

ACCUEIL

Résonance de l'eau: le point sur les fours micro-ondes et les téléphones portables (cahier de doléances)

Jean-François Lahaeye
28 décembre 2004

CopyrightFrance.com

La reproduction des articles, images ou graphiques de ce site, pour usage collectif, y compris dans le cadre des études scolaires et supérieures, est INTERDITE. Seuls sont autorisés les extraits, pour exemple ou illustration, à la seule condition de mentionner clairement l'auteur et la référence de l'article.

Tous les objets sont plus ou moins colorés. Les pigments colorés correspondent à des spectres d'absorption parfois assez complexes de certaines couleurs par les substances, tandis que les couleurs complémentaires sont réfléchies, transmises ou diffusées. Les fréquences (couleurs) absorbées ou émises par les corps gazeux sont les raies spectrales (couleurs de la lumière, non des pigments). Mais ces raies sont, dans les cas des liquides et des solides, élargies ou remplacées par des bandes qu'on appelle « bandes de relaxation ». On sait que Goethe ne parvint pas à réfuter la théorie des couleurs de Newton. Il y a pourtant au moins un point fort dans l'idée de Goethe : un mélange de pigments colorés ne donne pas du blanc mais du noir. Ce fait (généralement présenté sous la forme de théorie soustractive par opposition à la théorie additive) n'a été pleinement compris qu'au vingtième siècle avec la théorie quantique de l'émission et de l'absorption des couleurs par les atomes et les molécules, les cristaux et les centres colorés des molécules complexes. Ce n'est pas le lieu de développer ici un cours d'optique physiologique expliquant la *perception des couleurs*, ni même un cours complet d'optique physique expliquant *leur nature*. Il s'agit plus modestement de mieux comprendre dans quel monde nous vivons, tant dans sa donnée naturelle que dans ce que l'homme peut en faire de meilleur ou de pire. Il ne s'agira donc ici ni de la théorie des couleurs de Goethe ni de celle de Newton, mais de celle de Bohr et Heisenberg.

Un exposé complet sur la résonance de l'eau serait assez complexe. Cependant un exposé des grandes lignes n'est pas infaisable. Les quelques développements mathématiques sont volontairement relégués en notes de bas de page, à l'usage de quiconque voudrait en savoir un peu plus ou consulter des ouvrages techniques. D'autre part un exposé sur le téléphone portable ne saurait en aucun cas faire l'impasse sur la nature spécifique de son danger : la résonance de l'eau. Pour quiconque désire aller un peu au delà de la simple vulgarisation et rentrer dans une démarche de compréhension analytique minimale, il convient de s'initier au maniement des systèmes d'unités ainsi qu'aux corrections que j'ai dû apporter à la partie électrique des unités métriques et républicaines telles qu'elles figurent dans le Système International actuel. Si le modèle de Debye (et celui de Cole-Cole) introduit un schéma équivalent avec des résistances et des condensateurs pour expliquer les pertes diélectriques (principe des fours micro-ondes) en termes de bandes de relaxation, je propose aussi un modèle avec des bobines et condensateurs pour expliquer les résonances diélectriques au voisinage desquelles se produisent ces pertes : en d'autres termes je propose un schéma équivalent à des résonances quantiques. Cet exposé, qui ne prétend pas être exhaustif, présente l'avantage de pouvoir être mis à la portée de la culture de lycée. Pour le compléter, il convient de le combiner non seulement avec la théorie de Debye, mais aussi et surtout avec la théorie quantique des rotations des molécules. La théorie de Debye n'explique pas pourquoi le temps de relaxation de l'eau liquide coïncide approximativement avec la période de la première résonance de rotation de l'eau : c'est que la résonance quantique doit jouer un rôle y-compris pour

l'eau en phase liquide¹. Le modèle que je propose pourrait fournir la connexion manquante entre les deux théories. Pour comprendre ce qui se passe, une initiation à la physique moderne quantique est donc inévitable, ainsi que quelques détours par l'électromagnétisme classique. Afin qu'un lecteur disposant d'un peu de culture de lycée puisse suivre le raisonnement sans se noyer dans les formules, les notes les plus techniques sont présentées dans les annotations. Car je prends mon lecteur pour un citoyen à part entière, susceptible de *désirer* s'instruire par lui-même.

On peut être tenté de supposer que les résonances quantiques et les résonances de Thomson « classiques » sont de nature profondément différente. Deux raisons majeures rendent cette hypothèse peu crédible : tout d'abord le fait qu'une écriture quantique de la formule de Thomson est toujours possible ainsi qu'il a été démontré dans ma *Correction d'une erreur dans le système des unités métriques et républicaines* ; ensuite le fait que les courbes de résonance (amplitudes, impédances) sont semblables dans les deux cas : même si l'usage, en optique, préfère représenter ces courbes en termes d'indice de réfraction, voire de permittivité diélectrique, l'allure générale est la même, on retrouve en outre dans les deux cas une partie réelle et une partie imaginaire, par exemple la permittivité complexe² s'écrit $\epsilon = \epsilon' - i \epsilon''$. La théorie de Debye n'explique pas vraiment les résonances. Je me propose donc de combiner la théorie de Debye, la théorie quantique des résonances et la théorie classique des résonances pour obtenir une vue d'ensemble : une tâche qui ne doit pas être insurmontable puisque les phénomènes sont directement commensurables (ce doit être plus simple que comparer l'électromagnétisme avec la gravitation).

Commençons par la théorie quantique. Un exposé sur la résonance de l'eau doit faire appel simultanément à deux conceptions qui ne se côtoient jamais dans la pratique des techniciens de l'électronique et ne se rejoignent, pour se confronter, que dans la théorie fondamentale. Mais cette théorie est elle-même double³. C'est une vieille question, savoir si la lumière est faite de corpuscules (les photons) ou d'ondes (comme les vagues sur la mer). Et dans la mesure où les ondes radioélectriques sont une sorte de lumière (prolongement de l'infrarouge) la vieille question doit ici leur être appliquée afin de comprendre de quoi il retourne.

Les molécules d'eau tournent sur elles mêmes et possèdent par conséquent une énergie de rotation. Mais cette énergie de rotation ne peut prendre que certaines valeurs bien déterminées dépendant de nombres entiers appelés *nombres quantiques de rotation*. On dit que « l'énergie est quantifiée ». Si la molécule échange de l'énergie avec l'extérieur, elle ne peut le faire qu'en sautant d'un état énergétique à un autre. Cette énergie perdue (émission) ou gagnée (absorption) correspond à des *corpuscules microscopiques appelés photons*, chacun portant l'énergie :

$$W = h \times \nu$$

h étant la constante de Planck ($h = 6,626 \times 10^{-34}$ joules-secondes), ν étant la *fréquence de l'onde* en hertz, associée au photon. On voit ici coexister les deux théories complémentaires de l'onde et du corpuscule puisque cette multiplication fait intervenir à la fois une fréquence (caractéristique des ondes) et un corpuscule doté d'énergie comme un petit projectile. La théorie quantique englobe les deux points de vue.

Retenons pour ce qui nous concerne que la molécule d'eau présente trois fréquences de résonance dans la gamme des micro-ondes (et d'autres dans l'infrarouge) :

$$\begin{aligned} \text{Fréquence n}^\circ 1 &= 22,2 \text{ GHz} \\ \text{Fréquence n}^\circ 2 &= 183,3 \text{ GHz} \\ \text{Fréquence n}^\circ 3 &= 325,4 \text{ GHz} \end{aligned}$$

Rappelons qu'un gigahertz (GHz) correspond à 1000 mégahertz (MHz) c'est-à-dire un milliard de hertz, le

1 Il semble que le manque de clarté de ce point soit passé inaperçu : le temps de relaxation de Debye ne peut être dans tous les cas un vrai temps de relaxation s'il coïncide avec une période de résonance : car alors c'est la largeur spectrale de la raie qui indique le temps de relaxation correspondant, par exemple par les relations de Heisenberg dans le cas d'une largeur naturelle.

2 Il faudrait introduire la *permittivité relative* ϵ_r , nombre sans dimension qui relie la permittivité diélectrique ϵ d'un milieu réfringent quelconque à la permittivité du vide $\epsilon = \epsilon_r \epsilon_0$, et montrer comment la *permittivité relative complexe* est reliée à l'indice de réfraction complexe $n = n' + in'' = \sqrt{\epsilon_r}$. On trouvera esquissée plus loin la relation entre indice de réfraction et *impédance* électromagnétique.

3 Deux théories qui peuvent sembler *contradictoires* : on va voir qu'elles sont plutôt *complémentaires* car leurs concepts doivent nécessairement coexister dans certaines opérations, ce qui n'enlève rien au caractère paradoxal de cette coexistence. C'est au fond le débat philosophique fondamental de la physique moderne, mais ce n'est pas le lieu ici de s'y étendre, puisque j'ai fait le point dans la publication récente de mes opuscules de philosophie et de philosophie naturelle.

hertz étant l'unité de mesure des fréquences dans le système international. On peut relier la fréquence mesurée en hertz à la *longueur d'onde* mesurée en mètres par la formule suivante, simple multiplication qui fait intervenir c , la *vitesse de la lumière* dans le vide :

$$c = \text{fréquence (en hertz)} \times \text{longueur d'onde (en mètres)}, \text{ avec :}$$
$$c = 299792458 \text{ m/s (environ 300000 kilomètres par seconde).}$$

On s'intéressera ici presque exclusivement à la première de ces fréquences. La longueur d'onde qui lui est associée est environ 0,0135 m, soit 1,35 centimètre. Il convient de savoir que la fréquence de résonance se présente comme une valeur moyenne : la molécule peut encore, dans une certaine mesure, absorber ou émettre des photons de fréquence plus basse ou plus haute, suivant une loi de probabilité qu'on peut assimiler à une courbe en cloche. Cette courbe en cloche est dite courbe de Lorentz, mais on peut dans une première approche, l'assimiler à une courbe de probabilités plus familière des lycéens, la courbe de Gauss. (La courbe de Lorentz n'est jamais présentée dans les cours de probabilités qui préfèrent s'intéresser aux sondages et aux gallups plutôt qu'au rôle des probabilités spécifiques à la physique : cette courbe de Lorentz est pourtant la clé cachée de cette étude).

Le phénomène est entièrement comparable à celui des raies spectrales qu'on peut voir dans un spectroscope (prisme ou réseau) qui révèle que la lumière émise par un tube à néon, une lampe à vapeur de sodium ou de mercure, loin de présenter toutes les couleurs de l'arc en ciel, ne présente au contraire que certaines couleurs bien séparées apparaissant comme des raies colorées très fines (raies spectrales) correspondant aux transitions d'énergie des atomes, sauf que pour ce qui nous concerne, ce sont des molécules qui subissent des transitions d'énergie⁴ et que ces raies spectrales ne sont pas visibles à l'œil, mais sont captées par des antennes de radio. *Et par l'eau, bien sûr, puisque ce sont les raies spectrales... de l'eau. Et donc par le corps humain qui serait fait de 70% d'eau.*

Il est temps à ce point de jeter un coup d'œil à une conception plus « électrique » de ce qui se passe. L'eau pure est ce qu'on appelle un diélectrique, mot savant pour dire que c'est un isolant (même si d'ailleurs elle n'est pas un isolant *parfait*, d'autant moins qu'elle contient des impuretés). A l'état de gaz (vapeur d'eau) elle obéit parfaitement à la théorie quantique qui précède. A l'état liquide, les choses se compliquent un peu, mais ne changent toutefois pas fondamentalement. Au lieu de recourir au langage des particules (photons) nous allons maintenant emprunter le langage des ondes et des techniques qui lui sont associées en électricité. Le fait que l'eau présente une résonance à 22,2 GHz revient à dire que chaque molécule se présente comme un petit résonateur radioélectrique. On réalise un résonateur en électricité classique en associant une bobine et un condensateur⁵.

Des ondes qui pénètrent dans un milieu diélectrique y subissent un affaiblissement parce qu'une partie de l'énergie y est absorbée. On doit à Debye (vers 1930) une théorie de l'absorption des ondes dans un diélectrique. Cette théorie est classique en ceci qu'elle ne fait intervenir ni le photon, ni l'idée de quantification de l'énergie. Si P_0 est la puissance transportée par l'onde, les pertes sont exprimées par

$$\Delta P = 2 \alpha P_0$$

où α est un coefficient d'affaiblissement⁶. Bien entendu l'énergie perdue se retrouve quelque part : sous forme

4 Il faudrait préciser un peu la nature de ces transitions moléculaires. Sur le plan des principes, il n'y a pas de différence fondamentale avec les transitions atomiques, il s'agit toujours d'émission et absorption de photons. Toutefois on parle ici de *transitions de rotation*, parce que ce ne sont pas les sauts d'électron d'une orbitale moléculaire à une autre qui sont sollicités, mais les variations d'énergie de rotation de la molécule tout entière.

5 Un lycéen sait en principe qu'un condensateur est constitué de deux plaques métalliques proches l'une de l'autre mais qui ne se touchent pas (coupe-circuit) tandis qu'une bobine est tout simplement du fil électrique bobiné. La capacité C des condensateurs se mesure en farads, l'inductance L des bobines se mesure en henrys dans le système international. Si on associe une bobine et un condensateur, on obtient un circuit résonateur qui vibre comme un diapason à une fréquence spécifique. La fréquence de résonance est donnée par la formule de Thomson, avec L en henrys et C en farads (je ne tiens pas compte ici des corrections que j'ai apportées aux unités électriques du système métrique, je les prendrai en compte, en revanche, dans la note 8) :

$$v = 1/[2\pi\sqrt{LC}] \text{ ou}$$
$$\omega = 1/\sqrt{LC}$$

avec $\omega = 2\pi v$ (on dit que ω est une fréquence angulaire ou *pulsation*).

La capacité d'un condensateur constitué de deux plaques planes séparées par la distance d remplie d'un milieu diélectrique se calcule avec : $C = \epsilon S/d$ S est la surface des plaques en regard, ϵ s'appelle la permittivité diélectrique de ce milieu (tirée en fait de la loi d'attraction ou répulsion de Coulomb entre charges électrostatiques, sur le modèle de la loi de Newton de la gravitation universelle, et après avoir choisi des unités électriques rattachées au système métrique). C'est cette permittivité qui est primordiale dans le raisonnement de Debye, exposé ci-après.

6 Ce coefficient peut s'écrire : $\alpha = [\pi(\epsilon''/\epsilon_0) \sqrt{\epsilon'}] / \lambda$

de chaleur. Ce phénomène est exploité dans les fours micro-ondes. Ceux-ci fonctionnent généralement en Europe à 2,450 GHz : une fréquence environ dix fois plus faible que la résonance de rotation de l'eau. Quant aux téléphones portables, leurs fréquences sont au voisinage de 0,9 GHz et 1,8 GHz, leur puissance est de l'ordre du watt, mais il convient d'en évaluer les effets en termes de champ proche (quasi-statique). Le fait que leurs antennes soient camouflées dans le boîtier ne change rien à la tendance de telles ondes à faire bouillir le sang dans la cervelle de celui qui se les colle contre l'oreille (ou dans le sexe de celui qui trimbale ce genre d'appareil dans sa poche). Toutefois les nouveaux contamineurs du sang (et ceux de la biosphère par les OGM) ne sont pas des politiques élus du peuple qu'on peut, qu'on pourrait, au moins en principe, déboulonner (encore qu'on ait pu voir qu'ils courent toujours, ce qui donne une haute idée de la justice et de la morale dans ce monde) mais des industriels et des financiers au dessus de tout contrôle et de tout soupçon. Les verdicts de la justice vont assurément leur donner des ailes. Il faut dire tout de même qu'un peuple qui s'est précipité sur une pareille marchandise de pacotille (on ne l'a pas forcé !) n'a assurément que ce qu'il mérite : le marché est un « parlement virtuel » (Chomsky) mais pas seulement du côté du vendeur. On ne l'a pas informé non plus, alors que cet exposé montre que l'essentiel peut être mis à la portée d'un public de lycée. Celui qui cherche l'information saura donc ici qu'on peut la trouver. On prend sans doute les citoyens pour des imbéciles, il s'agit ici de montrer à quelle école s'instruisent les imbéciles quand ils ne sont pas disposés à s'écraser sous les ordres de la pub, comme si la pub avait la moindre légitimité à donner des ordres, même sur le plan de la vieille légalité bourgeoise (il est vrai que, telle la putain, elle ne dit pas « tu dois ! » mais « tu veux ? »). C'est ma curiosité de simple citoyen de la république du mètre-étalon qui constitue ma seule source d'information, mon seul titre légitime à m'exprimer dans ce domaine, et à vouloir le *restituer à l'école laïque et gratuite*.

Sous forme liquide, la courbe de résonance de l'eau est floue, c'est-à-dire qu'elle est surtout très élargie, l'absorption des ondes ne deviendrait négligeable qu'en dessous de 0,1 GHz. Il est peut-être intéressant à ce point d'aller un peu plus loin dans la théorie de Debye. Celle-ci indique qu'il se passe quelque chose dans tout le voisinage des résonances : une variation rapide de la permittivité diélectrique (c'est-à-dire aussi de l'indice de réfraction au sens de l'optique, qui lui est directement lié, mais qui devient, dans ce voisinage, une grandeur complexe ; on n'insistera pas ici sur cet aspect mathématique⁷, pourtant préliminaire à une étude plus approfondie, parce qu'elle est tout de même délicate sinon difficile, une difficulté qui brouille les cartes, la permittivité étant souvent remplacée par l'étude de la susceptibilité, voire des impédances : ce sont des langages équivalents⁸).

Il faut remarquer que la théorie de Debye qui reste une théorie électromagnétique purement classique *n'explique pas* les résonances (il faut s'en remettre à la théorie quantique des photons émis par transitions de

où ϵ' est la partie réelle de la permittivité, ϵ'' sa partie imaginaire, λ la longueur d'onde dans le vide de l'onde considérée. ϵ_0 est la permittivité statique, purement réelle, à fréquence nulle. Voir aussi la note suivante.

7 La permittivité complexe s'écrit :

$$\epsilon = \epsilon' - i\epsilon''$$

où ϵ' représente la réfraction, et ϵ'' l'absorption. En statique (fréquence nulle) la permittivité se réduit à sa partie réelle. La permittivité peut être reliée à l'indice de réfraction optique ainsi qu'aux impédances électriques du milieu de propagation.

8 Considérons donc la raie de rotation de l'eau à 22,2 GHz : quelles sont les valeurs quantiques d'inductance et de capacité *réduites* (c'est-à-dire divisées par 2π radians) qui leur seraient associées, sous l'hypothèse d'une résonance géométrique associée à l'impédance du vide. On trouve avec $\lambda = 0,0135$ m :

$$\epsilon_0/(2\pi) = 1,409 \text{ pF} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{rad}^{-1} \text{ et } \mu_0/(2\pi) = 0,2 \text{ nH} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{rad}^{-1}$$

$$C_0/(2\pi) = 0,019 \text{ pF} \cdot \text{rad}^{-1} = \epsilon_0 \lambda / (2\pi)$$

$$L_0/(2\pi) = 2,7 \text{ nH} \cdot \text{rad}^{-1} = \mu_0 \lambda / (2\pi)$$

Ces valeurs sont-elles légitimes ? On vérifie sans peine que ces valeurs sont identiques à celles d'un résonateur à bobine et condensateur qui vibrerait à la même fréquence que la molécule d'eau. Pour autant cela ne signifie pas que ces valeurs soient les bonnes : en effet ces formules ont été établies à partir d'un raisonnement sur des lignes accordées en onde entière *adaptées à l'impédance du vide* (qui sert de référence quantique d'un résonateur à propagation « idéal »). Or une molécule est beaucoup plus petite que la longueur d'onde considérée (cela resterait d'ailleurs vrai en appliquant le même raisonnement pour des molécules ou des atomes aux fréquences optiques). Il y a donc lieu de penser que le résonateur moléculaire se présente comme un authentique résonateur à constantes localisées plutôt que comme une antenne à constantes réparties. Un premier pas pour connaître les vraies valeurs de l'inductance et de la capacité associée à la première raie de rotation de l'eau consiste à tenir compte de son indice de réfraction au voisinage de la fréquence considérée (22,2 GHz). Admettons que cet indice soit de l'ordre de 6,5 à la résonance et, provisoirement, qu'il ne dépende pas de la perméabilité magnétique (dès lors supposée identique à celle du vide). Cette hypothèse, qui n'est pas la plus générale, est fondamentale pour ce qui suit, permettant une approche simplifiée du problème. On peut relier aisément les impédances et les indices de réfraction avec $n = n' + i n'' = \mu Z_0 / (Z \mu_0)$

où l'impédance complexe $Z = R + iX$ contient une partie réelle (résistance R) et une réactance imaginaire iX . En supposant que la résonance de l'eau soit dipolaire électrique et ne soit influencée par aucun paramètre magnétique, on peut supposer que $\mu_0 = \mu$, ce qui simplifie considérablement le traitement mathématique des indices complexes car alors $n = Z_0/Z$. Jusqu'à preuve du contraire l'hypothèse peut être tenue pour légitime (en première approximation) puisque c'est une orientation dipolaire électrique des molécules qui est sollicitée par la résonance. Dès lors le calcul suivant se borne à interpréter en termes d'impédances les valeurs numériques relevées sur la courbe des indices. Le résonateur parallèle équivalent à la molécule sera inductif si la fréquence est inférieure, capacitif si la fréquence est supérieure à la résonance. On aura donc :

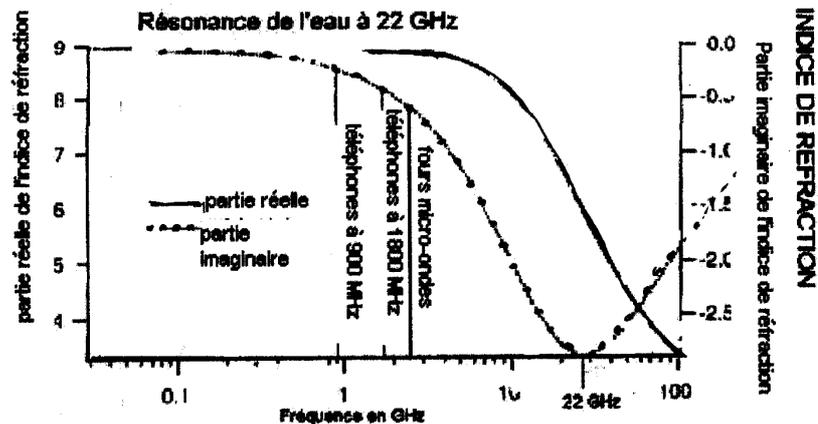
1) la permittivité relative à la résonance : $\epsilon_r = n^2 = 42,25$

2) la vitesse de propagation dans le milieu réfringent : $c' = c/6,5 = 46153 \text{ km/s}$

3) la longueur d'onde « réfractée » dans le milieu réfringent : $\lambda' = \lambda/6,5 = 2,079 \text{ mm}$

rotation pour les explications) mais elle dit en revanche ce qui se passe autour d'une résonance dès lors qu'elle existe et elle indique aussi que cette résonance devient floue lorsque l'eau est en phase liquide et non gazeuse. Dès lors les calculs se ramènent à un raisonnement sur les pertes dans les diélectriques.

On retiendra pour ce qui nous concerne que les micro-ondes font bouillir le sang (comme le sait d'ailleurs toute ménagère qui fait réchauffer une sanguette ou du boudin noir : il est seulement permis de se demander si elle a fait le rapprochement avec les micro-ondes de son téléphone⁹) sans qu'on puisse présumer avec précision ce qu'elles peuvent bien faire d'autre... Mais c'est déjà bien de savoir au moins cela.



Ce texte a été publié en mars 2005 par l'ex association Le Graviton Evanescent, dans un opusculé intitulé *De l'éthique considérée comme philosophie naturelle ou La théorie des jeux et les événements sans cause*.

- 4) la permittivité réduite à la résonance : $\epsilon / (2\pi) = 59,53 \text{ pF} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{rad}^{-1}$
- 5) la perméabilité magnétique à la résonance : $\mu_0 / (2\pi) = 0,2 \text{ }\mu\text{H} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{rad}^{-1}$
- 6) la capacité réduite à la résonance : $C / (2\pi) = 0,124 \text{ pF} \cdot \text{rad}^{-1}$
- 7) l'inductance réduite à la résonance : $L / (2\pi) = 0,415 \text{ nH} \cdot \text{rad}^{-1}$ et
- 8) l'impédance à la résonance : $Z = \sqrt{(\mu_0 / \epsilon)} = 58 \text{ ohms}$.

On peut assimiler cette dernière à une résistance de rayonnement (voire en tirer des adaptations d'impédance si on cherche à exploiter le phénomène par couplage avec un résonateur, dans la recherche d'un effet maser, par exemple) : des valeurs de composants équivalents calculés seront d'autant mieux adaptées qu'elles serreront de plus près les grandeurs attachées au phénomène. Le schéma électrique « résonateur parallèle » de la molécule d'eau en résume la représentation équivalente, la résistance en parallèle exprimant les pertes (partie réelle de l'impédance). On vérifie de nouveau que les valeurs obtenues sont bien celles d'un résonateur parallèle à bobine et condensateur qui vibrerait à la même fréquence que la molécule d'eau, bien que les valeurs tenant compte de l'impédance (ou de l'indice) soient sensiblement différentes de la première approche. La solution complète de ce problème mériterait sans doute une étude plus approfondie de l'indice de réfraction réparti entre la permittivité diélectrique et la perméabilité magnétique : le problème trouverait alors peut-être une application dans la résonance magnétique nucléaire des protons de l'eau, à des fréquences beaucoup plus basses (2 kHz dans le champ terrestre). Dans le cas simple envisagé ici, ne dépendant que de la variation de permittivité, l'indice de réfraction se ramène au rapport de l'impédance du vide à l'impédance dans le milieu réfringent (toutefois, à la résonance, le circuit équivalent « parallèle » est plus capacitif que le modèle idéal adapté au vide avec une longueur d'onde non réfractée : pour une transition dipolaire magnétique, le résultat serait plus inductif, on pourrait préférer une représentation équivalente « en série »...).

Il n'est pas étonnant, en définitive, de trouver une similitude entre les courbes de résonance telles qu'elles sont exprimées par les radioélectriciens, en termes d'impédance (partie réelle pour les résistances pures et partie imaginaire pour les réactances) et telles qu'on les trouve en optique, exprimées en termes d'indices complexes (partie imaginaire pour l'absorption et partie réelle pour la réfraction) voire en termes de susceptibilité complexe. Les deux représentations sont reliées de façon simple tant que l'indice ne dépend que d'une seule composante du champ électromagnétique (permittivité ou perméabilité) et les courbes sont homologues (il faut toutefois se méfier : il n'y a pas, en général et d'un point de vue mathématique, de passage simple des courbes d'indices aux courbes d'impédance, hormis dans quelques cas particuliers, heureusement répandus dans la nature ; il n'a pas échappé à la vigilance de notre lecteur que les amplitudes des résonances apparaissent dans la partie réelle des impédances alors qu'elles apparaissent dans la partie imaginaire des indices). Le traitement de cet exemple suffit à montrer toutefois qu'une résonance quantique (comme celle de la rotation de la molécule d'eau) n'est pas différente d'une sorte de résonance à constantes localisées. Sans aller jusqu'à soutenir que l'atome (ou la molécule) est réellement constitué d'une bobine ou d'un condensateur, on est en droit de supposer au moins la réalité structurale des dimensions associées à ces composants artificiels. On pourrait en revanche soutenir sans réserve qu'un circuit localisé obéit bien aux lois quantiques. Comme preuve de cette affirmation, on peut proposer une petite expérience de coin de table. Supposons qu'on ait un oscillateur à constantes localisées, réalisées sous forme de composants artificiels, une bobine d'inductance réduite $L / (2\pi) = 50 \text{ mH} \cdot \text{rad}^{-1}$ et une capacité réduite $C / (2\pi) = 220 \text{ nF} \cdot \text{rad}^{-1}$, le système résonne au voisinage de $\nu = 1517 \text{ Hz}$, son impédance Z est de 477 ohms . Un oscillateur quantique de référence adapté au vide ($Z_0 = 377 \text{ ohms}$) aurait une inductance réduite de $39,5 \text{ mH} \cdot \text{rad}^{-1}$ et une capacité réduite de $278,3 \text{ nF} \cdot \text{rad}^{-1}$. On peut en tirer un pseudo-indice $n = Z / Z_0 = 1,26$ (c'est un pseudo-indice entre autres choses parce que la longueur d'onde réfractée reste beaucoup plus grande que la dimension du circuit ; à noter que le calcul de $n = Z / Z_0$ est inversé par rapport à la formule donnée plus haut parce que le circuit est trop « inductif » par rapport à la référence adaptée au vide). Si l'on a par ailleurs déjà mesuré la charge élémentaire e et la constante de structure fine α , on vérifie que l'on peut sur un coin de table mesurer la constante de Planck :

$h = 2\pi e^2 / (4\pi \alpha c \nu)$, les 2π au numérateur proviennent de l'utilisation correcte de la capacité et de l'inductance réduites dans la valeur donnée plus haut des composants.

Une étude plus approfondie pourrait explorer deux pistes : d'une part le rôle éventuel de résonances magnétiques aux fréquences les plus basses, d'autre part la géométrie réelle de la molécule, beaucoup plus localisée que ne laisse supposer la longueur d'onde réfractée.

9) Mais, à supposer qu'elle ait été au lycée, sait-elle au moins ce que sont des micro-ondes ? Sinon la question suivante qui vient est : mais que fait l'école laïque et gratuite ?