MP33 : Régimes transitoires – Renaud Mathevet

1) Rapports du jury

2017, 2015, 2013, 2010, 2009 : Il existe des régimes transitoires dans plusieurs domaines de la physique et pas uniquement en électricité. Bien que le régime transitoire des systèmes linéaires, évoluant en régime de réponse indicielle, puisse parfois se ramener à l'étude d'un circuit RC, la simple mesure du temps de réponse d'un tel circuit ne caractérise pas l'ensemble des propriétés des régimes transitoires. D'autre part, l'établissement de régimes forcés peut conduire à une physique bien plus variée que le retour à une situation d'équilibre. Varier les échelles de temps.

2012, 2011 : Les régimes transitoires ne se réduisent pas à la relaxation des systèmes linéaires en électricité. Par ailleurs, l'établissement de régimes forcés peut conduire à une physique bien plus variée que le retour à une situation d'équilibre.

2008 : Ce nouveau montage a été peu choisi cette année. Notons pourtant que les régimes transitoires interviennent dans de nombreux domaines de la physique et pas seulement en électricité !

Conclusion : par que de l'élec, pas que de la réponse indicielle

2) Eléments de contexte

a. Soyons modestes

C'est très clairement un des montages les plus difficiles de l'année et le jury exige de la diversité… dur, dur… voir les books ENS, les montages trop ambitieux se sont soldés par des catastrophes.

b. Mais ça ne dispense pas de réfléchir

Reprenons un langage un peu universel : de quoi parle-t-on ? On a un système qui répond à une certaine excitation. Le système est en régime établi, il y a « longtemps » que l'on n'a pas modifié l'excitation. A t=0 on modifie l'excitation et, après un certain temps dit TEMPS DE RELAXATION, le système rejoint un nouveau régime établi. Les termes sont volontairement généraux :

- L'excitation peut être constante (éventuellement nulle) ou dépendant du temps (rampe, harmonique…)
- La modification brutale (réponse indicielle, salve de sinusoïdes...) ou progressive (rampe entre deux valeurs…)
- Le système, n'importe quoi : un ou plusieurs degrés de liberté (en électronique, oscillateurs méca…) ou continu (thermique : chauffage d'une barre…), linéaire ou pas (on bascule l'interrupteur des tubes fluo pour éclairer une pièce…)

Bref, le sujet est infini… il convient donc de simplifier pour généraliser davantage !!!

c. Linéaires pour faire simple et universel

On se restreint aux systèmes LINEAIRES. Comment se fait-il qu'un tel système soumis, à une perturbation prolongée dans le temps, ne diverge pas ? On échange pourtant continument de l'énergie… le rôle de la DISSIPATION est central. Le régime établi correspond à la réponse pour laquelle la PUISSANCE dissipée en moyenne est égale à la PUISSANCE moyenne fournie par l'excitation.

Lorsque l'on bascule entre deux régimes d'excitation, on commute entre deux états du système pour lesquels l'ENERGIE du système est différente. Il apparait naturellement un temps de relaxation comme quotient de la DIFFERENCE D'ENERGIE des deux états et de la PUISSANCE DISSIPEE par le système…

Dans les systèmes linéaires, cette puissance moyenne est proportionnelle (par définition…) aux différences d'énergie (voir montage et leçon phénomènes de transport : le courant est proportionnel au gradient). Les régimes transitoires sont naturellement exponentiels (que pourraient-ils être d'autre ?) et le temps de relaxation proportionnel à la variation d'énergie et inversement à la dissipation. Le grand classique, le système du 1er ordre : circuit RC, masse thermique, baignoire percée… L'énergie stockée est $1/2CU^2$ la dissipation U^2/R le temps caractéristique proportionnel à $CU^2 / (U^2/R)=RC$.

d. Non linéaire pas trop difficile

Naturellement, puisque l'on développe une théorie linéaire, ce temps caractéristique peut-être négatif et le système diverge alors exponentiellement. Il peut exploser ou rejoindre un nouveau régime établi à la faveur de non linéarités : voir montage systèmes bouclés, oscillateurs à R<0, ce sont les NON-LINEARITES de l'AO qui stabilisent la sortie quasi sinusoïdale. Ce cas, très important en pratique, ne donne pas lieu à une approche systématique : évidemment le comportement dépend du gain (identifié à |R|C ici) mais aussi des tensions d'alimentation, de la bande passante de l'AO….

e. Non linéaire, la variété est infinie…

Sans aller jusqu'à l'allumage des tubes fluo, on a tout un tas de saturations différentes. Sur l'exemple précédent on a une saturation en tension de l'AO. Mais on a aussi une saturation en vitesse de l'AO, le slew rate, dV/dt ne peut dépasser une certaine valeur… en fait il y a des capas de sortie parasites et c'est une limitation en courant de l'étage de sortie qui empêche de les charger plus vite…

f. Conclusion

Pour les systèmes linéaires : la dissipation vs l'énergie stockée contrôlent le temps de relaxation
Pour les systèmes non-linéaires : diverses saturations contrôlent amplitude, vitesse (accélération ?)… maximales et conditionnent le régime établi et le temps caractéristique pour le rejoindre.

3) Manips possibles

a. Chute bille dans glycérine (système linéaire du 1er ordre)

Avec des notations habituelles, on peut dire que la vitesse limite est atteinte lorsque les forces sur la bille se compensent $mg=6\pi\eta Rv$ ou, ce qui revient au même ici lorsque la puissance motrice mg.v est compensée par la puissance dissipée $6\pi\eta Rv.v$. Le mouvement étant vertical, la remarque est quelque peu artificielle ici mais, puisqu'il s'agit d'un raisonnement énergétique, il est universel…

Manip ultra classique, faire bien comme il faut, laisser deux trois cm de chute avant de lancer le chronomètre, faire plusieurs billes (demander au technicien, faire la manip ensemble la première fois, puis lui demander de répéter). Mesurer le diamètre au Palmer, peser les billes pour en déduire la densité, incertitudes. En pratique ça marche à 20% : glycérol contaminé par de l'eau, influence de la température.

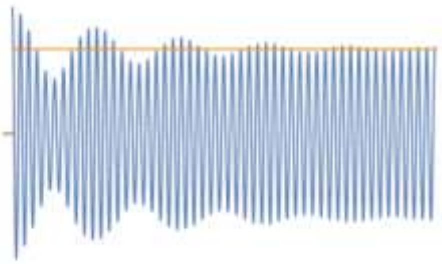
Conclusion : la dissipation c'est η ici.

Autres manips du même genre :

- le RC tout bête (pas glorieux…)
- mais mieux, « polarisation d'une photodiode et bande passante » en polarisant une photodiode on écarte les charges de la jonction. La capacité de la jonction diminue et la réponse est plus rapide.
- En guise d'ouverture sur le non-linéaire : AO en suiveur avec entrée carrée +/- 10 ou 20V (je ne sais plus… en tous cas, réponse dite « grand signaux ») à 10kHz typ. Déclencher sur l'entrée et zoomer : la sortie monte linéairement : mesurer dV/dt et comparer à la doc. Ici le temps caractéristique est 2Vsat/(dV/dt).

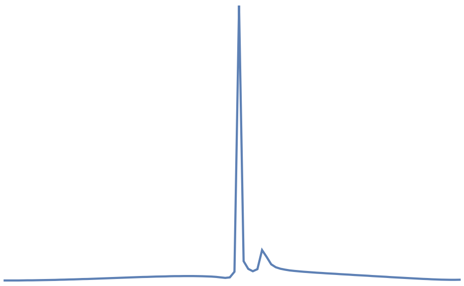
b. RLC régime précédent le régime harmonique (système linéaire du second ordre)

Régler le GBF en salves : c'est une fonction que n'a pas le GBF basse impédance usuel. Donc GBF de course Agilent plus circuit suiveur. Prendre R petit (boite à décade sur 1 Ohm), L bobine 500 tours par exemple (petit pour limiter R) et C en conséquence pour avoir f0 de l'ordre du kHz. Chercher la fréquence f de la salve proche de f0 : des battements amortis apparaissent dans la réponse.



Ici, plus que précédemment encore, on peut mettre en évidence que du point de vue technique, la solution est la superposition de la solution homogène (sans second membre) qui oscille à f0 et décroit en exp(-t/RC) (dissipation encore et toujours) et de la solution particulière qui oscille à f et sera le régime établi (non constant dans le temps ici).

Faire une acquisition synchronie, bien expliquer comment on prend les paramètres (ne pas hésiter à dire que comme on veut de la résolution on prend un max de points (>20 par période) et bcp de périodes (>20 après régime établi). On trouve deux pics correspondant à f et f0. On compare aux valeurs attendues



Conclusion : la dissipation c'est R ici.

c. Oscillateur à R<0

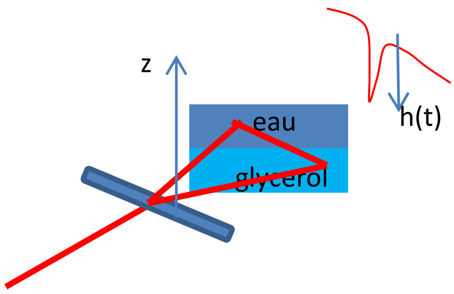
Soit Rs la résistance au seuil d'oscillation. Mettre l'oscillo ou synchronie en mode single/prétrig c'est-à-dire déclanchement unique à 25% de l'écran (environ), seuil légèrement positif (ou négatif) pour ne pas déclencher sur les parasites. Basculer de Ri légèrement>Rs à Rf légèrement <Rs.

A essayer : acquisition synchronie comme précédemment (bcp de points). Prendre Log(Abs(sortie)) pour montrer le démarrage exponentiel qui apparait linéaire, puis la saturation (comparer à la doc).

Varier Rf en modifiant le calibre 1 Ohm ou 10 Ohm. Le régime transitoire est raccourci (mais il dépend aussi de Vsat qu'on peut faire varier avec la tension d'alim).

d. Systèmes linéaires continus

Manip assez délicate de diffusion de glycérol dans l'eau (voir CR précédents et BUP).



On génère une ligne laser avec un barreau de verre qui vient intersecter l'interface eau-glycérol. A un mètre on mesure l'amplitude de la déviation du faisceau en fonction du temps h(t). En pratique, la condition initiale est modélisée par une fonction de Heaveside de la concentration en glycérol. Avec la diffusion celle-ci évolue comme une fonction Erreur (Erf=primitive de la Gaussienne). Or la déviation du faisceau est liée au gradient de l'indice, donc de la concentration (Clausius Mossotti), on a donc un profil gaussien sur l'écran qui s'élargit en sqrt(2Dt) et dont l'amplitude diminue d'autant. La mesure de h(t) permet de remonter au coefficient de diffusion D.

4) Conclusion

La situation précédente est linéaire certes mais semble totalement éloignée de ce que l'on vient de faire :(y compris la première manip de chute dans le glycérol… Et pourtant…

1) qu'est ce qui freine la bille dans sa chute ?
2) qu'est-ce qui met en mouvement le glycérol qui diffuse alors dans l'eau ?

Dans les deux cas ce sont les collisions aléatoires des molécules à l'échelle microscopique.

Dans le premier cas, lorsque la bille chute, elles limitent la vitesse de la particule dont la vitesse croit et qui subit de plus en plus de collisions : elle atteint une vitesse limite proportionnelle à la force motrice $F=\mu v$ où $F=mg$ ici (notez bien qu'il s'agit d'une remarque capitale : Newton a fait une abstraction extraordinaire à partir du principe d'inertie. Les forces modifient l'accélération, pas la vitesse comme dans la pensée Aristotélicienne qui correspond à l'expérience commune pourtant : plus je pousse fort, plus ça va vite… Mais on retrouve le sens commun en postulant un frottement et en négligeant… le régime transitoire ;)

Dans le second cas, ce sont les collisions aléatoires qui poussent les molécules de glycérol qui diffusent dans l'eau. Un modèle de marche aléatoire décrit parfaitement l'équation de diffusion. On a de plus $[D]=L^2/T$ d'où un temps caractéristique du régime transitoire (vers la concentration uniforme ici) $T \sim H^2/D$ où H est la hauteur du fluide dans la cuve. Loi singulière car il n'y a pas de « vitesse » associée car alors L et T seraient proportionnels.

Les deux phénomènes sont donc profondément reliés… et c'est l'objet d'un des 4 merveilleux articles d'Einstein de 1905 dans lequel il établit ce que l'on appelle depuis le théorème fluctuation-dissipation : $D=\mu\, kT$. C'est le même phénomène microscopique qui permet au système d'atteindre l'équilibre (dissipation) mais qui, une fois à l'équilibre l'empêche d'y être vraiment (fluctuations) : il reste un bruit résiduel, un micromouvement de la bille (elle diffuse dans le référentiel entrainé), un « bruit thermique » aux bornes de la résistance (bruit blanc de densité sqrt(4kT R)) qu'on pourrait mesurer mais… ça fait beaucoup déjà en 30 minutes.