$$\gamma = \frac{m V_0}{a^2 p_0} \omega^2$$

🔧 Mesure du rapport des capacités calorifiques γ .

⚡ La notice de la manip

⌚ 7min

On mesure la pression intérieure avec un pressiomètre^a numérique. On observe des oscillations amorties au niveau de la pression, causées par les oscillations de la masselote. À noter que les écarts à la pression moyenne restent faibles (de l'ordre de l'hPa ce qui correspond à l'incertitude du capteur. Cela explique la mocheté de certains signaux... Néanmoins on peut estimer la pseudo-période des oscillations et remonter à $\gamma = 1.4$ pour un gaz parfait.

On mesure $\gamma = \dots \pm \dots$ et on est content ou pas!



a. l'appareil est bien référencé en tant que pressiomètre et non comme un manomètre dans la collection. Quelle différence ?
 Définition du Web : Pressiomètre=Appareil utilisé en géotechnique permettant de mesurer la résistance du sol. Manomètre (Larousse)=Appareil destiné à mesurer la pression d'un fluide. À mon humble avis ya comme un souci de référencement dans la collection....

🌀 *Du point de vue de l'étude physique, les régimes transitoires s'établissent sur des temps plus ou moins longs et permettent de caractériser les systèmes. Une fois qu'un phénomène est bien compris, il est courant de l'utiliser pour en faire un appareil de mesure ou pour asservir un système. Dans ce cas, le régime transitoire détermine son temps de réponse.*

4 Temps de réponse d'une photorésistance

⚡ Jolidon p.167

Le régime transitoire d'un capteur détermine son temps caractéristique de réponse. Plus le transitoire est court et plus le capteur est rapide. On cherche ici à faire une mesure de ce temps caractéristique pour la photorésistance. Pour ce faire, on dispose côte-à-côte une photorésistance et une photodiode en face d'un stroboscope.

On observe à l'oscilloscope les signaux issus de la photorésistance et de la photodiode. Cette dernière - dont le temps de réponse est beaucoup plus court que pour la photorésistance - permet de vérifier que le temps de montée et de descente des flashes lumineux produits par le stroboscope sont tout à fait négligeables face au temps de réponse de la photorésistance. On fait ensuite une simple mesure des temps de montée τ_m et de descente τ_d de la photorésistance qui doivent être de l'ordre de la dizaine de μs . On peut éventuellement discuter de la non-symétrie des régimes transitoires de montée et de descente.

6. devant quoi??

Mesure du temps de réponse d'une photorésistance

 Jolidon p.167 + Programme de CM1 option optique

 3min



L'obtention des réponses de la photorésistance et de la photodiode ne se fait pas en prenant directement la tension à leur borne ^a. À noter qu'on réalise la manip avec un stroboscope et non avec un laser non polarisé comme cela est fait dans le Jolidon. Néanmoins les montages électriques du Jolidon restent valables et sont décrit brièvement ici.

Pour la photodiode : sa réponse est un courant. Elle doit aussi être polarisée. La brancher en série avec une résistance et l'alimenter avec une tension continue de quelques volts. Prendre la tension aux bornes de la résistance. Pour la photorésistance : Le montage électrique est un amplificateur inverseur dont une des résistances est remplacée par la photorésistance.

On mesure $\tau_m = \dots \pm \dots$ et $\tau_d = \dots \pm \dots$ pour la photorésistance. On s'attend à des temps de l'ordre de 30 ms.

^a. Le rédacteur de ce papier le croyait naïvement...

Conclusion

Au cours de ce montage, nous avons exposé les 3 types de régimes transitoires qui peuvent apparaître (apériodique, critique, pseudo-périodique) et nous avons constaté qu'ils n'apparaissent pas seulement aux temps courts mais aussi sur des temps longs. Ces régimes transitoires ne sont pas seulement limitants puisqu'ils sont porteurs d'informations sur le système. En ce qui concerne les capteurs, la connaissance de leur régime transitoire est primordiale puisque cela permet de déterminer la limite de détection d'un appareil de mesure.

Par ailleurs, nous n'avons qu'effleuré la notion d'asservissement capitale en ingénierie : un transitoire pseudo-périodique est bien souvent impensable dans ce domaine car cela créerait des oscillations qui pourraient casser certaines pièces. En général, l'idéal reste le régime critique voire un régime pseudo-périodique avec un dépassement très faible si le système asservi le supporte.