

MP31 – RÉSONANCE

Vendredi 17 février 2017

Jolan Desné & Benjamin Guiselin

*Et là-bas, sous le pont, adossé contre une arche,
Hannibal écoutait, pensif et triomphant,
Le piétinement sourd des légions en marche.*
ÉTUDE DE RÉSONANCE

Commentaires du jury

2014, 2015, 2016

Le lien qui existe entre la largeur de la résonance d'un oscillateur et la durée du régime transitoire est souvent ignoré par les candidats. Des phénomènes non linéaires ou paramétriques pourraient également être abordés.

2011, 2012

La résonance ne se limite pas à l'étude du circuit RLC. Les critères de détermination expérimentale de la fréquence de résonance ne sont pas toujours pertinents. La notion de facteur de qualité ou un équivalent est trop souvent absente.

2008

Le phénomène de résonance n'apparaît pas qu'en électricité. En outre, le circuit RLC est souvent mal connu. Le jury apprécierait de voir des résonances dans d'autres domaines de la physique, ainsi que des facteurs de qualité importants.

2006

La résonance n'est pas une amplification. L'influence de l'amortissement est souvent négligée.

2004

L'étude de la phase est trop souvent absente de ces montages alors qu'elle fournit des relations complémentaires non redondantes à celle de l'amplitude.

Bibliographie

- ♣ *Physique expérimentale aux concours de l'enseignement*, —→ Pour le circuit RLC, voir notamment page 106.
Bellier
- ♣ *BUP 822/675* —→ À propos de l'analyseur de spectre utilisé pour le circuit RLC.
- ♣ *Notice de l'analyseur de spectre* —→ Pour le circuit RLC.
- ♣ *BUP 747* —→ Pour la résonance paramétrique.
- ♣ *Dictionnaire de physique expérimentale I*, **Quaranta** —→ Pour la résonance paramétrique.
- ♣ *Mécanique*, **Landau** —→ Pour la résonance paramétrique, voir notamment page 130.
- ♣ *Expériences d'optique*, **Duffait** —→ Pour le LASER He-Ne.
- ♣ *Notice de la cavité d'analyse Fabry-Pérot THORLABS* —→ Pour le LASER.
- ♣ *Expériences de physique au CAPES*, **Duffait** —→ Pour le tube de Kundt, voir notamment page 282.
- ♣ *Physique expérimentale*, **FLTCLD alias Jolidon** —→ Pour le tube de Kundt, voir notamment page 528.

Table des matières

1	Un oscillateur linéaire à un degré de liberté et à bas facteur de qualité : le circuit RLC, résonance en intensité	2
2	Oscillateurs linéaires à plusieurs degrés de liberté	4
2.1	Air dans une cavité : le tube de Kundt	4
2.2	Le LASER He-Ne à 632,8 nm : étude avec la cavité d'analyse Fabry-Pérot	6
3	Résonance paramétrique : retour sur le circuit RLC	7

Introduction

Les phénomènes de résonance peuvent survenir dans différents domaines de la physique ; malgré leur diversité, nous allons tâcher au cours de ce montage de mettre en évidence des caractéristiques communes à l'ensemble de ces phénomènes - de manière à faire ressortir une définition générale de la résonance.

Objectif :

On va tâcher de faire ressortir les idées-force^{© 1} suivantes :

- Fréquence(s) de résonance
- Bande passante (lien avec le temps d'amortissement des oscillations du régime pseudo-périodique)
- Facteur de qualité
- Résonateur et excitateur
- Transfert maximal d'énergie

1 Un oscillateur linéaire à un degré de liberté et à bas facteur de qualité : le circuit RLC, résonance en intensité

✍ Bellier, BUP 822, BUP 675, notice de l'analyseur de spectre

⌚ 10 minutes

Schéma du montage électrique :

Principe de l'expérience :

- Excitateur : source de l'analyseur de spectre.
- Résonateur : circuit RLC (résonateur linéaire à un degré de liberté).
- Fréquence de résonance : fréquence propre.

1. Pour toute démarche légale, s'adresser à J.-P. Zaygel.

- Montage : on utilise un analyseur de spectre (Hewlett Packard 35665A), un AO en suiveur et un circuit RLC série. La bobine a ici une inductance d'environ 50 mH et le condensateur a une capacité d'environ 50 nF. L'analyseur de spectre joue à la fois le rôle de source et d'outil d'analyse : il permet en effet de relever la tension aux bornes du circuit RLC (voie 1), ainsi que la tension aux bornes de la résistance (voie 2).

Retour sur le choix des composants :

On choisit L et C tels que la fréquence de résonance du circuit soit largement dans la bande passante de l'AO. À noter que l'AO lui-même est un oscillateur, mais celui-ci ne présente pas de résonance.

L'utilisation d'un AO en suiveur permet de s'affranchir de la résistance interne de l'analyseur, pour augmenter le facteur de qualité.

Pour une précision optimale, on mesure les valeurs de L et C avec un RLC-mètre, à 120 Hz ainsi qu'à 1 kHz. En comparant les différentes valeurs obtenues, on peut écrire :

- $R = (101,0 \pm 0,7) \Omega$
- $L = (47 \pm 2) \text{ mH}$
- $C = (47,9 \pm 0,3) \text{ nF}$

L'incertitude sur ces valeurs étant donnée, soit par l'écart entre la valeur à 120 Hz et la valeur à 1 kHz (pour la bobine), soit, lorsque les deux valeurs sont les mêmes, par la notice du RLC-mètre (pour la résistance et le condensateur) :

- Pour R : $0,8\% + 5 \text{ digits}$
- Pour L : $0,7\% + 5 \text{ digits}$
- Pour C : $1\% + 5 \text{ digits}$

Première mesure :

- Méthode : on mesure la fréquence de résonance du circuit, à partir de son diagramme de Bode. Cette fréquence correspond à un transfert d'énergie maximal entre l'excitateur et le résonateur.
- Remarque : à la place de l'analyseur de spectre, on aurait pu, pour cette première expérience, utiliser un simple oscilloscope en mode XY. Mais l'utilisation de l'analyseur de spectre permet d'avoir accès à une valeur plus précise de f_0 ainsi qu'à une valeur du facteur de qualité Q de l'oscillateur, *via* son diagramme de Bode.

Résultat de l'expérience :

On obtient pour la fréquence f_0 une valeur expérimentale de ² :

$$f_0 = (\quad \pm \quad) \text{ kHz}$$

À comparer avec la valeur attendue :

$$f_{0,th} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \text{ soit } f_{0,th} = (3,35 \pm 0,07) \text{ kHz}$$

Incertitude associée :

Il s'agit simplement de la plage de fréquence sur laquelle on peut considérer qu'on se trouve sur le maximum de résonance, dans le diagramme de Bode donné par l'analyseur de spectre. L'incertitude due à la résolution de l'analyseur est ici tout à fait négligeable : elle est de $\pm (122 \mu\text{Hz} + 30 \text{ ppm})$ en "2 channel mode".

2. En préparation, on avait obtenu : $f_0 = (3,398 \pm 0,004) \text{ kHz}$

Micro-transition :

On constate que l'amplification reste significative sur une large gamme de fréquences. Cela nous amène aux notions de facteur de qualité et de bande passante, qui feront l'objet de la suite de cette partie.

Étude du facteur de qualité avec l'analyseur de spectre :

On a : $\frac{\Delta f}{f_0} = \frac{1}{Q}$

Avec $f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$ et Δf la bande passante à $-3dB$.

À l'aide de cette relation, on va chercher à vérifier la loi suivante :

$$Q = \frac{1}{R} \sqrt{\frac{L}{C}} \text{ soit } \frac{1}{Q} = R \sqrt{\frac{C}{L}}$$

Pour différentes valeurs de R , on mesure Δf directement sur le diagramme de Bode, puis on calcule la valeur de $\frac{1}{Q}$ en l'assimilant à celle du quotient $\frac{\Delta f}{f_0}$, et on trace :

$$\frac{1}{Q} = f(R)$$

On modélise les résultats à l'aide d'une droite affine, et on ajuste.

Résultat de l'ajustement :

$$\frac{1}{Q} = a(R + R_0)$$

Avec ³ $a = (\quad \pm \quad) \text{ mS}$

Et $R_0 = (\quad \pm \quad) \Omega$

À comparer avec les valeurs attendues :

$a_{th} = (1,01 \pm 0,02) \text{ mS}$ et une valeur nulle pour $R_{0,th}$.

Incertitudes associées et sources d'erreur :

Incertitudes : les incertitudes prises sur les deux bornes de Δf sont les mêmes que pour la mesure précédente. L'incertitude sur les valeurs de la résistance est donnée par la notice du RLC-mètre (voir plus haut).

Sources d'erreur : la résistance interne de la bobine (de l'ordre de 9Ω), les capacités des fils, les résistances de contact, les capacités de jonction, etc.

Jusqu'à présent on n'avait qu'une seule fréquence de résonance, puisqu'on n'avait qu'un seul oscillateur. On va maintenant passer à l'étude d'un système correspondant à un nombre infini d'oscillateurs, à savoir l'air dans une cavité.

2 Oscillateurs linéaires à plusieurs degrés de liberté

2.1 Air dans une cavité : le tube de Kundt

✚ FLTCLD, Duffait CAPES

⌚ 8 minutes

3. En préparation, on avait obtenu : $a = (1,03 \pm 0,03) \text{ mS}$ et $R_0 = (39 \pm 2) \Omega$

Principe de l'expérience :

- Excitateur : haut-parleur.
- Résonateur : air dans la cavité.
- Fréquences de résonance : il en existe une infinité.
- Méthode : on se place à différentes valeurs de la fréquence telles qu'il y ait résonance, et on mesure la longueur d'onde correspondante (en déplaçant le micro). Puis on trace la longueur d'onde en fonction de la fréquence, et on en tire c .
- Remarque : pour mieux voir les résonances, on se place à un ventre de pression (noeud de vitesse). En revanche, pour mieux mesurer les longueurs d'onde de résonance, on se place entre des noeuds de pression (ventres de vitesse).
- Observation : il n'y a pas de divergence de l'amplitude. En effet des phénomènes de dissipation rentrent en jeu ; en outre, la relation liant l'amplitude de l'onde stationnaire au forçage n'est plus valable, l'équation d'onde étant basée sur un développement limité. Ainsi, la résonance est un compromis entre excitation et amortissement.
- Facteur de qualité : on le détermine en regardant quand l'amplitude du ventre de résonance est divisée par $\sqrt{2}$.

Hypothèses d'étude :

- On suppose que le bouchon du tube a une impédance infinie.
- On suppose que la membrane du haut-parleur a un mouvement sinusoïdal : ainsi, pour toute fréquence d'excitation une onde stationnaire s'installe dans la cavité. On a alors résonance pour :

$$k_n L = n\pi \text{ avec } n \in \mathbb{N}$$

$$\Rightarrow \lambda_n = \frac{2L}{n} \text{ et } f_n = \frac{c}{\lambda_n} = \frac{nc}{2L} = nf_0$$

Résultat de l'expérience :

$$\lambda = \frac{a}{f} + b$$

$$\text{Avec }^4 a = (\quad \pm \quad) \text{ m/s}$$

$$\text{Et } b = (\quad \pm \quad) \text{ m}$$

$$\text{À comparer avec la valeur tabulée : } a_{th} = c_{son \text{ dans l'air}} = (344,1 \pm 0,9) \text{ m/s}$$

$$\text{Et avec la valeur théorique nulle de } b_{th}.$$

Cette valeur a été déterminée à l'aide du Handbook, en prenant une température de (20 ± 1) degrés Celsius et un taux d'humidité de (50 ± 50) %.

Incertitudes associées :

Incertitude pour la mesure de la fréquence de résonance à l'oscilloscope : il s'agit de la gamme de fréquences pour laquelle on a l'impression qu'on est à la résonance (résolution de l'oscilloscope négligeable).

Incertitude pour la mesure de la longueur d'onde de résonance à la règle : elle est donnée par l'incertitude sur les bornes de la mesure. Chacune d'elle est en effet constituée en réalité d'un intervalle, qui correspond à la distance sur laquelle on a l'impression d'être sur le noeud de pression (cet étalement vient du fait que l'impédance du bouchon n'est pas rigoureusement infinie). Il est opportun de mesurer plusieurs longueurs d'onde pour réduire cette incertitude.

4. En préparation, on avait obtenu : $a = (340 \pm 6) \text{ m/s}$

(L'incertitude liée à la graduation de la règle est bien entendu négligeable.)

Facteur de qualité :

On trouve⁵ : $Q \simeq$

↓ Pour le tube de Kundt, on a une infinité de fréquences de résonance, mais un facteur de qualité très faible. Étudions maintenant un système présentant un meilleur facteur de qualité.

2.2 Le LASER He-Ne à 632,8 nm : étude avec la cavité d'analyse Fabry-Pérot

🔗 Notice de la cavité d'analyse Fabry-Pérot THORLABS, Duffait d'optique

⌚ 8 minutes

Principe de l'expérience :

- Excitateur : pompage (électrique) du LASER He-Ne à 632,8 nm.
- Résonateur : le LASER.
- Fréquences de résonance : un grand nombre. Ce serait une infinité si le milieu actif émettait à toute fréquence. Ici, ces fréquences correspondent aux fréquences de résonance de la cavité Fabry-Pérot du LASER qui sont incluses dans le spectre d'émission du milieu actif (gaz He-Ne).
- Principe : la cavité Fabry-Pérot sert ici d'analyseur. L'un des deux miroirs de la cavité est attaché à un matériau piézo-électrique sur lequel on applique une rampe de tension (à l'aide d'un module spécialisé), si bien qu'on fait varier graduellement dans le temps la longueur de la cavité d'analyse : cela permet d'observer des pics de tension à la sortie de la cavité (*via* une photodiode connectée au module spécialisé, lui-même connecté à un oscilloscope qui sert d'interface d'affichage), qui correspondent aux modes propres du LASER. (On a la relation $4d = k\lambda$ avec d la distance entre les deux miroirs et k un entier.)
- Observation : on observe en sortie la répétition d'un motif constitué de deux pics. Cela permet de définir un premier intervalle temporel $FSR_{cavité}^t$ (pour "Free Spectral Range" de la cavité), correspondant à l'intervalle entre deux motifs, et un deuxième intervalle temporel FSR_{laser}^t , correspondant à l'intervalle entre les deux pics dans chaque motif. On peut aussi définir un troisième intervalle temporel $\delta\nu^t$, correspondant à la largeur à mi-hauteur du plus grand des deux pics.
- Méthode : on peut trouver dans la notice la valeur du "Free Spectral Range" de la cavité en GHz (à savoir $FSR_{cavité} = 1,5$ GHz), ce qui permet de connaître la relation d'équivalence entre "intervalle temporel observé" et "gamme spectrale en fréquence". On en déduit les valeurs en fréquence de FSR_{laser} et de $\delta\nu$.

Résultat de l'expérience :

On obtient grâce à un produit en croix, comme expliqué plus haut, une valeur de FSR_{laser} et une estimation de $\delta\nu$:

$$FSR_{laser} = (\quad \pm \quad) \text{ MHz}$$

$$\delta\nu \simeq \quad \text{ Hz}$$

À comparer avec la valeur indiquée dans la notice du LASER, sans incertitude malheureusement :

$$FSR_{laser,th} = 435 \text{ MHz}$$

5. En préparation, on avait obtenu : $Q \simeq 50$

Facteur de qualité :

On peut enfin s'intéresser au facteur de qualité du LASER, qui vaut :

$$Q = \frac{\nu_0}{\delta\nu} = \frac{c_{lumière}}{\lambda_0 \delta\nu}$$

Soit ⁶ : $Q \simeq$

On va terminer ce montage par l'étude d'un oscillateur dont l'amplitude de résonance est limitée par des non-linéarités, à savoir le circuit RLC excité par oscillations paramétriques. Cela correspond à un système pour lequel il existe de nombreuses fréquences de résonance (fréquences d'excitation pouvant provoquer la résonance) ; et cette fois, la fréquence d'oscillation du système résonant ne sera pas la même que la fréquence d'excitation !

3 Résonance paramétrique : retour sur le circuit RLC

✍ BUP 747, Quaranta, Landau

⌚ 10 minutes

Schéma du montage électrique :

Principe de l'expérience :

- Excitateur : GBF aux bornes du multiplieur.
- Résonateur : circuit RLC et multiplieur (composant non linéaire).
- Fréquences de résonance : de nouveau une infinité.
- Principe : on regarde à l'oscilloscope la tension u' aux bornes du condensateur et, pour différentes valeurs de U_e , on mesure les fréquences f_- et f_+ pour lesquelles des oscillations, respectivement, apparaissent ou disparaissent.

6. On avait trouvé en préparation une valeur de Q comprise entre 10^6 et 10^7 . Selon certains auteurs, Q serait même de l'ordre de 10^8 .

Quelques éléments théoriques :

L'équation différentielle sur la charge portée par le condensateur, pour ce montage, est la suivante :

$$\frac{d^2 q}{dt^2} + \frac{R}{L} \frac{dq}{dt} + \frac{q}{LC} (1 - k u_e) = 0$$

$$\Rightarrow \omega^2(t) = \omega_0^2 (1 - k u_e(t)) = \omega_0^2 \{1 + h \cos(2\pi f_e t)\}$$

$$\text{Avec : } h = k U_e$$

k est déterminé par étalonnage avec des tensions connues, mesurées au multimètre Fluke :

$$k = (1,001 \pm 0,001) 10^{-1} V^{-1}$$

On mesure U_e au Fluke, ce qui correspond à une incertitude de : $0,4\% + 40 \text{ digits}$

Pour la théorie globale, voir le Landau de mécanique. On peut montrer que si le système est excité à :

$$f_- < f_e < f_+ \text{ avec } f_{\pm} = 2f_p \pm \sqrt{\left(\frac{hf_p}{2}\right)^2 - \left(\frac{f_0}{Q}\right)^2}$$

Alors il apparaît des oscillations aux bornes du condensateur, à la fréquence f_p .

Remarque :

Il existe d'autres résonances pour f_e autour de f_p et $\frac{2f_p}{3}$ (et $\frac{2f_p}{n}$ avec $n \in \mathbb{N}$) ; mais la plage varie comme h^n (ici pour $n = 1$ on a : $f_+ - f_- \propto h$).

La résonance à $2f_p$ est donc la plus facile à mesurer.

Attention :

- Pour pouvoir obtenir une relation linéaire entre $f_{\pm}$ et h , il faut faire un développement limité, par exemple à l'ordre 2 en h :

$$f_{\pm} = 2f_p \pm \frac{hf_p}{2} - \frac{h^2 f_p}{32}$$

- Réponse non linéaire : le système répond à $f_p, 3f_p$, etc. (On pourrait le montrer en faisant une FFT.)

Choix de la démarche :

Pour cette dernière expérience, plutôt que de donner dans un développement limité peu justifiable afin de se ramener à la droite coutumière, nous avons choisi d'utiliser un programme Python qui effectue un ajustement non linéaire par la méthode des moindres carrés, pour modéliser les résultats expérimentaux avec une expression conforme à la théorie.

Après exportation des données de Regressi dans le format idoine, on trace donc :

$$f_{\pm} = 2a \pm \sqrt{\left(\frac{bh}{2}\right)^2 - c^2}$$

Ce qui correspond aux valeurs attendues suivantes pour a , b et c :

$$a_{th} = (3,35 \pm 0,07) \text{ kHz}$$

$$b_{th} = (3,35 \pm 0,07) \text{ kHz}$$

$$c_{th} = (4,2 \pm 0,2) 10^2 \text{ Hz}$$

Résultat de l'expérience :

On obtient après modélisation et ajustement :

$$a = (\quad \pm \quad) \text{ kHz}$$

$$b = (\quad \pm \quad) \text{ kHz}$$

$$c = (\quad \pm \quad) \text{ Hz}$$

Facteur de qualité :

On peut définir le facteur de qualité du système ainsi :

$$Q = \frac{2f_p}{\Delta f}$$

On peut donc calculer Q avec les résultats précédents, et il vient :

$$Q \simeq$$

À propos des incertitudes :

Pour ce qui est de l'incertitude sur la valeur de $f_{\pm}$, il y a deux options (en fonction du temps qu'il reste pour finir le montage) :

- Manipuler très promptement ou bien comme un cochon pour que l'incertitude principale sur les fréquences en question soit liée à la gamme d'apparition ou de disparition des oscillations non-linéaires.
- Manipuler lentement et soigneusement, ce qui permet de réduire l'incertitude précédemment mentionnée à environ 1 Hz ; mais dans ce cas, il faudrait en toute rigueur tenir compte de l'incertitude liée à l'affichage de l'oscilloscope ! Celle-ci, pour information, est de $\pm (51 \text{ ppm} + 1 \text{ digit})$.

Conclusion

Parfois, la résonance, c'est moche, c'est pernicieux, c'est acariâtre : ça cause la détérioration des matériaux, des amortisseurs de voiture par exemple. (Ne surtout pas parler du pont de Tacoma, ni des légions en marche...)

Mais la résonance, par ailleurs, c'est vraiment cool, c'est vraiment bath, c'est vraiment swag : on peut l'utiliser pour faire des horloges atomiques, des lasers, des tas de choses délicieuses... Ça sert même en (bio)chimie, que ce soit pour la RMN (l'IRM) ou à l'intérieur des sondes lumineuses nouvelle génération, celles qui utilisent le FRET (Förster Resonance Energy Transfer ⁷) par exemple !

Annexe

L'analyseur de spectre, mode d'emploi pour débutants^{© 8} :

- Branchement initial :

1. Brancher la source de l'analyseur de spectre sur le circuit ainsi que sur la voie CH 1.
2. Brancher la sortie du filtre RLC sur la voie CH 2.

7. Source historique : T. H. Förster, "10th spiers memorial lecture. Transfer mechanisms of electronic excitation" in *Discussions of the Faraday Society*, 1959, 27, 7-17.

8. Pour toute démarche légale, s'adresser à B. Guiselin.

- Tracé du diagramme de Bode :

3. Cliquer sur le bouton *Inst Mode* (panneau **Measurement**) puis sélectionner sur l'écran de l'analyseur, à l'aide des boutons latéraux, les options *FFT Analysis* et *2 Channel*.
4. Cliquer sur le bouton *Meas Data* (panneau **Display**) puis sélectionner sur l'écran de l'analyseur, à l'aide des boutons latéraux, l'option *Freq Response*.
5. Cliquer sur le bouton *Trace Coord* (panneau **Display**) puis sélectionner sur l'écran de l'analyseur les options *dB Magnitude* et *Xaxis LOG*.

- Envoi d'un bruit blanc en entrée :

6. Cliquer sur le bouton *Source* (panneau **Measurement**) puis sélectionner sur l'écran de l'analyseur les options *Source ON* et *Random Noise*. Choisir un *Level* de 1 *Vpk* (ce qui correspond à un volt pic à pic).

- Réglage de l'affichage :

7. Cliquer sur le bouton *Freq* (panneau **Measurement**) et définir le *Span* (l'étendue de fréquence) qui convient, ici 6 kHz.
8. Cliquer sur le bouton *Window* (panneau **Measurement**) et choisir l'option *Hanning*.
9. Cliquer sur le bouton *Scale* (panneau **Display**) et choisir l'option *Autoscale ON*. Éventuellement, changer la référence de fenêtrage en activant l'option *Bottom Reference*.

- Création d'un deuxième graphique pour afficher la phase :

10. Cliquer sur le bouton *Disp Format* (panneau **Display**) et choisir l'option *Upperlower*. Utiliser l'option *Active Trace* pour sélectionner le nouveau graphique.
11. Cliquer sur le bouton *Meas Data* (panneau **Display**) puis sélectionner sur l'écran de l'analyseur, à l'aide des boutons latéraux, l'option *Freq Response*.
12. Cliquer sur le bouton *Trace Coord* (panneau **Display**) puis sélectionner sur l'écran de l'analyseur les options *Phase* et *Xaxis LOG*.

- Utilisation des curseurs en mode déplacements couplés :

13. Cliquer sur le bouton *Marker* (panneau **Marker**) et choisir les options *Marker ON* et *Coupled ON*.

- Utilisation du moyennage :

14. Cliquer sur le bouton *Avg* (panneau **Measurement**) et choisir l'option *Average ON*. Entrer un nombre de moyennages adapté, ici par exemple trente fois MILLE[©]⁹. Ensuite, choisir les options *Fast Avg ON* et *Repeat ON*.

- Déclenchement de la mesure :

15. Cliquer sur le bouton *Start* (panneau **Measurement**) pour lancer la mesure. Recliquer sur ce bouton pour chaque nouvelle mesure. L'analyseur de spectre (NatachaTM pour les intimes) est maintenant opérationnel.

9. Pour toute démarche légale, s'adresser à B. Crinquand.

Espace de temporisation agogique¹⁰

10. Pour toute question lexicale, s'adresser à G. Mugnier ou É. Brillaux.