

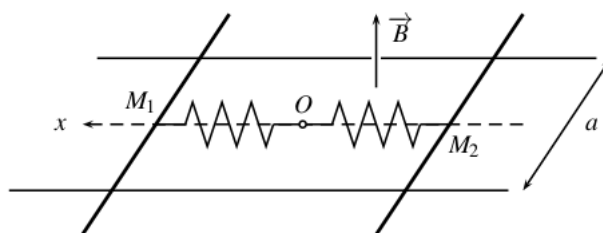
## DM 11 : Induction et cristallographie

**Problème 1 : Deux tiges reliées par des ressorts**

Deux barreaux identiques de masse  $m$ , parallèles, sont reliés par leurs milieux à deux ressorts identiques de raideur  $k$ . Les deux ressorts sont attachés au point  $O$ . Les barreaux glissent sans frottement sur deux rails parallèles, horizontaux, distants d'une longueur  $a$ . Le tout est plongé dans un champ magnétostatique uniforme orthogonal au plan formé par les rails et les barreaux.

La résistance électrique du circuit filiforme ainsi créé est  $R$ , constante quelles que soient les positions des barreaux. De plus, l'autoinductance du circuit sera négligée. Soient  $M_1$  et  $M_2$  les points d'attache entre les barreaux et les ressorts. On repère la position des barreaux par  $x_1(t)$  et  $x_2(t)$ , distance entre  $M_1$ , ou  $M_2$ , et leur position à vide, où les ressorts ont leur longueur propre.

À l'instant initial, les vitesses des barreaux sont nulles,  $M_1$  est écarté d'une distance  $b$  par rapport à sa position au repos et  $M_2$  est au repos.



1. Expliquer physiquement ce qu'on observe.
2. Quelles sont les deux équations couplées qui régissent le mouvement des barreaux ?
3. Calculer  $x_1(t)$  et  $x_2(t)$  en régime permanent via le changement de fonction :

$$\sigma(t) = x_1(t) + x_2(t) \text{ et } \delta(t) = x_1(t) - x_2(t) .$$

4. Dresser et interpréter un bilan énergétique.

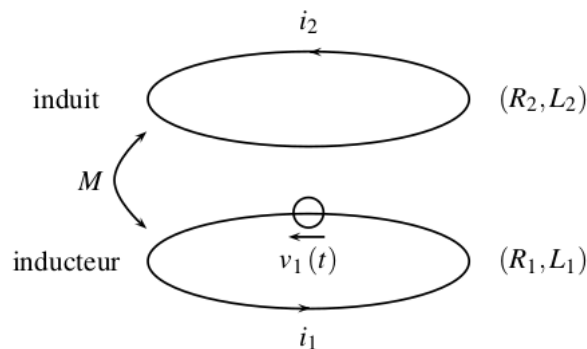
**Problème 2 : Table à induction**

Le chauffage du fond métallique des récipients de cuisson peut être directement réalisé au moyen de courants de Foucault induits par un champ magnétique variable.

Logé dans une table en céramique, un bobinage, nommé l'inducteur, alimenté en courant sinusoïdal génère ce champ. Le transfert d'énergie électrique s'effectue par induction mutuelle entre

ce bobinage et la plaque circulaire assimilable à une spire unique fermée sur elle-même, situé au fond d'une casserole.

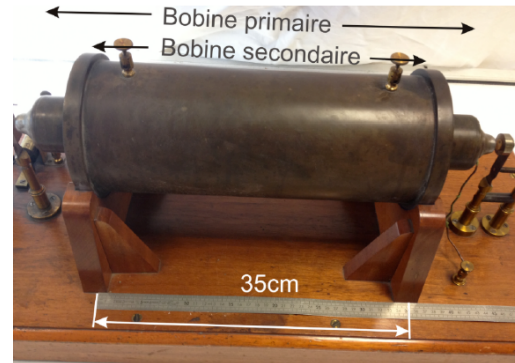
L'inducteur, de 5 cm de rayon, comporte 20 spires de cuivre de résistance électrique  $R_1 = 1,8 \cdot 10^{-2} \Omega$  et d'autoinductance  $L_1 = 30 \mu\text{H}$ . La plaque de résistance  $R_2 = 8,3 \text{ m}\Omega$  et d'autoinductance  $L_2 = 0,24 \mu\text{H}$ , nommée l'induit, est assimilable à une spire unique refermée sur elle-même. L'inducteur est alimenté par une tension  $v_1(t)$ . L'ensemble plaque (induit)-inducteur se comporte comme deux circuits couplés par une mutuelle  $M$ .



1. Écrire les équations électriques relatives aux deux circuits (équations de couplage entre  $i_1$  et  $i_2$ ).
2. En déduire l'expression littérale du rapport des amplitudes complexes  $\underline{I}_2/\underline{I}_1$ .
3. En déduire l'expression littérale de l'impédance d'entrée complexe du système :  $\underline{Z}_e = \underline{V}_1/\underline{I}_1$ .
4. On choisit  $\omega$  telle que  $R_1 \ll L_1\omega$  et  $R_2 \ll L_2\omega$ . Simplifier les deux expressions littérales précédentes, puis effectuer le calcul numérique de leur module, sachant que l'inductance mutuelle est estimée à  $M = 2 \mu\text{H}$ .
5. On soulève la plaque à chauffer ; on demande un raisonnement purement qualitatif. L'amplitude du courant  $i_1$  appelé par l'inducteur augmente-t-il ou décroît-il ?

### Problème 3 : Bobine de Ruhmkorff

L'éclair est la manifestation la plus visible d'une décharge électrique dans un gaz devenant subitement conducteur. De telles étincelles sont aussi courantes dans notre environnement technologique. Ces décharges sont souvent indésirables (ouverture d'un disjoncteur, rupture de liaison avec les caténaires du TGV, déroulement rapide d'une bobine de tissu dans l'industrie textile, ...), mais on cherche parfois à les contrôler (bougie d'allumage des moteurs à explosion, allume gaz, ...). Le passage du courant électrique dans le gaz modifie à la fois ses caractéristiques thermodynamiques et son degré d'ionisation. Bien que ces états transitoires ainsi créés soient de brève durée, il est possible de suivre leur évolution par une technique de déflexion de faisceau laser.

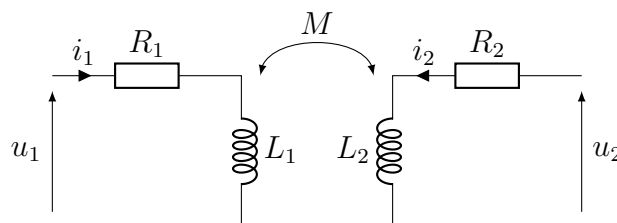


Pour produire les hautes tensions nécessaires au déclenchement des étincelles, on a souvent recours à un couplage inductif entre deux circuits électriques. Cette technique a été initiée par Ruhmkorff vers 1850 au prix d'une véritable prouesse technologique. La bobine de Ruhmkorff a joué un rôle déterminant dans plusieurs découvertes de la physique fondamentale de la fin du XIX<sup>ème</sup> siècle. Cet exercice porte sur des essais d'une telle bobine de Ruhmkorff datée de 1852 et toujours en parfait état de marche.

Une bobine de Ruhmkorff est une association de deux bobines cylindriques de même axe de révolution (on peut se référer à la photographie présentée sur la figure ci-contre. L'enroulement primaire est constitué d'un petit nombre de spires de gros fil de cuivre tandis que la bobine secondaire comporte un très grand nombre de spires de fin fil de cuivre.

Les valeurs des résistances des deux enroulements sont très différentes. La résistance de la bobine primaire est mesurée avec un ohmmètre qui indique  $R_1 = 1,23 \Omega$ . La mesure de la résistance  $R_2$  de la bobine secondaire donne  $R_2 = 9,75 \text{ k}\Omega$ .

Le couplage inductif entre ces bobines correspond au schéma électrocinétique équivalent donné ci-dessous.



Afin de déterminer les valeurs des coefficients d'auto-inductances  $L_1$  et  $L_2$  et l'inductance mutuelle  $M$ , plusieurs expérimentations ont été menées. Des graphes issus des ces différentes

expériences sont fournis dans le document réponse (figures A, B et C). Ils peuvent servir de support pour illustrer la démarche.

**Expérience 1** La bobine secondaire étant en circuit ouvert, la bobine primaire est montée en série avec un générateur basse fréquence de résistance interne  $R_g = 50\,\Omega$  et une résistance additionnelle  $R_0 = 100\,\Omega$ . Le signal délivré par le générateur est une tension périodique en créneaux de valeur minimale nulle. Le signal enregistré et représenté sur la figure A est la tension aux bornes de  $R_0$ .

**Expérience 2** La bobine primaire étant en circuit ouvert, la bobine secondaire est associée en série à une résistance  $R_a = 1,0 \cdot 10^4\,\Omega$ . L'ensemble des deux dipôles est alimenté en signal sinusoïdal. La figure B indique les graphes donnant les deux tensions sinusoïdales aux bornes de la bobine secondaire et de la résistance  $R_a$ .

**Expérience 3** Deux voltmètres de très grande impédance interne sont branchés aux bornes de la bobine primaire pour l'un et de la bobine secondaire pour l'autre. La bobine primaire est alimentée par un générateur de tension sinusoïdale. Le graphe de la figure C montre que le rapport des deux valeurs efficaces dépend de la fréquence.

En s'appuyant sur ces expériences, estimer les valeurs de  $L_1$ ,  $L_2$  et  $|M|$ . Comparer aux valeurs rencontrées en travaux pratiques.

## Problème 4 : Glace

De nombreux sports de « glisse » se pratiquent sur la neige, comme le ski et le snowboard, ou sur la glace, comme le patinage et la conduite automobile sur verglas. Nous allons étudier différentes propriétés de l'eau, support de ces mouvements.

**1.a.** Donner les structures électroniques de l'hydrogène H ( $Z = 1$ ) et de l'oxygène O ( $Z = 8$ ).

**1.b.** Donner la formule de Lewis de la molécule d'eau.

**1.c.** Pourquoi la liaison OH est-elle polarisée ?

L'étude expérimentale permet de constater que la molécule d'eau est plane, coudée, (représentation figure 4) faisant un angle de  $104,45^\circ$  avec une distance entre oxygène et hydrogène qui vaut  $95,84\text{ pm}$ .

**2.a.** Comment interpréter le fait que l'angle ne soit pas celui qui existe dans un tétraèdre régulier ( $109,5^\circ$ ) autour de son centre vers deux sommets ?

**2.b.** La molécule possède un moment dipolaire égal à  $1,8$  Debye. Préciser sa direction et le sens de ce moment à l'aide d'un schéma.

**2.c.** Déterminer la charge partielle portée par l'hydrogène.

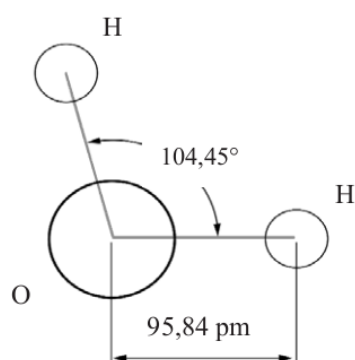
**2.d.** Quel type de solvant est l'eau ? Citer des conséquences de cette propriété.

**3.a.** Indiquer ce qu'on appelle les forces de Van der Waals.

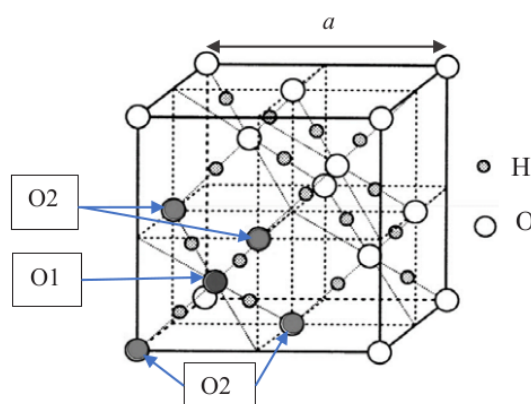
**3.b.** De quelle nature sont les interactions dites liaisons hydrogène ?

**3.c.** Pouvez-vous donner un ordre de grandeur de l'énergie de la liaison hydrogène et la comparer aux autres liaisons chimiques que vous connaissez ?

Le cristal de glace est un cristal moléculaire dans lequel la cohésion entre molécules est assurée par les liaisons hydrogène.



**Figure 4** - Molécule d'eau



**Figure 5** - Structure de la glace.

**4.** Il existe plusieurs variétés allotropiques de glace. Dans les cristaux de glace « de type diamant », il y a un arrangement régulier des molécules d'eau qui est représenté sur la figure 5. Les atomes d'oxygène occupent les positions du réseau cubique à faces centrées ainsi qu'un site tétraédrique sur deux de ce réseau. Sur la figure 5, l'oxygène O1 (en noir) occupe un site tétraédrique entouré par les quatre oxygènes O2 (en gris) formant un tétraèdre régulier.

Entre l'oxygène du centre et un oxygène du sommet se trouve un hydrogène qui n'est pas à égale distance des deux oxygènes car il est engagé avec l'un dans une liaison de covalence (distance  $d_1 = 96$  pm) et avec l'autre dans une liaison hydrogène (distance  $d_2 = 180$  pm). En déduire la longueur de l'arête  $a$ , de la maille, représentée figure 5.

## Bobine de Ruhmkorff - Annexe

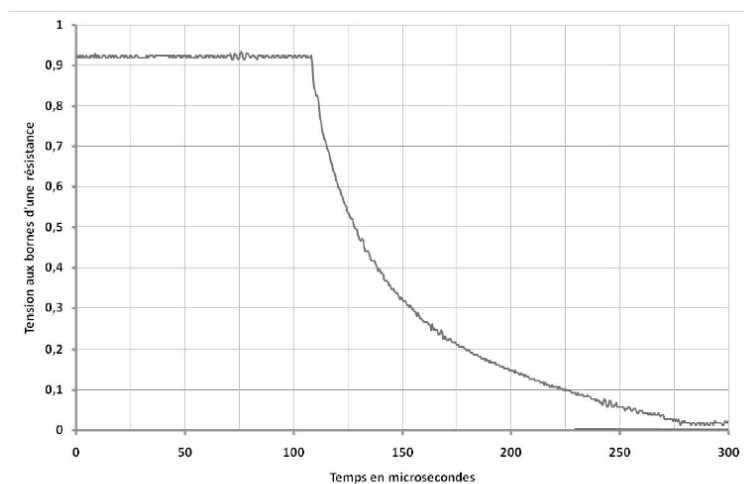


Figure A Expérience 1 : régime transitoire dans le circuit primaire

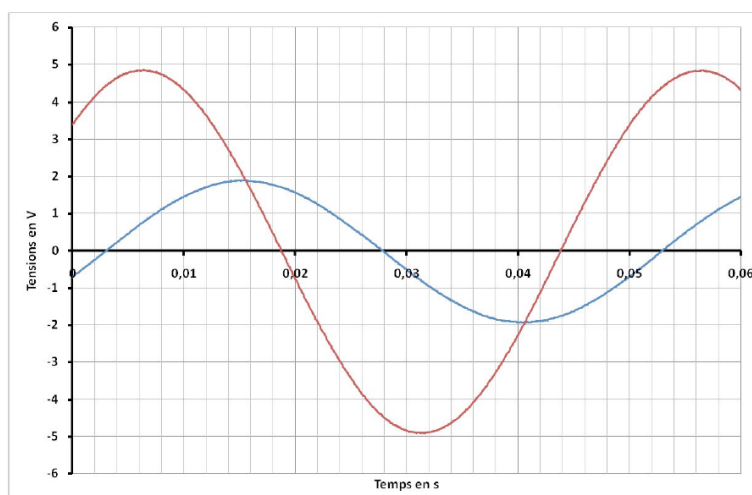


Figure B Expérience 2 : régime sinusoïdal forcé du circuit secondaire

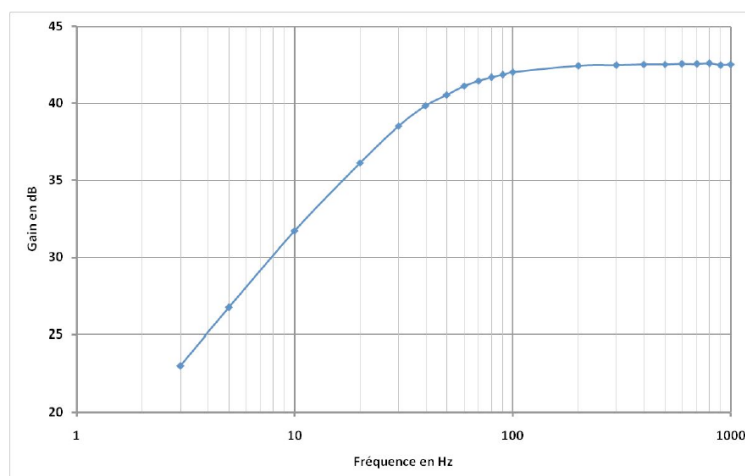


Figure C Expérience 3 : diagramme de Bode du couplage inductif entre les deux bobines coaxiales