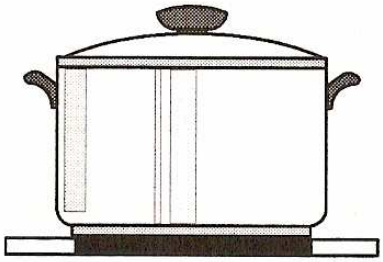
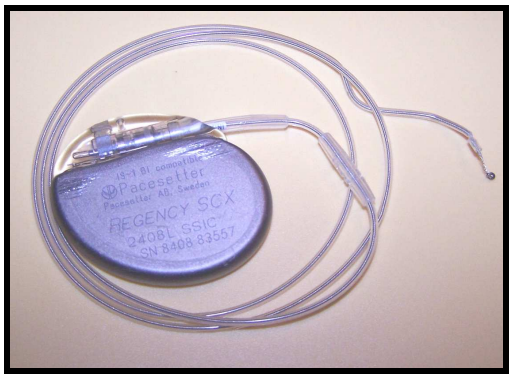




Plaque de cuisson à induction et pacemaker font-ils bon ménage?

Plus rapides, plus sûres, plus économes, les plaques à induction révolutionnent la cuisson et envahissent de plus en plus les cuisines françaises. Leur secret : l'application d'un phénomène découvert au XIX° siècle, l'induction électromagnétique. Néanmoins l'application domestique d'un tel phénomène sera très tardive : le fabricant Scholtes lance sur le marché la première table en 1979. Il faudra finalement attendre les années 90 pour voir arriver dans les cuisines des plaques fiables et moins coûteuses.

Un tel succès s'explique par la très astucieuse succession de processus physiques mis en jeu pour cette technique de cuisson, qui lui confère une grande efficacité.

Son principe : Créer un champ magnétique oscillant au dessus de la plaque vitrocéramique, grâce à la circulation d'un courant alternatif intense qui circule dans une bobine. Ce champ va induire au fond du récipient une multitude de courants de Foucault, qui, par effet Joule, vont chauffer les aliments. Une seule condition pour que cette cascade de processus électromagnétiques s'enclenche est que le fond du récipient soit ferromagnétique.

L'avantage de cette cuisson ? La chaleur est directement générée dans le récipient, ce qui évite les déperditions d'énergie.

Notre corps est insensible au champ magnétique. La main ne peut pas être le siège de courants de Foucault et ne risque pas d'être brûlée lorsqu'elle se pose sur une plaque à induction.

Après une étude historique qui nous a montré comment à partir de la pile de Volta on a découvert le phénomène d'induction électromagnétique, phénomène qui est utilisé dans les plaques de cuisson à induction, on a réalisé une plaque de cuisson didactique. La conception de cette plaque a nécessité l'étude de divers phénomènes physiques : oscillateur sinusoïdal, amplificateur de puissance, correction du phénomène de distorsion engendré par l'amplificateur Push – Pull, résonance d'intensité……

Enfin, après avoir étudié le fonctionnement du cœur et du pacemaker, on s'est intéressé au dérèglement de ce dernier par une plaque de cuisson à induction.

1. Produire de l'électricité avec le magnétisme: l'induction électromagnétique

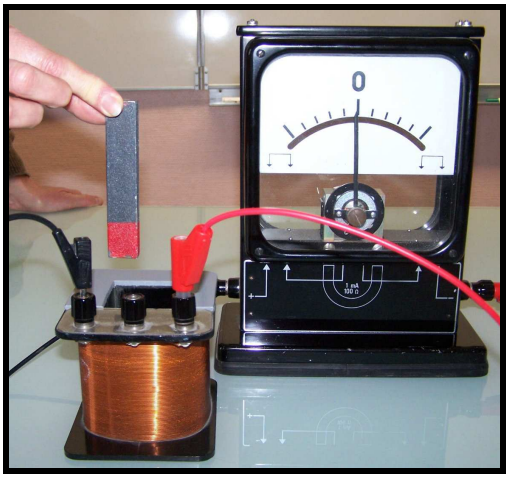
On sait depuis l'expérience du physicien danois **Hans Christian Oersted** qu'un conducteur parcouru par un courant se comporte comme **un aimant**.

Il crée dans l'espace environnant un champ magnétique. L'intensité du champ est proportionnelle à l'intensité du courant qui traverse le conducteur
B = KI B en tesla (T) I en ampère (A) k dépend de la forme géométrique du circuit.

Peut-on à partir d'un champ magnétique induire un courant?

La réponse à cette question fut apportée en août 1831 par le physicien anglais **Michael Faraday** (1791-1867) autodidacte et expérimentateur de génie!

Un courant éphémère, appelé **courant induit**, est obtenu en déplaçant un aimant à l'intérieur d'une bobine.
C'est exactement l'inverse de l'expérience d'Oersted

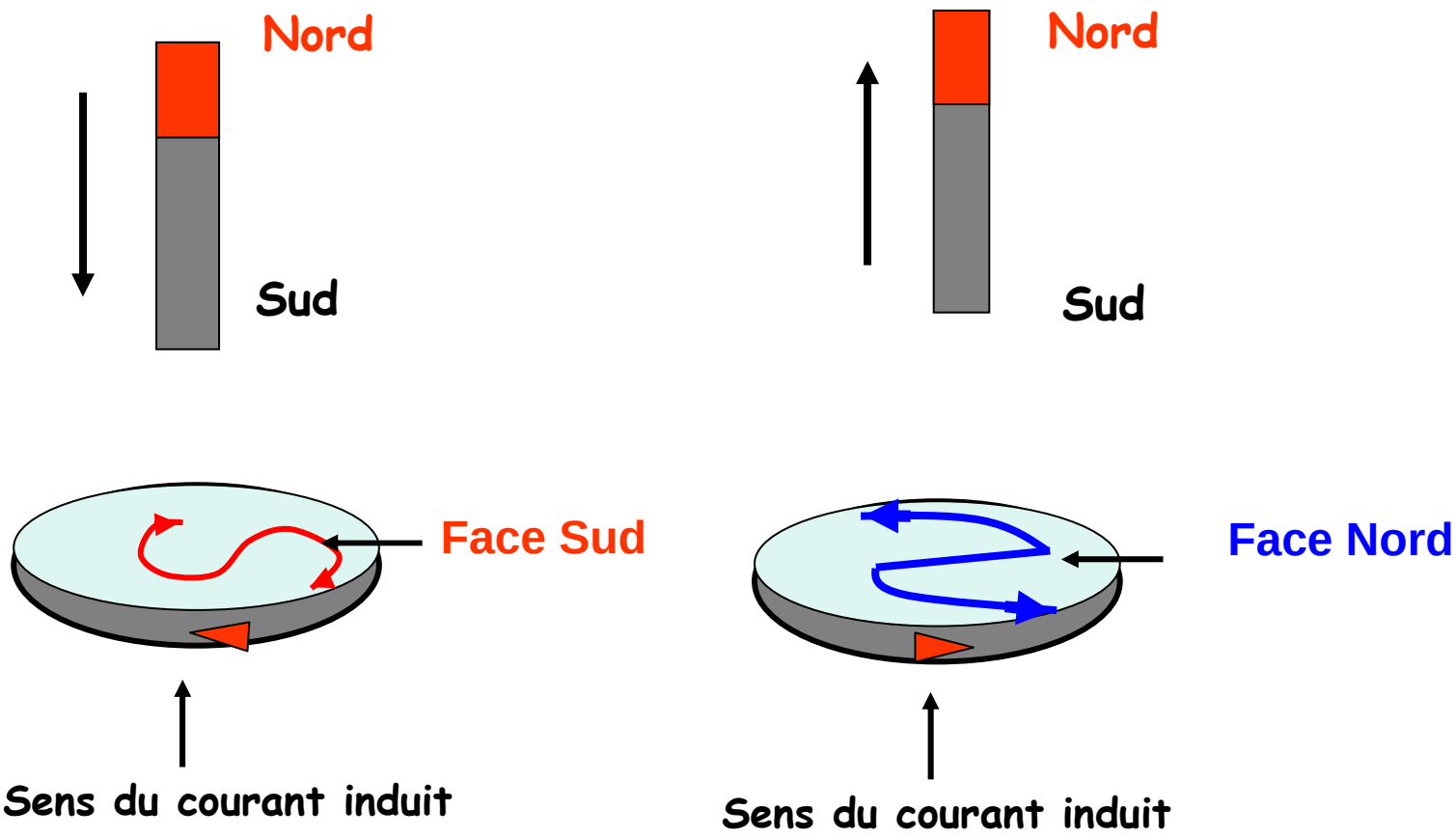


Lorsque l'on approche un aimant d'une bobine, ou lorsqu'on l'éloigne, un courant induit temporaire, décelé par l'ampèremètre à zéro central,, traverse la bobine. Le résultat est analogue si on approche ou on éloigne la bobine de l'aimant.

Lorsque le champ magnétique à l'intérieur d'une bobine varie, celle-ci se comporte comme un générateur.

Le sens du courant induit est tel que par ses effets, il tend à s'opposer à la cause qui lui a donné naissance
(Loi de modération du physicien russe Heinrich Lenz (1804-1865).

Approchons par exemple le pôle Sud d'un aimant droit d'une bobine plate, puis retirons le. Dans les deux cas, le champ magnétique à l'intérieur de la bobine va varier ; un courant induit va donc circuler dans celle-ci. Déterminons le sens du courant induit en utilisant la loi de Lenz.



Lorsque l'on approche le pôle Sud de l'aimant de la bobine plate, le courant induit va circuler dans la bobine plate de telle sorte que la face de la bobine proche du pôle Sud devienne une face Sud (Deux pôles de même noms se repoussent). La bobine tend donc à s'opposer à l'approche de l'aimant.
Par contre lorsque l'on éloigne le pôle Sud , le courant induit va générer une face Nord

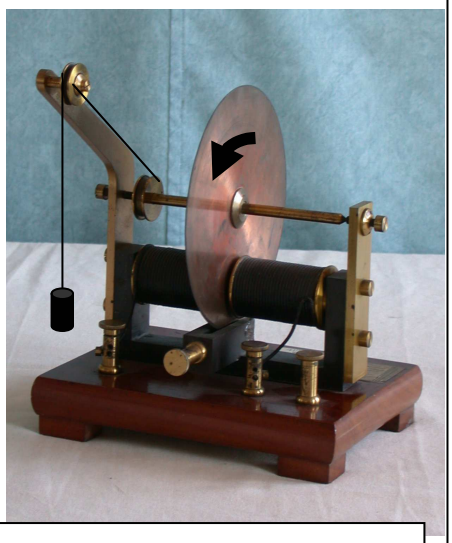
(Deux pôles de noms contraires s'attirent). La bobine va donc s'opposer à l'éloignement de l'aimant.
Dans les deux cas le système réagit de façon à **s'opposer à la cause de l'induction.**

2. Courants de Foucault

Foucault Léon Jean Bernard (1818 - 1868), physicien français. ***Très connu pour avoir mis en évidence à l'aide d'un pendule la rotation de la Terre autour de l'axe des pôles.***

Lorsque dans une masse métallique le champ magnétique **varie**, des courants induits prennent naissance dans ce conducteur; ces courants sont appelés **courants de Foucault**. Selon la loi de Lenz le sens de circulation de ces courants sera tel que par ses effets ils s'opposent à la cause qui lui a donné naissance.

Premier cas : Conducteur en mouvement dans un champ magnétique



Dispositif du musée du lycée

Un disque plein en cuivre est mobile dans l'entrefer d'un électroaimant. Son mouvement peut être obtenu par la chute d'un corps. Lorsque l'électroaimant est alimenté, le mouvement du disque est freiné (le freinage est d'autant plus grand que le champ magnétique dans l'entrefer est important).
On réalise ainsi certains dispositifs de ralentissement des camions ou des cars. Les disques, solidaires des roues, sont mobiles dans l'entrefer d'un électroaimant que l'on alimente, lors du freinage, par un courant fourni par la batterie.

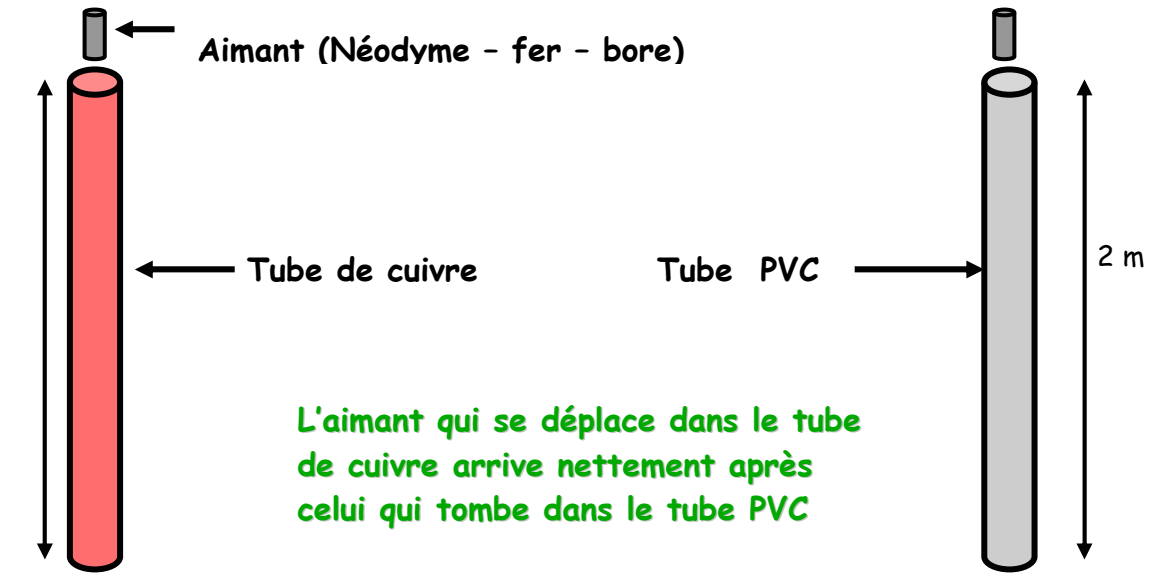
Deuxième cas : Champ magnétique variable dans un conducteur immobile (voir expérience du paragraphe 3)

3. Phénomène d'induction associé au mouvement d'un aimant dans un tube de cuivre

Expérience : Une chute ralentie !

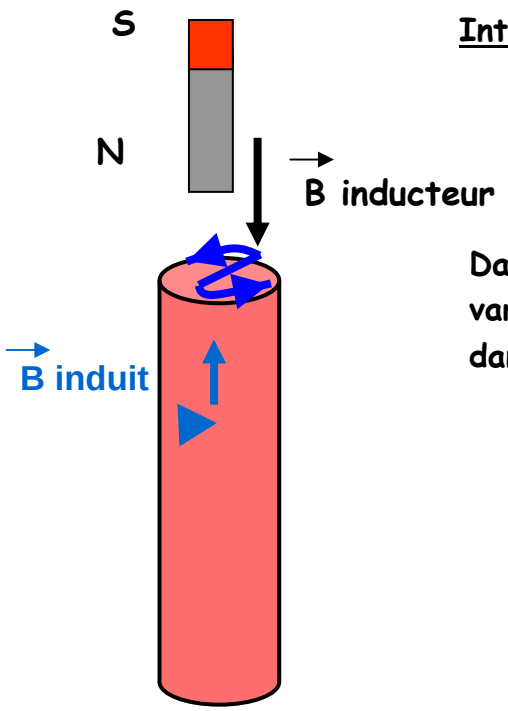
Laissons tomber un aimant au néodyme –fer -bore dans un tuyau en cuivre de 2 m de hauteur. L'aimant est très ralenti dans sa chute à l'intérieur du tuyau en cuivre. (*l'intensité du champ magnétique créé par cet aimant est de l'ordre du tesla (T)).*

Si on remplace le tuyau en cuivre par un tuyau PVC de même hauteur, la durée de chute de l'aimant est très brève.



Durée de chute
t_1 = 10 s

Durée de chute
t_2 = 0,6 s



Interprétation

Dans le tube en cuivre, le champ magnétique varie. Des *courants de Foucault* vont circuler dans le tube.

Ces courants induits créent à leur tour un champ magnétique induit qui s'oppose selon la loi de Lenz au champ magnétique d'origine inducteur. Ainsi les deux champs s'opposent l'un à l'autre.

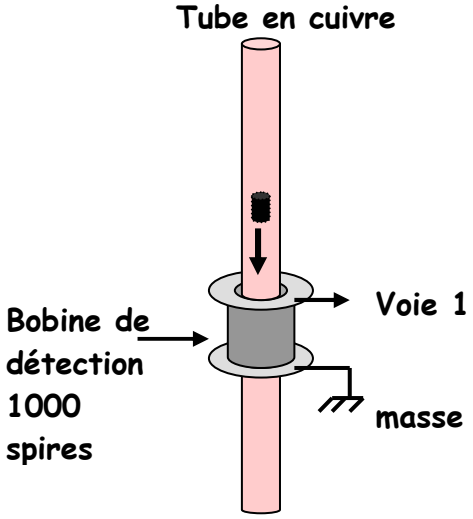
C'est pour cette raison que l'aimant est freiné dans sa chute.

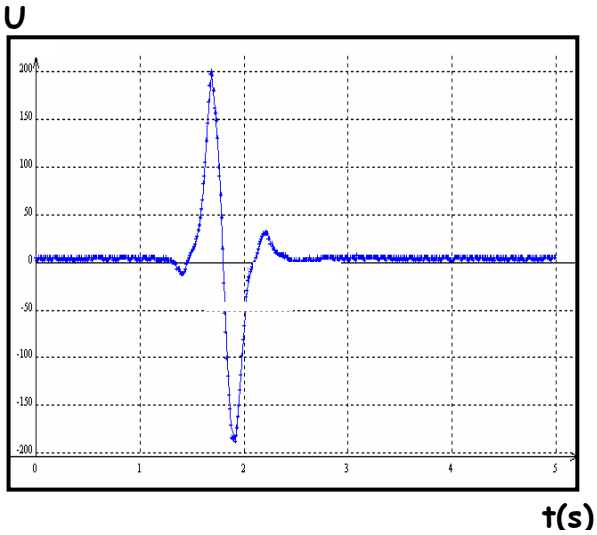
Remarque :
La durée de chute est d'autant plus grande que l'on associe plusieurs tubes de cuivre de rayon croissant en les emboîtant.

Analyse du mouvement de chute de l'aimant à l'intérieur du tube de cuivre

Comme l'on ne peut pas filmer le mouvement de chute de l'aimant à l'intérieur du tube, analysons son mouvement à l'aide du phénomène d'induction électromagnétique.

Expérience :
Faisons passer la tige en cuivre à l'intérieur d'une bobine et relions ses bornes à l'interface d'acquisition. Lâchons sans vitesse initiale l'aimant.





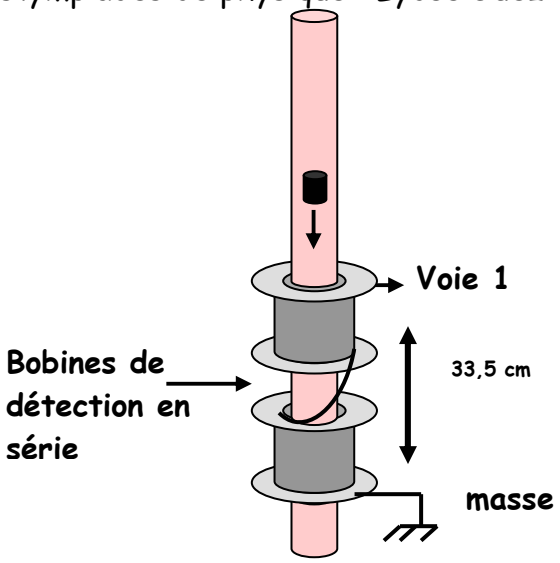
Lors du passage de l'aimant dans la bobine, l'interface d'acquisition détecte un double pic de tension aux bornes de celle-ci. Cette tension induite résulte d'une variation de champ magnétique à travers la bobine de détection (l'aimant s'approche de la bobine, puis s'en éloigne).

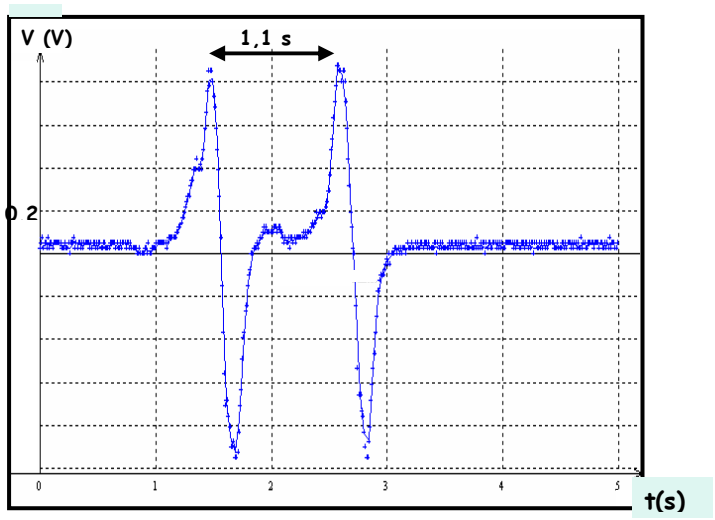
Les deux pics de tension ont même amplitude.

Ceci peut s'expliquer en supposant que le mouvement de l'aimant dans le tube est uniforme.

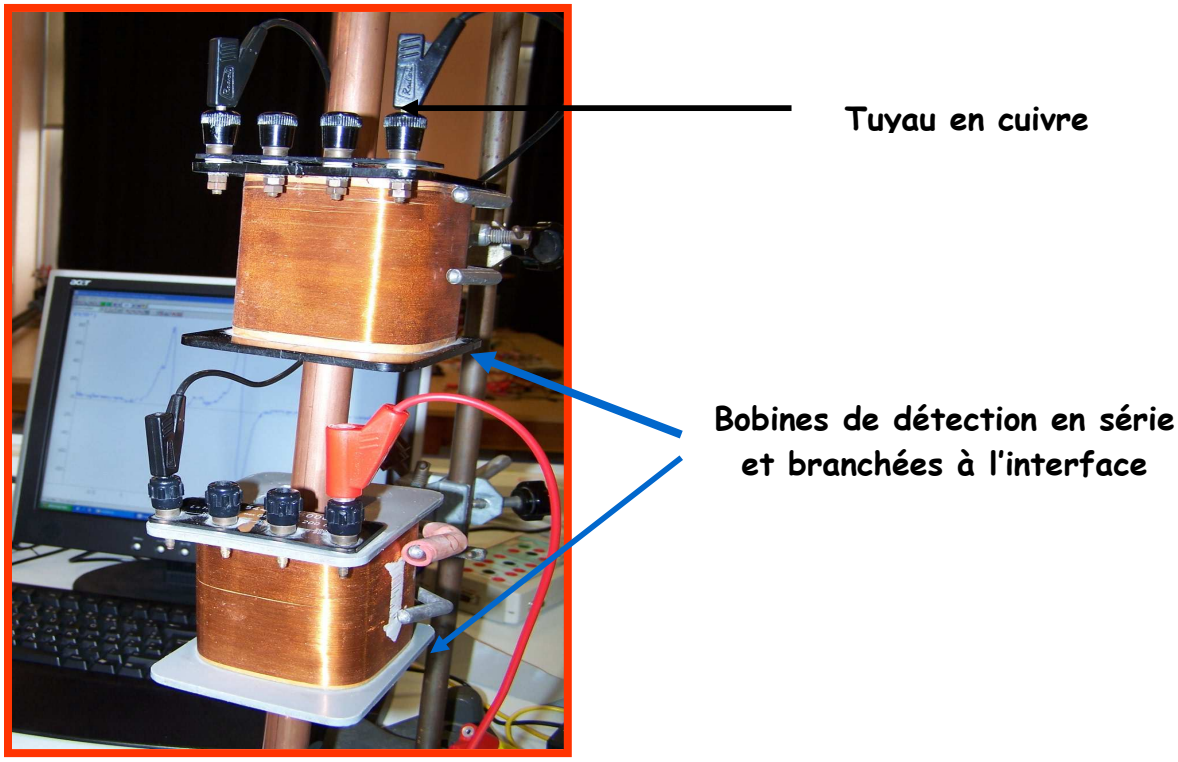
Mesure de la vitesse de l'aimant

L'aimant tombe dans le tuyau en cuivre d'un mouvement uniforme. Déterminons sa vitesse en utilisant toujours le phénomène d'induction électromagnétique.





Pour déterminer la vitesse de l'aimant, on place deux bobines connectées en série et espacées de 33,5 cm. Le passage de l'aimant par l'une ou l'autre bobine se traduit par un pic de tension. La similitude des deux pics indique que l'aimant se déplace d'un mouvement uniforme dans le tube.
V = 0,335/1,1= 0,30 m/s

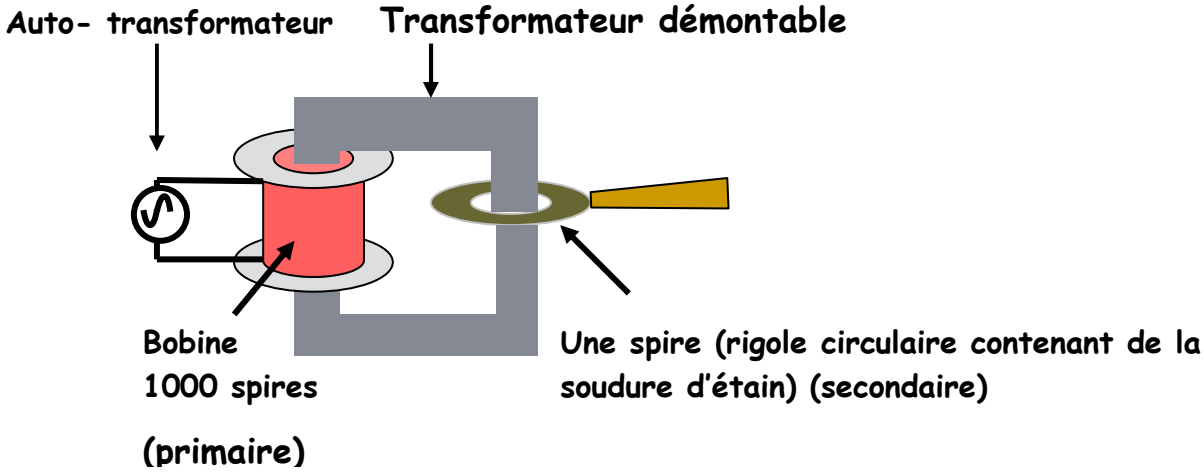


4. Chauffage par induction

Lorsque le champ magnétique varie dans un conducteur métallique, celui-ci est alors parcouru par des courants induits. Le courant est un déplacement

d'électrons dans le milieu conducteur. Ce mouvement d'électrons crée un échauffement dans le conducteur métallique : **c'est l'effet Joule**.

Expérience :
On utilise un transformateur démontable : le primaire est constitué d'une bobine de 1000 spires alimentée par un auto -transformateur ; le secondaire est constituée d'une seule spire formée d'un creuset annulaire dans lequel on dispose un peu de soudure.

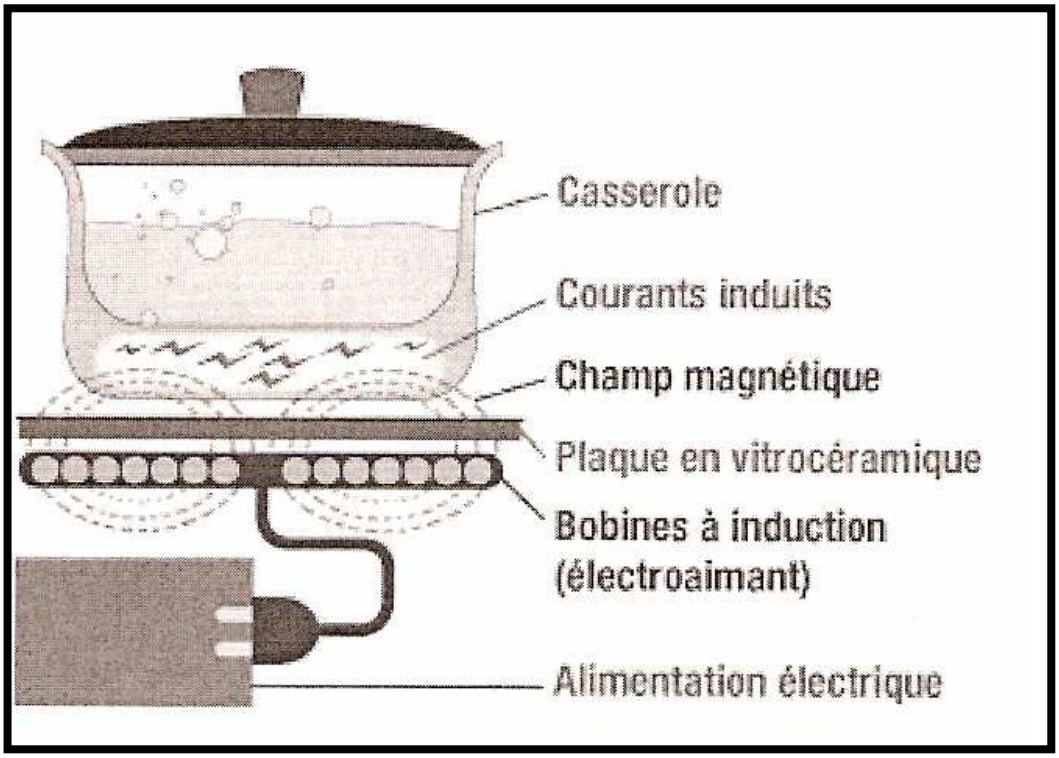


La spire, siège d'une variation de champ magnétique, est parcourue par des courants de Foucault. La quantité de chaleur dégagée par effet Joule au secondaire permet d'amener le métal en fusion. **C'est le principe des fours à induction.**

Le noyau de fer doux du transformateur est le siège également de courants de Foucault qui peuvent devenir intense et dissiper une puissance importante par effet Joule. Pour les atténuer, on « entrave » les courants en remplaçant le bloc de fer par un ensemble de feuilles minces isolées entre elles.

5. Principe d'une plaque de cuisson à induction

Faraday tenta-t-il d'exploiter les courants de Foucault pour chauffer son thé en agitant un aimant au-dessus d'un pot en fer?
La méthode n'est pas très efficace (!), mais le principe d'une plaque de cuisson à induction est là!



Les tables de cuisson à induction sont constituées d'enroulements de cuivre (bobine) recouverts d'une plaque sur laquelle on dépose une casserole à fond métallique. La bobine, parcourue par un courant alternatif sinusoïdal de fréquence 20 kHz, créé un **champ magnétique variable**. Le fond de la casserole est parcouru par des **courants de Foucault**. La chaleur est créée, par **effet Joule**, par ces courants induits dans le fond même de la casserole.
Le fond de la casserole est **ferromagnétique.**

On désigne par ferromagnétisme la propriété qu'ont certains corps de s'aimanter très fortement sous l'effet d'un champ magnétique extérieur et de conserver cette aimantation lorsque ce champ magnétique disparaît. C'est le cas du fer, du cobalt, du nickel.

Pour quelle raison le fond de la casserole est-il ferromagnétique ?

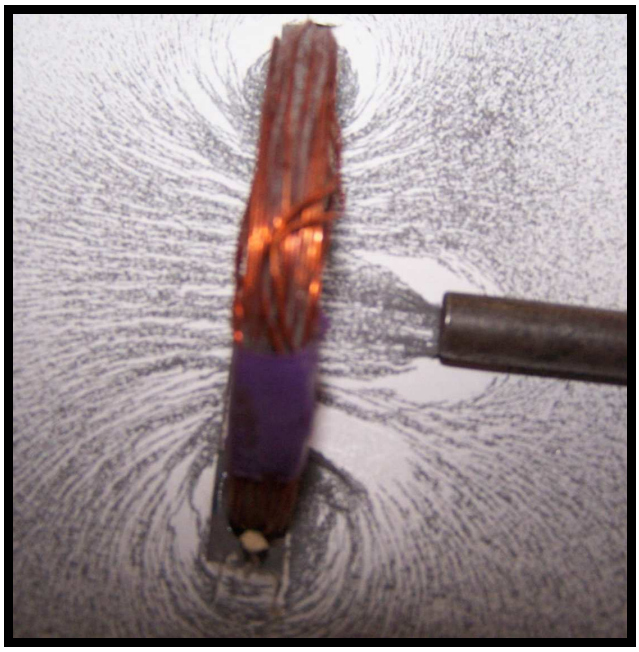
Pour étudier l'influence de la substance ferromagnétique, réalisons d'abord le spectre magnétique d'une bobine plate.

Spectre magnétique d'une bobine plate

Saupoudrons de limaille de fer un support plan horizontal, diamétral perpendiculaire au plan des spires.
Les grains de limaille de fer s'orientent dans le champ magnétique de la bobine ; ils se comportent comme de petits aimants et dessinent des lignes, appelées lignes de champ.

Une ligne de champ est une courbe telle qu'en chacun de ses points le vecteur champ magnétique $\vec{B}$ *lui soit tangent.*
L'intensité du champ magnétique est d'autant plus grande que les lignes de champ sont resserrées.

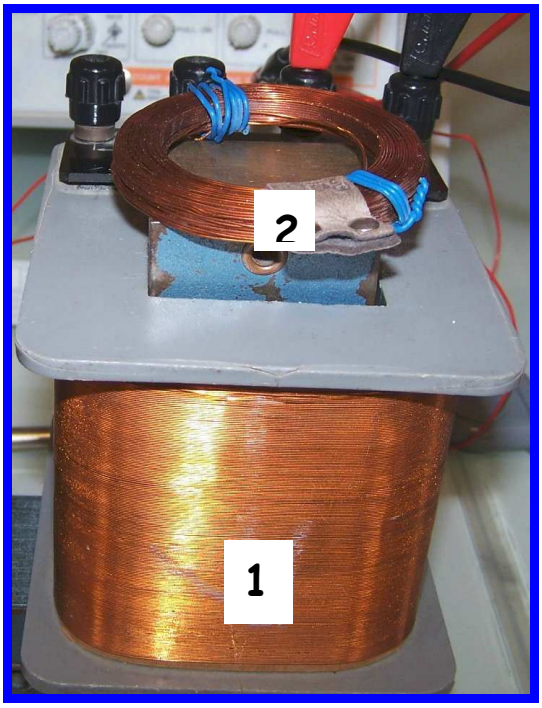
Plaçons maintenant sur le support, au voisinage de la bobine, un noyau de fer doux ; les lignes de champ se resserrent vers celui-ci.
Le champ est donc plus intense dans le fer doux qu'il ne l'était dans l'air au même endroit.



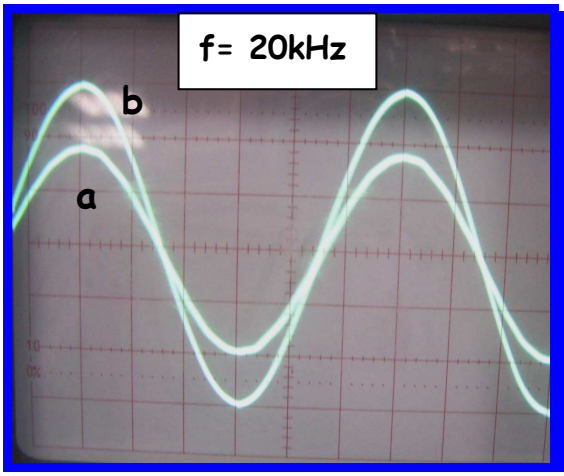
La semelle ferromagnétique de la casserole va rassembler et concentrer les lignes de champ.

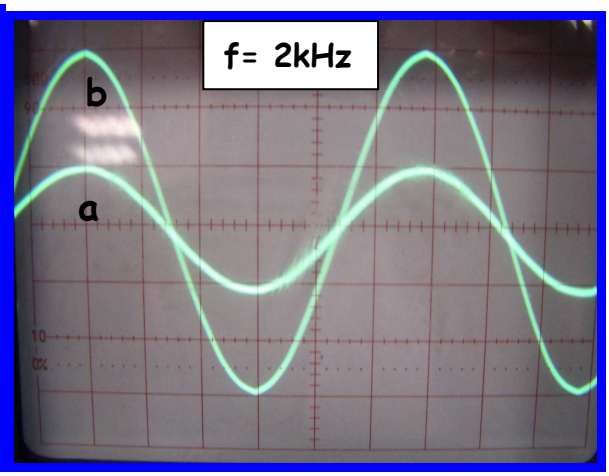
Pour quelles raisons la bobine de la plaque à induction doit-elle être parcourue par un courant variable de fréquence 20 kHz ?

- D'abord le contexte d'une utilisation grand public impose le choix de fréquences de travail dans le **domaine inaudible**.
- D'autre part plus la fréquence est élevée, plus le phénomène d'induction est **accru**



Introduisons un noyau de fer doux dans une bobine (1) et alimentons la à l'aide d'un générateur délivrant une tension alternative sinusoïdale de fréquence f ; Une petite bobine plate (2) est placée au-dessus de la bobine précédente.
Visualisons à l'oscilloscope la tension induite aux bornes de la bobine plate pour deux valeurs de la fréquence
f = 2kHz et f = 20kHz





a *: tension induite* ***b*** *: tension délivrée par le générateur*

L'amplitude de la tension induite est d'autant plus grande que la fréquence est élevée. L'intensité des courants de Foucault qui vont circuler au fond de la casserole est d'autant plus grande que la fréquence est élevée.

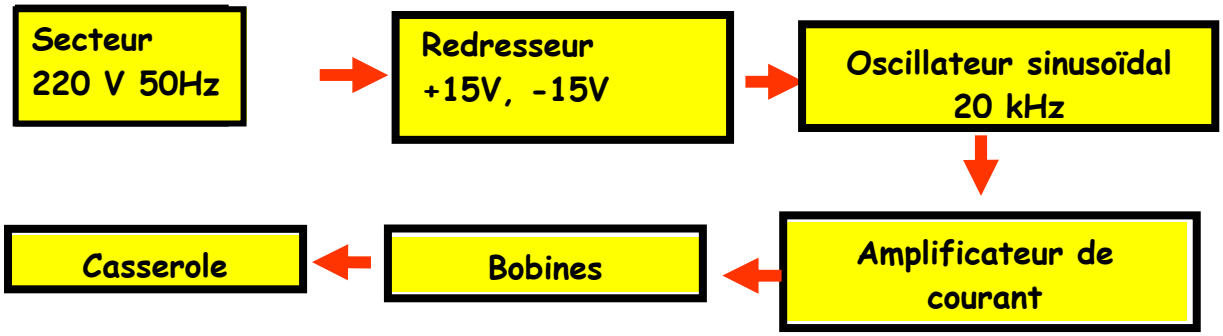
La puissance dissipée par effet Joule dans le fond de la casserole est proportionnelle au carré de la fréquence de la tension alimentant la bobine d'induction.

On se propose de réaliser un montage didactique d'une plaque de cuisson à induction comprenant :

Le redresseur est un dispositif électronique qui permet d'obtenir une tension continue à partir de la tension alternative sinusoïdale du secteur (220 V, 50 Hz).
L'oscillateur est un dispositif électronique qui, alimenté par une tension continue, permet d'obtenir une tension variable périodique ici de fréquence 20 kHz.
L'amplificateur de courant permet d'amplifier l'intensité du courant
La bobine plate, parcourue par un courant variable de fréquence 20 kHz, va créer un champ magnétique variable de même fréquence.
Le fond de la casserole, soumise à une variation de champ magnétique, va être parcouru par des courants de Foucault.

.

• Synoptique didactique d'une plaque de cuisson à induction



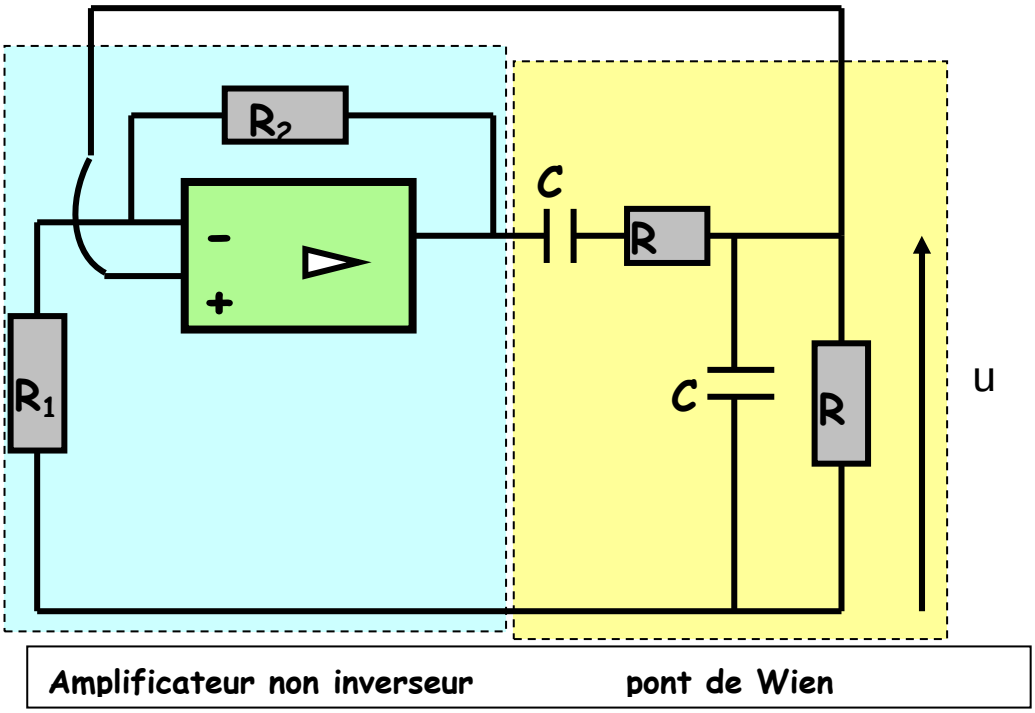
On se propose d'analyser chaque étage de cette plaque de cuisson didactique

6. *Réalisation de l'oscillateur sinusoïdal*

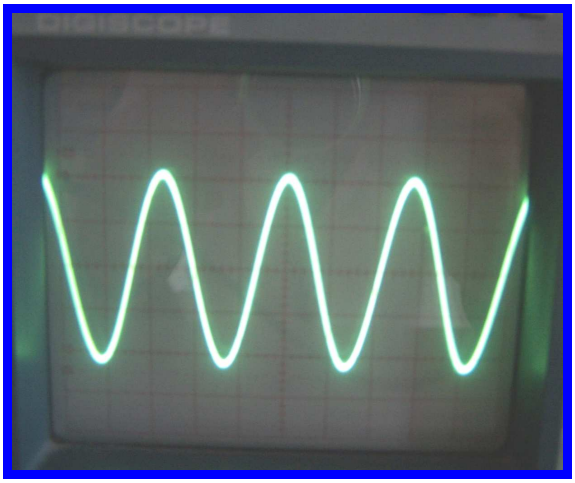
Oscillateur à pont de Wien (Wien Wilhelm : physicien allemand 1864 – 1911)

Un oscillateur sinusoïdal est un dispositif électronique qui, alimenté par une tension continue, génère une tension alternative sinusoïdale u de fréquence f.

L'oscillateur à pont de Wien est constitué d'un amplificateur non inverseur et d'un pont de Wien. L'entrée du pont de Wien est reliée à la sortie de l'amplificateur non inverseur. Le pont de Wien réinjecte une partie du signal de sortie à l'entrée de l'amplificateur. L'AOP est alimenté par une tension +15V, -15V.



L'oscillateur de Wien est le siège d'oscillations sinusoïdales auto -entretenues de fréquence $f = \frac{1}{2\pi RC}$ *lorsque* $R_2 = 2\,R_1$

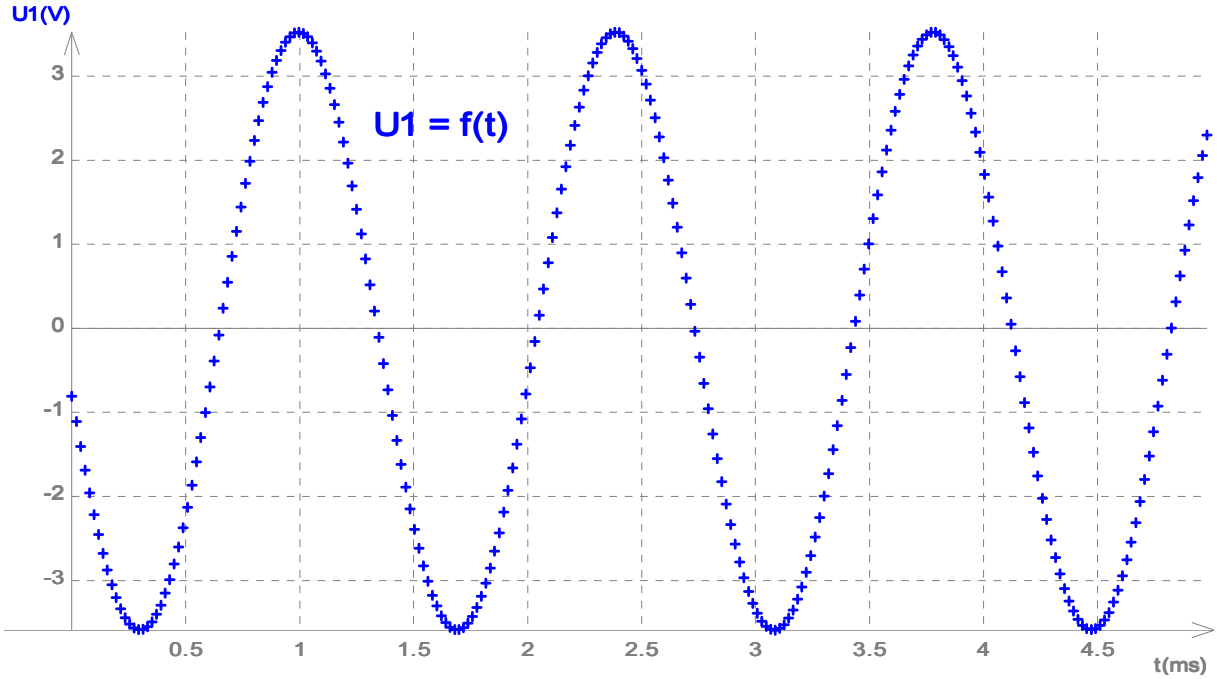


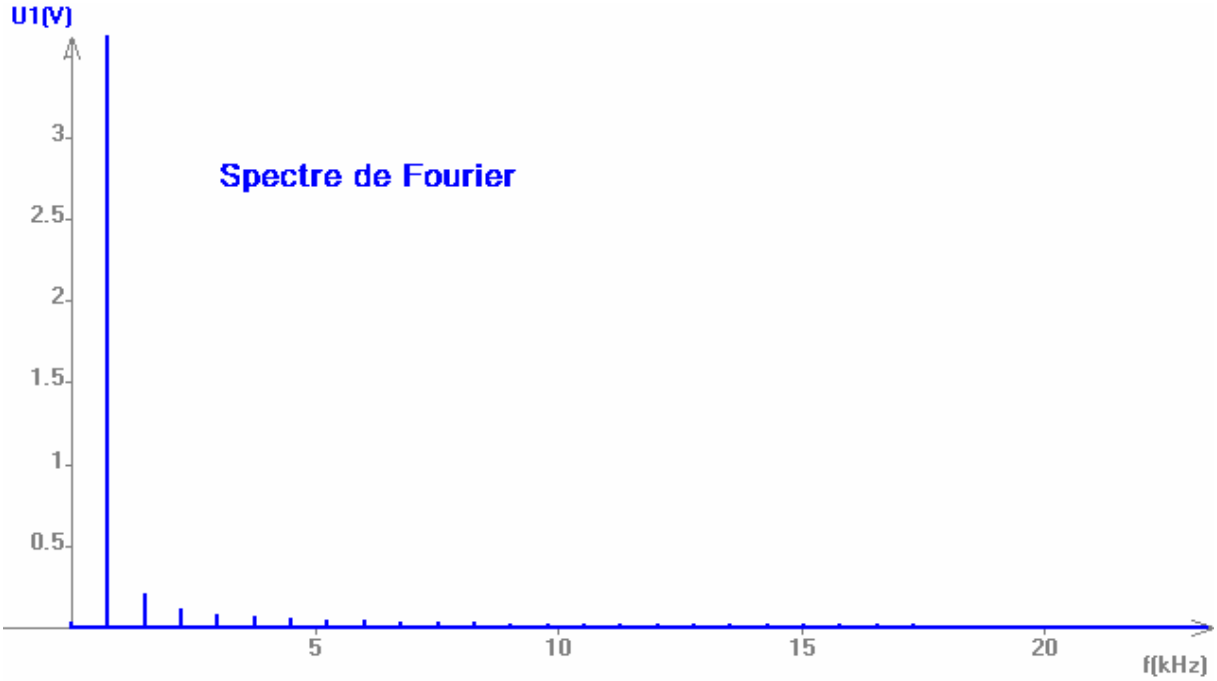
Tension générée par l'oscillateur à pont de Wien

On peut vérifier le caractère quasi-sinusoïdal de la tension délivrée par l'oscillateur en réalisant le spectre fréquentiel de Fourier.

Afin de pouvoir mesurer par la suite l'intensité du courant dans la bobine, on a choisi une fréquence d'oscillation inférieure à 1000 Hz à cause de la bande passante du multimètre.

$R = 1k\Omega$ $C = 220\ nF$

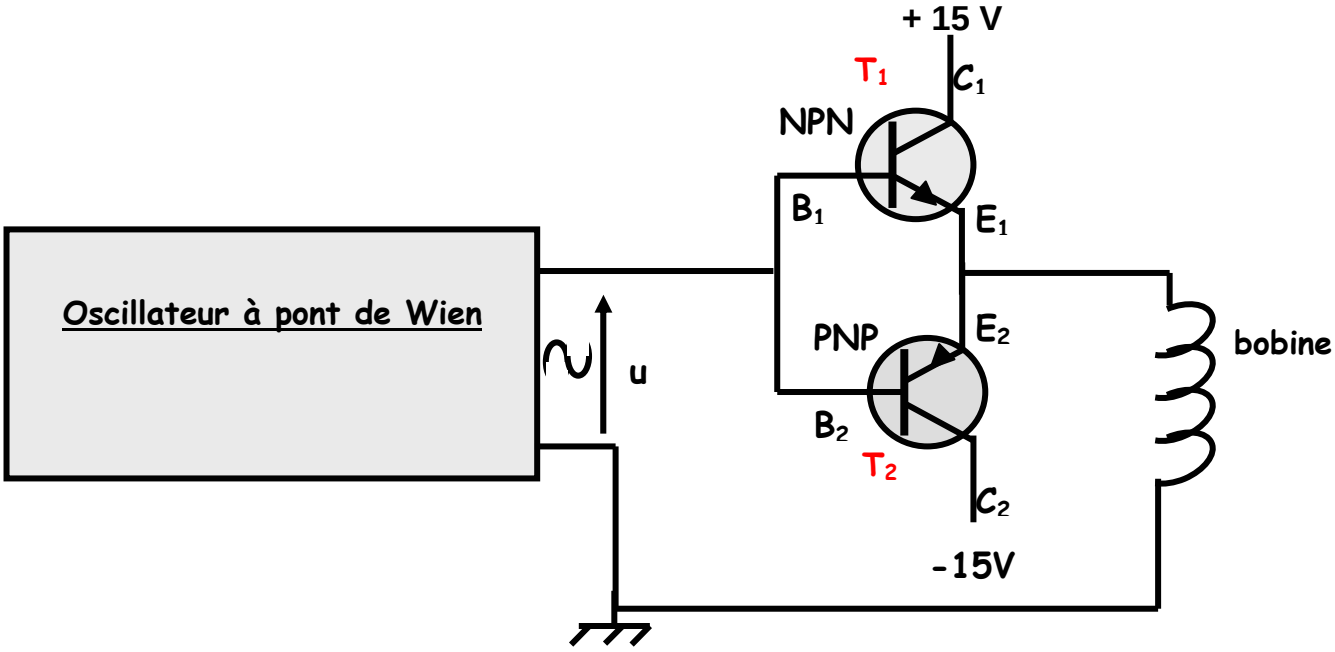




7. Montage Push – Pull . Amplificateur de courant

La bobine, qui doit générer le champ magnétique, doit être parcourue par un courant intense; il faut donc **amplifier** le courant à la sortie de l'oscillateur à pont de Wien, à l'aide de deux transistors complémentaires: un transistor NPN (T_1) et un transistor PNP (T_2).

Ce montage est appelé montage **Push – Pull** (pousser – tirer)



Etude expérimentale du montage « Push – Pull »

Ce montage comporte deux transistors complémentaires. T_1 est un transistor NPN, T_2 est un transistor PNP.

Réalisons le montage représenté ci-dessous. Un générateur de signaux délivre une tension sinusoïdale de fréquence f ; soit u_e la tension aux bornes de ce générateur et u_S la tension aux bornes d'un conducteur ohmique de résistance R_u placé à la sortie du Push – Pull.

• Premier cas :

Appelons U_0 la tension seuil de la jonction base – émetteur

$u_e > U_0$ alors le transistor **T_1 est passant**, donc $U_{B1E1} = U_0$

Le transistor T_2 est bloqué donc $i_{B2} = 0$. $i_{E1} = i_{C1} + i_{B1} = (\beta + 1) i_{B1}$

β est le coefficient d'amplification du courant

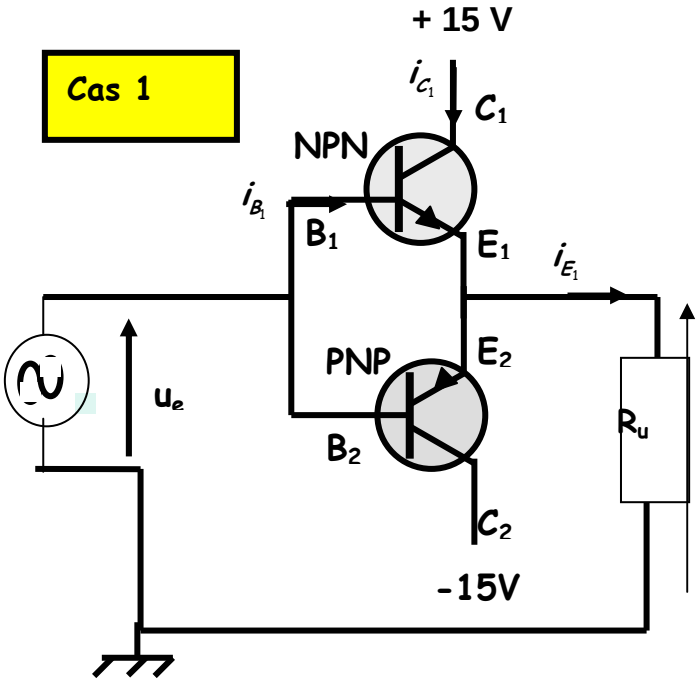
$u_e = U_{B1E1} + u_S = U_0 + u_S$ $\quad u_S = u_e - U_0$

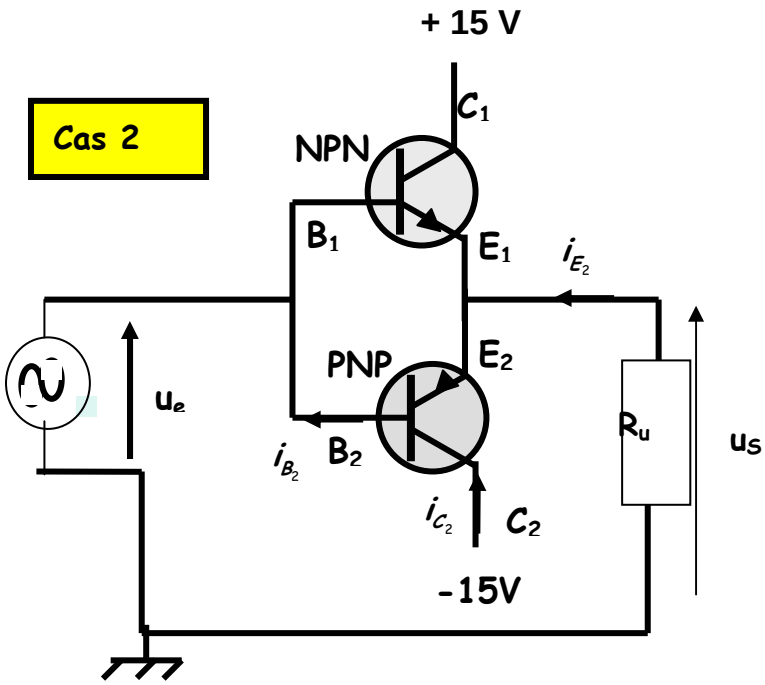
- **Second cas**:

$u_e < -U_0$ alors le transistor **T_2 est passant**, donc $U_{B2E2} = -U_0$

Le transistor T_1 est bloqué donc $i_{B1} = 0$. $i_{E2} = i_{C2} + i_{B2} = (\beta + 1) i_{B2}$

$Ue = u_{B2E2} + u_S$ $u_S = u_e + U_0$

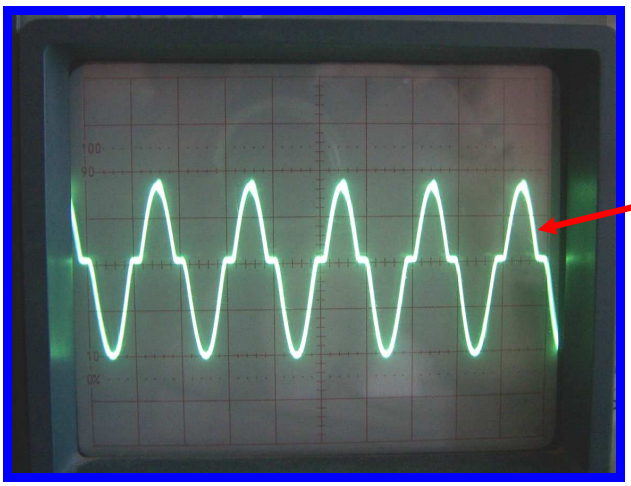




Si **$-U_0 < u_e < U_0$**, les transistors T_1 et T_2 **sont <u>bloqués</u>**, l'intensité du courant qui traverse le conducteur ohmique est nulle. Il existe donc un domaine de tensions d'entrée pour lequel la tension d'entrée u_e n'est pas nulle, mais la tension de sortie u_S est nulle.

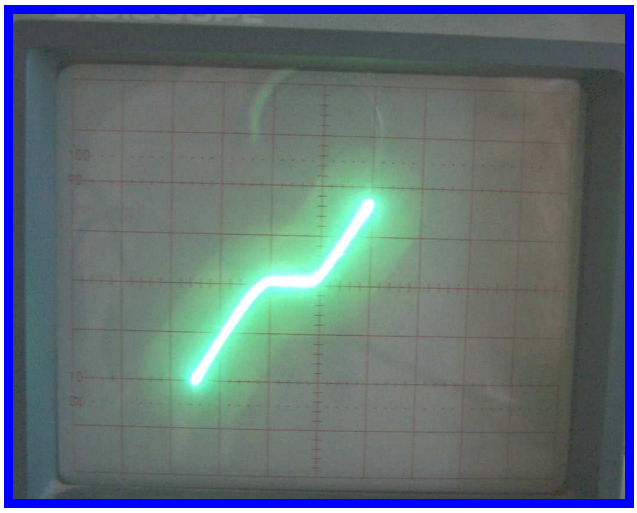
La tension de sortie ne reflète pas la tension d'entrée ; elle possède alors une **<u>distorsion de croisement dite de faible niveau</u>**.

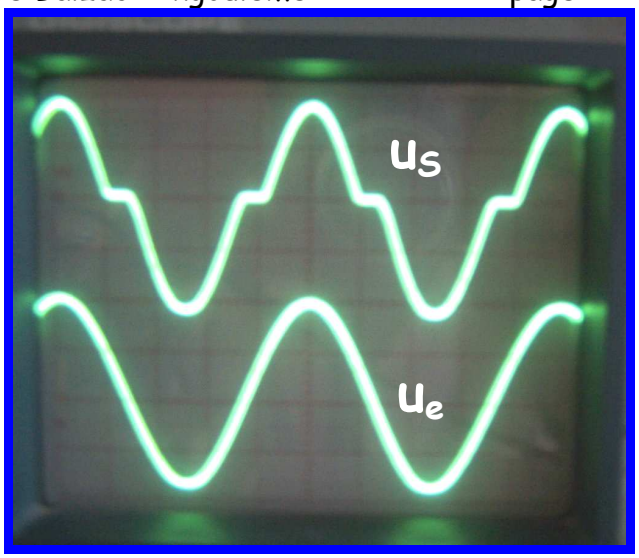
Afin d'évacuer la chaleur, les transistors sont montés sur des radiateurs.



Distorsion de croisement

$u_S = f(t)$



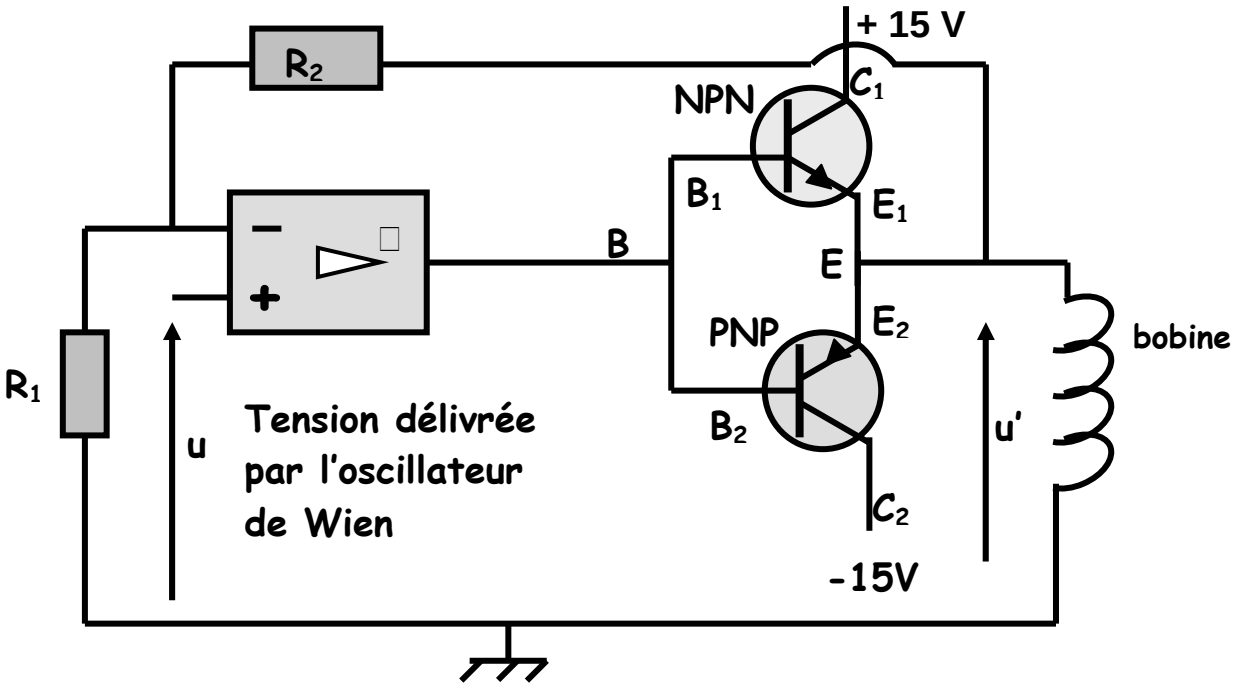


$u_S = f(u_e)$

Réduction de la distorsion de croisement

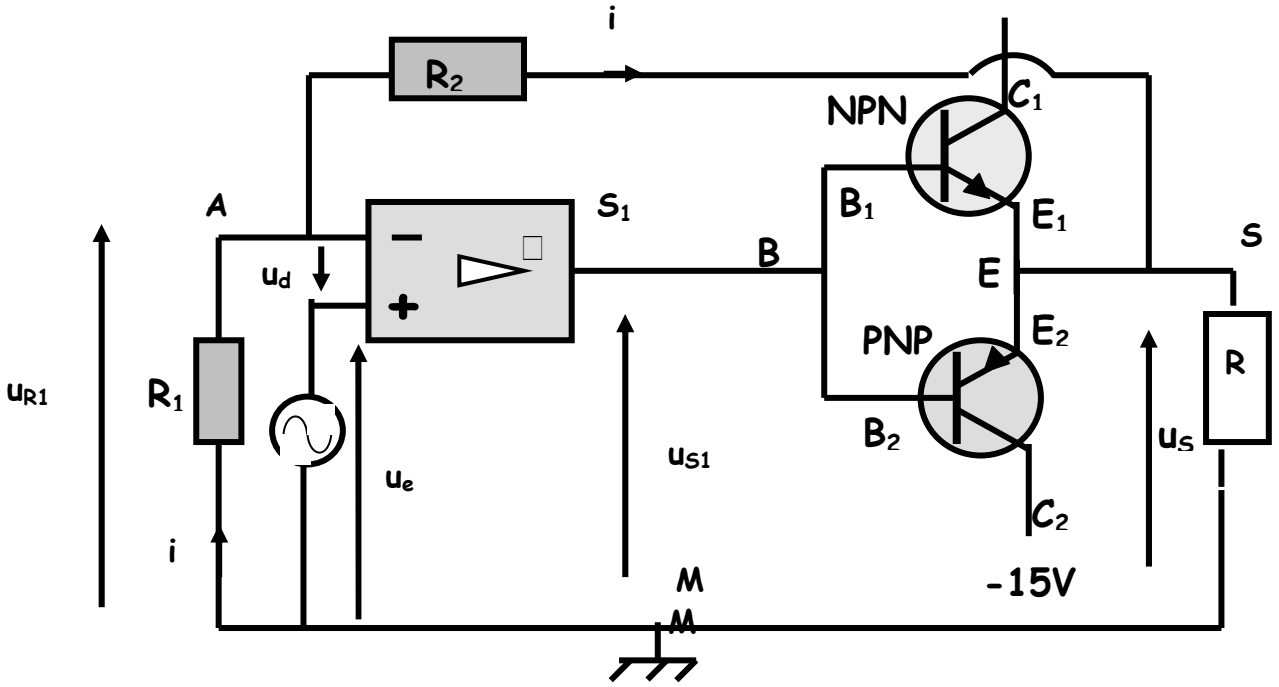
La tension à la sortie de l'étage amplificateur présente une distorsion. On se propose de corriger cet effet afin que la tension aux bornes de la bobine de la plaque à induction soit une tension quasi sinusoïdale.

A cet effet, on associe un ampli non inverseur (de gain $1+R_2/R_1$) et l'ampli Push-Pull. La contre réaction de l'AO se fait à travers la jonction BE du transistor. La distorsion de croisement est alors réduite.



Correction de la distorsion : Etude expérimentale

Considérons le montage représenté ci-dessous



Un générateur de signaux délivre une tension alternative sinusoïdale u_e entre l'entrée non inverseuse et la masse. On a placé à la sortie du montage Push – Pull un conducteur ohmique de résistance R = 47Ω.

$R_1 = 1\ k\Omega \quad R_2 = 10\ k\Omega$

$u_{S1} = A\,u_d \quad A = 10^5$ *gain ou facteur d'amplification*

u_d : *tension différentielle d'entrée*

$$u_S = u_{EB} + u_{BM} = u_{S1} - u_{BE} = Au_d - u_{BE} \qquad \text{or} \quad u_d = u_e - u_{R1}$$

$$u_S = -(R_1 + R_2)i \qquad u_{R1} = -R_1 i \qquad u_{R1} = \frac{R_1}{R_1 + R_2} u_S$$

$$u_S = Au_d - u_{BE} = A(u_e - \frac{R_1}{R_1 + R_2} u_S) - u_{BE}$$

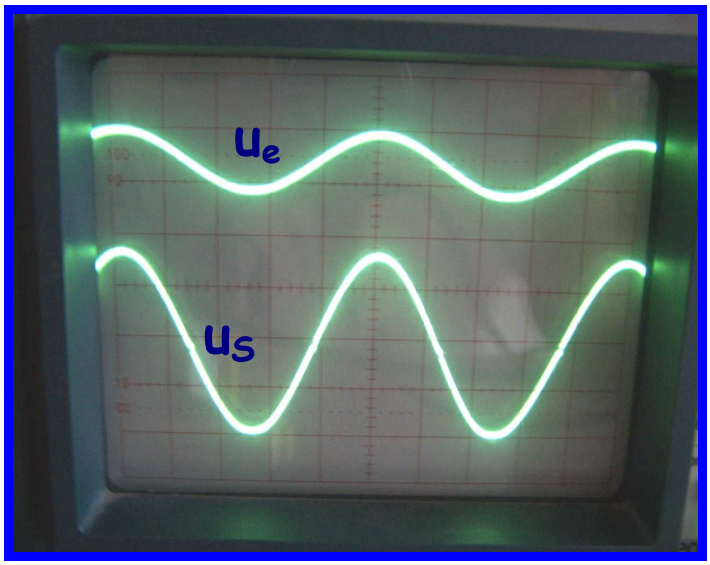
$$u_S(1 + A\frac{R_1}{R_1 + R_2}) = Au_e - u_{BE}$$

$$u_S = \frac{Au_e}{1 + \frac{AR_1}{R_1 + R_2}} - \frac{u_{BE}}{1 + \frac{AR_1}{R_1 + R_2}}$$

$$\frac{Au_e}{1 + \frac{AR_1}{R_1 + R_2}} \approx \frac{R_1 + R_2}{R_1} u_e = (1 + \frac{R_2}{R_1}) u_e \qquad \frac{u_{BE}}{1 + \frac{AR_1}{R_1 + R_2}} = \frac{u_{BE}}{1 + 10^5 \times \frac{1}{11}} \approx 10^{-4} u_{BE}$$

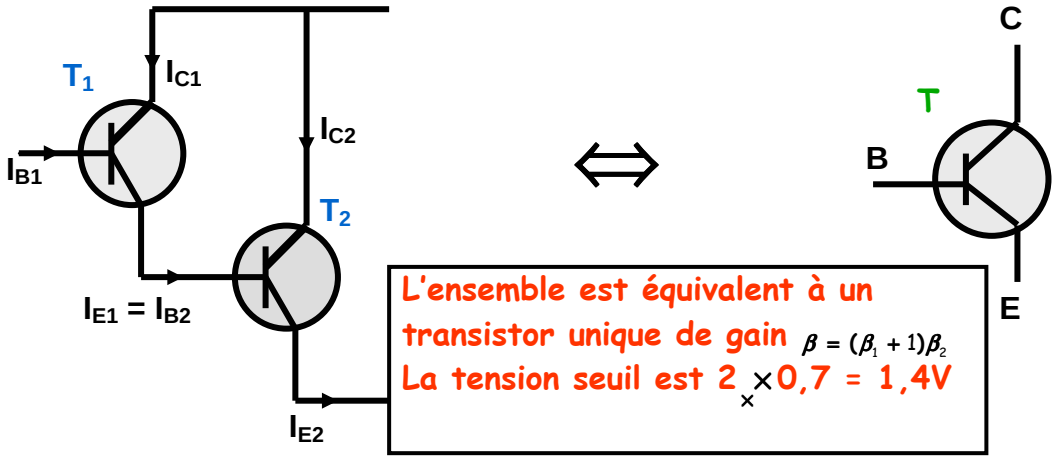
finalement $\quad u_S \approx (1 + \frac{R_2}{R_1}) u_e$

Le phénomène de distorsion a été éliminé. Le montage précédent se comporte comme un amplificateur non inverseur. La tension de sortie est égale à la tension d'entrée amplifiée par le coefficient $1 + \frac{R_2}{R_1}$



8 Montage Darlington

Pour augmenter l'intensité du courant qui doit traverser la bobine, on utilise un montage à deux transistors, appelé montage Darlington. Dans le montage Push-Pull, chaque transistor est remplacé par un Darlington.



$$I_{C1} = \beta_1 I_{B1} \qquad I_{E1} = I_{B1} + I_{C1} = (\beta_1 + 1) I_{B1} = I_{B2}$$

$$I_{C2} = \beta_2 I_2 = \beta_2 (\beta_1 + 1) I_{B1}$$

9. Circuit résonant

Si à la sortie du montage Push – Pull, corrigé du phénomène de distorsion, on place la bobine, celle-ci malgré tous **nos efforts précédents** **(!)** est parcourue par un courant de faible intensité.

La loi d'ohm aux bornes de la bobine, parcourue par un courant alternatif sinusoïdal de fréquence f, s'écrit $U'_{eff} = Z\, I_{eff}$ et non $U'_{eff} = RI_{eff}$ comme en régime continu

U'eff: est la tension efficace aux bornes de la bobine

Ieff: intensité efficace du courant qui traverse la bobine

Z est l'impédance de la bobine qui s'exprime en Ω

$$Z = \sqrt{r^2 + 4\pi^2 f^2 L^2} \approx 2\pi f L$$

r: résistance de la bobine

L: inductance de la bobine **(H)**

Ordres de grandeurs : L = 20 mH f = 1kHz Z = 2 π fL= 125,6Ω

$I_{eff} = U_{eff}/Z$ = 5/125,6 = **40 mA** !

L'intensité du courant qui va traverser la bobine est trop faible !

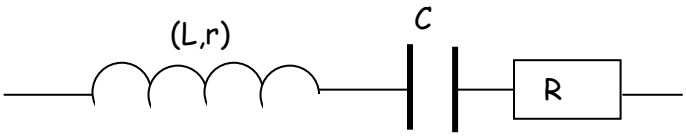
Comment obtenir une intensité nettement plus grande ? On va brancher en série avec la bobine un condensateur et se placer à la **résonance d'intensité**.

En quoi consiste le phénomène de résonance d'intensité ?

Etude expérimentale de la résonance d'intensité

Impédance d'un dipôle (RLC)

Associons en série un conducteur ohmique de résistance R, une bobine d'inductance L et de résistance r, et un condensateur de capacité C.



Soit U la tension efficace aux bornes du dipôle RLC et I l'intensité efficace qui le parcourt

A fréquence constante le rapport U/I est constant; c'est l'impédance Z du dipôle (RLC) (Z s'exprime en ohm).

$$Z = \frac{U}{I} = \frac{U_m}{I_m} \qquad Z = \sqrt{R^2 + \left(L2\pi f - \frac{1}{2\pi f C}\right)^2}$$

U: tension efficace aux bornes du dipôle

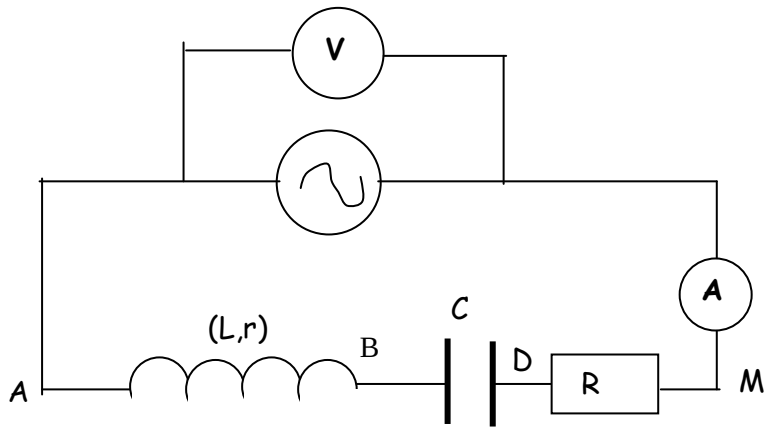
U_m: tension maximale aux bornes du dipôle
I: intensité efficace qui le parcourt
I_m: intensité maximale qui le parcourt
Une relation de la forme **U = ZI ou U_m = ZI_m** ne peut être écrite que mour les grandeurs efficaces ou les grandeurs maximales; elle n'est pas valable pour les valeurs instantanées.
La relation **U = ZI** est souvent appelé **loi d'Ohm en courant alternatif**. L'impédance d'un dipôle ne doit pas être confondue avec sa résistance. Ces deux grandeurs sont généralement distinctes. La notion d'impédance a été introduite par un mathématicien et physicien anglais **Heaviside Oliver** (1850 -1925). Impédance vient du latin impedire (empêcher); en effet plus l'impédance Z est grande pour une même tension efficace U appliquée aux bornes du dipôle, plus l'intensité efficace qui le parcourt sera faible.

Etude de la résonance d'intensité

Etude expérimentale

On considère un dipôle (R,L,C) . un générateur de signaux ,branché aux bornes de ce dipôle délivre une tension alternative sinusoïdale. La tension efficace U aux bornes du circuit est maintenue constante, mais on fait varier la fréquence f. On analyse la réponse du circuit en mesurant l'intensité efficace I du courant dans le circuit. On peut ainsi tracer la courbe I=g(f) pour différentes valeurs de la résistance du circuit.

Montage:



Le voltmètre permet de vérifier que la tension efficace aux bornes du circuit reste **constante**.
Valeurs adoptées U=2V L=10mH r=2,2Ω R: valeur réglable C=10µF

Observation des courbes I=g(f)

L'intensité efficace I passe par un maximum pour une valeur particulière de la fréquence f=500Hz.Cette valeur ne dépend pas de la résistance totale du circuit R+r.

$$\boxed{I = \frac{U}{Z} = \frac{U}{\sqrt{R^2 + (2\pi fL - \frac{1}{2\pi fC})^2}}}$$

I est maximal lorsque le dénominateur est minimal, c'est-à-dire lorsque $2\pi fL - \frac{1}{2\pi fC} = 0$ ***soit*** $4\pi^2 f^2 LC = 1$ alors l'impédance Z est minimale et s'identifie à la résistance du circuit.

☞ **Conclusion:**

L'intensité efficace du courant qui traverse le dipôle RLC série est maximale lorsque la fréquence f de la tension excitatrice satisfait la relation $\boxed{4\pi^2 f^2 LC = 1}$. On dit qu'il y a **résonance d'intensité**.(*l'intensité efficace dans le circuit est alors maximale*).

■Valeur de l'impédance du dipôle à la résonance

Utilisons les résultats obtenus

Pour la courbe de résonance (I) la valeur maximale de l'intensité efficace est:

I=90mA Valeur de l'impédance à la résonance $Z = \frac{U}{I} = \frac{2}{0{,}090} = 22{,}2\Omega$

Or pour cette expérience la résistance totale du circuit est: R+r=22,2Ω.

Pour la courbe de résonance (III) la valeur maximale de l'intensité efficace est:

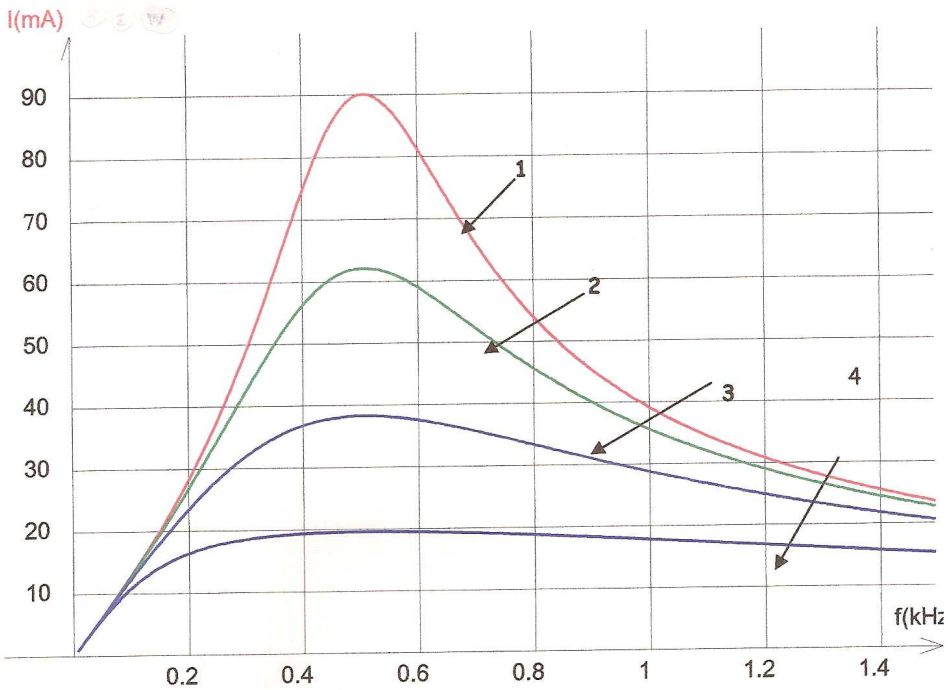
I=38mA Valeur de l'impédance à la résonance $Z = \frac{U}{I} = \frac{2}{0{,}038} = 52{,}6\Omega$

Or pour cette expérience la résistance totale du circuit est R+r=52,2Ω

■ **Conclusion**:

L'impédance du dipôle RLC à la résonance d'intensité est égale à sa résistance **Z=R+r**

Pour toute autre fréquence que la fréquence de résonance (fréquence propre) Z>R.

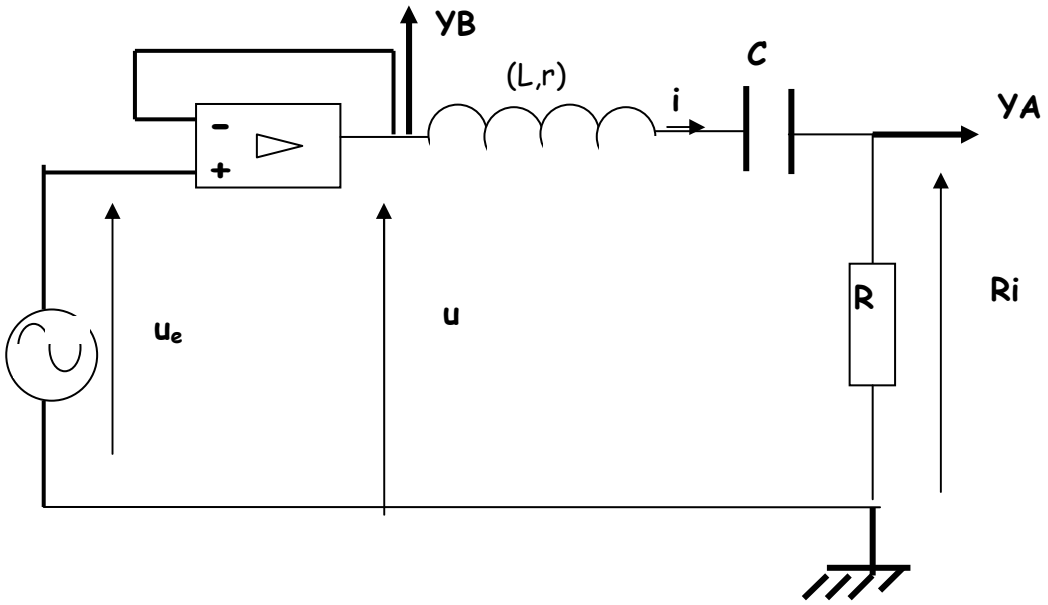


Courbe (1) R + r = 22,2 Ω
Courbe (2) R + r = 32,2 Ω
Courbe (3) R + r = 52,2 Ω
Courbe (4) R + r = 102,2 Ω
Tension efficace aux bornes du circuit: U = 2V

Remarque :

On peut faire une étude qualitative du phénomène de résonance en utilisant un oscilloscope.

Montage :



Pourquoi utilise-t-on un montage suiveur ?

La résistance interne R_g du générateur de fonctions provoque une chute de tension $R_g i$ aux bornes de celui-ci. Cette chute de tension varie en fonction de la fréquence comme l'intensité du courant dans le dipôle RLC. « Aux alentours » de la résonance d'intensité, cette chute de tension peut être très grande. Le montage suiveur permet de maintenir constante l'amplitude de la tension appliquée aux bornes du circuit RLC.

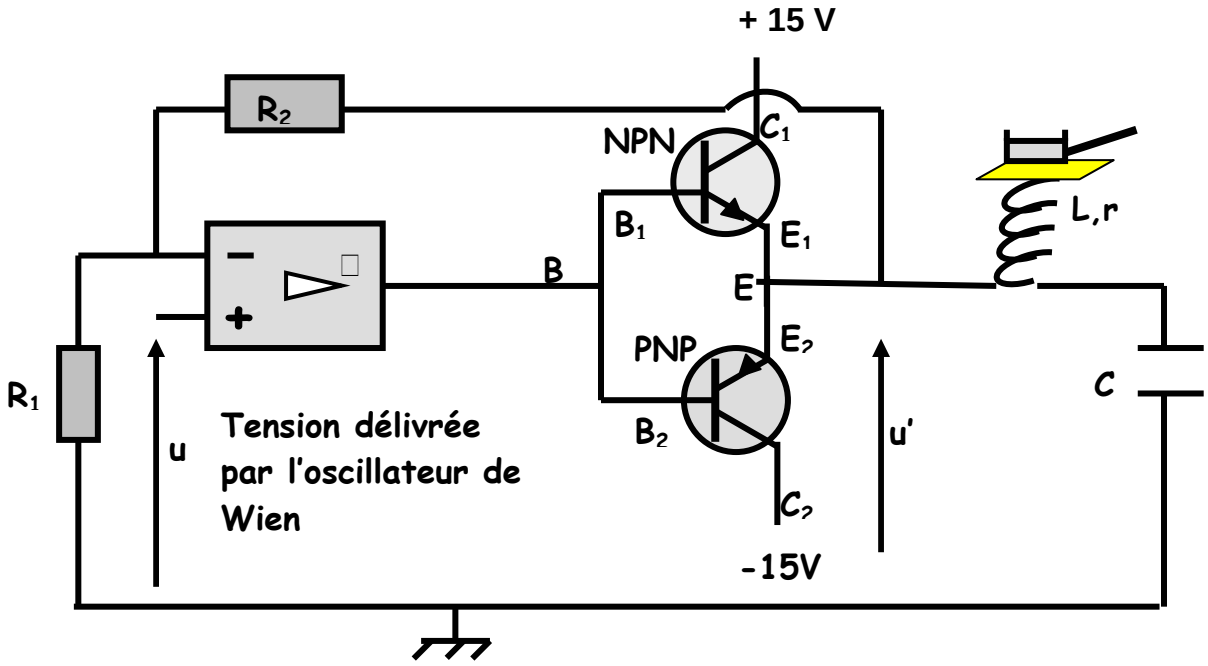
L'association générateur de signaux – suiveur est équivalente à une source de tension sinusoïdale parfaite.

Cet avantage s'accompagne hélas d'une contrainte ; l' AOP ne peut débiter un courant de sortie qui ne peut excéder 20mA ; il faut donc limiter la tension appliquée au dipôle RLC.

Sur la voie A de l'oscilloscope on visualise la tension Ri, sur la voie B la tension $u = u_e$ aux bornes du dipôle RLC .

Lorsque l'on fait varier la fréquence ; l'amplitude de la tension u reste **constante**, par contre l'amplitude de la tension Ri varie. Cette amplitude est maximale à la résonance d'intensité c'est-à-dire lorsque la fréquence f de la tension u satisfait à la relation $\boxed{f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}}$

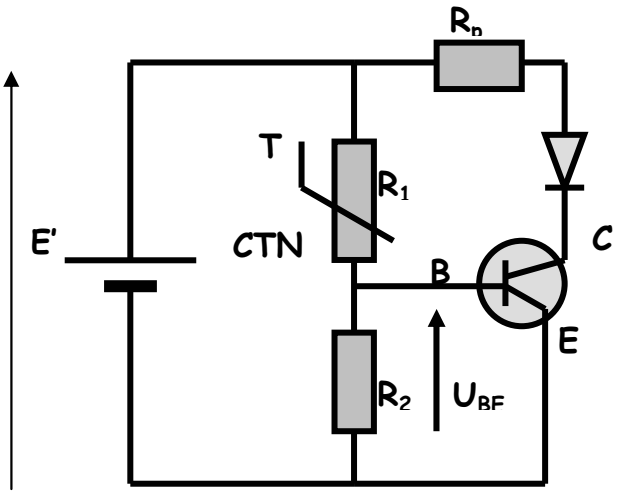
10. Montage complet de la plaque de cuisson à induction



11. Détecteur d'échauffement

On se propose de mettre en évidence à l'aide d'une DEL et d'une thermistance CTN que la température de la plaque ferromagnétique située sur la bobine augmente.

La résistance de la thermistance CTN diminue lorsque la température s'élève.



$$U_{BE} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} E'$$

(diviseur de tension)

à froid R_1 est grand $U_{BE} < 0,7V$
Le transistor est bloqué. La DEL est éteinte

Lorsque la température augmente, R_1 diminue et U_{BE} augmente.
Quand U_{BE} = 0,7V, le transistor est débloqué et devient passant. La DEL s'illumine.

Les plaques à induction génèrent des champs magnétiques qui perturbent le fonctionnement du pace maker (stimulateur cardiaque).

Pourquoi ?

Avant de pouvoir répondre à cette question nous nous sommes intéressés au cœur et plus précisément à l'activité électrique du cœur.

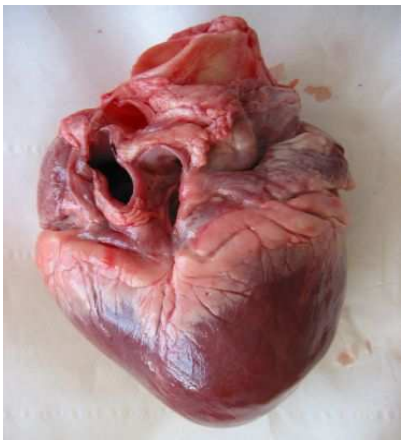
12. Le fonctionnement du cœur

Le cœur humain est situé dans la cage thoracique, sous le sternum.

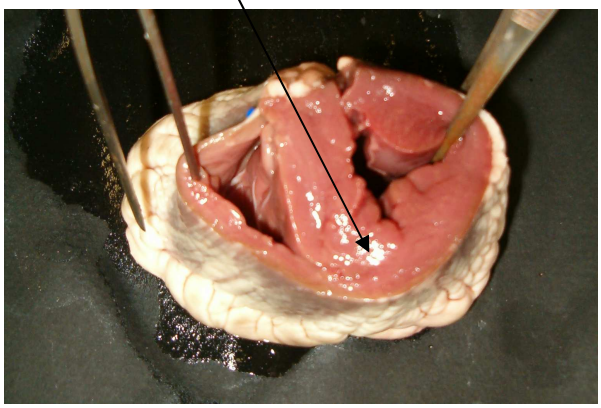
Ses parois musculaires lui permettent de pomper le sang circulant dans les vaisseaux. Il est donc chargé d'alimenter tout l'organisme en oxygène et nutriments.

Le cœur est divisé en quatre cavités : les oreillettes gauche et droite
et les ventricules gauche et droit.

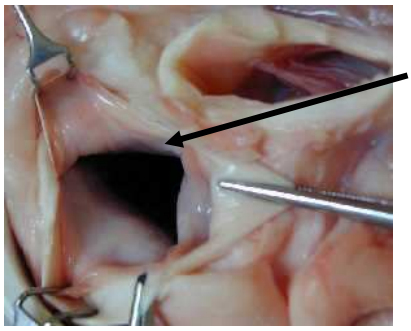
Les côtés droit et gauche sont séparés par le septum



Vue externe du cœur

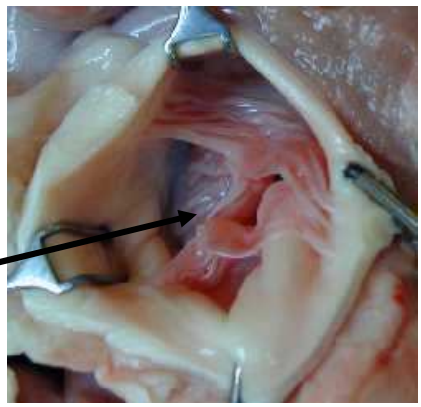


Coupe transversale du cœur au niveau des ventricules



Valvules sigmoïdes ouvertes

Valvules sigmoïdes fermées

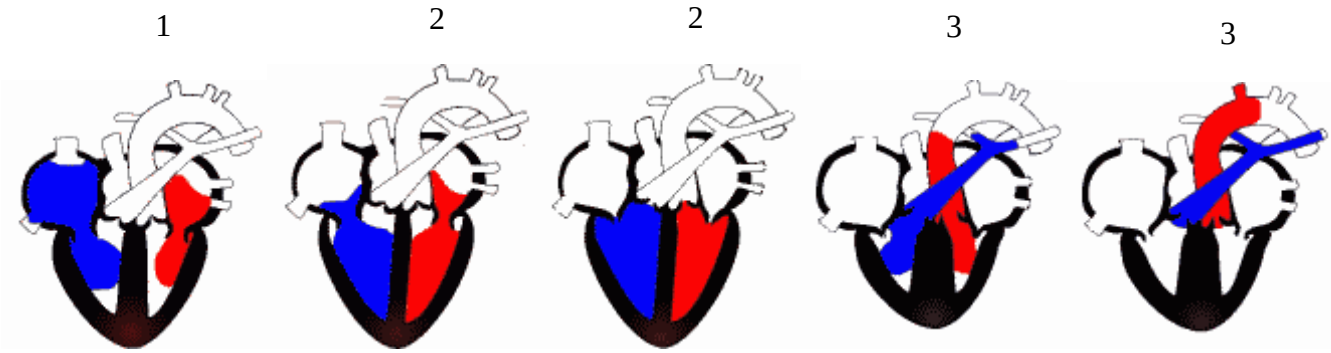


Le sang ne peut circuler que dans un seul sens grâce aux valves séparant les oreillettes et les ventricules des vaisseaux et agissant comme un système antireflux

A chaque battement du cœur, le sang est d'abord pompé des oreillettes vers les ventricules. Les ventricules se contractent et envoient le sang dans les artères.

Le sang passe ainsi du côté droit du cœur dans les poumons pour assurer la recharge du sang en dioxygène, puis dans le côté gauche du cœur pour assurer l'approvisionnement en dioxygène et nutriments de tout l'organisme.

Les différentes phases de la révolution cardiaque



1. Le sang passe des oreillettes aux ventricules. Le cœur est relâché : C'est la diastole	2. fin de remplissage des ventricules lors de la contraction des oreillettes : c'est la systole auriculaire	3. contraction des ventricules le sang est expulsé dans les artères : c'est la systole ventriculaire

Le cœur bat plus de 100 000 fois par jour pour assurer la circulation sanguine.
Comment est assurée la contraction du cœur ?

Le cœur a une activité périodique : on parle de cycle cardiaque et est doté d'un automatisme c'est à dire qu'i est capable de se contracter sans aucune innervation.
Nous avons isolé un cœur d'escargot afin de mettre cette propriété en évidence

Dissection du cœur d'escargot

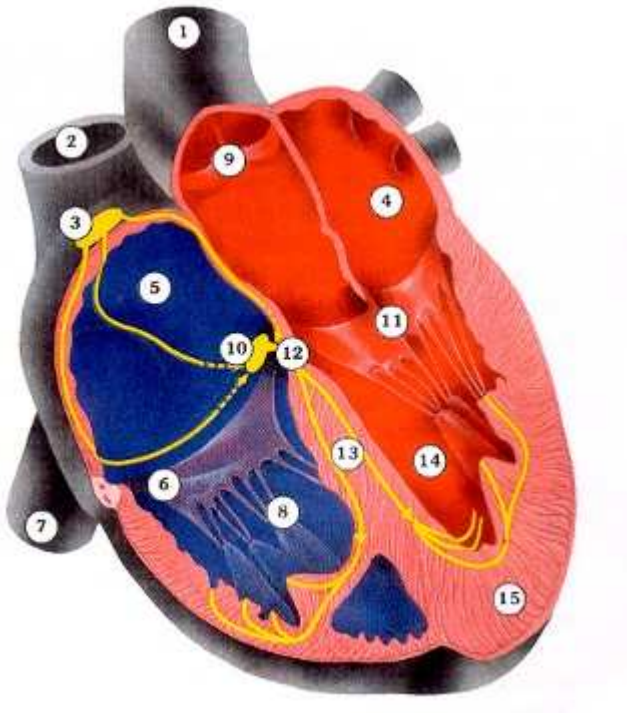
Pour pouvoir fonctionner régulièrement, chaque cycle cardiaque se décompose en deux phases :

- une phase de contraction appelée aussi dépolarisation
- une phase de relâchement ou repolarisation

Afin de synchroniser une contraction harmonieuse des oreillettes et des ventricules, le cœur utilise un centre de contrôle; le nœud sinusal qui fait partie d'un tissu comportant des cellules myocardiques spécialisées : le tissu nodal.
Le tissu nodal comprend :

- le nœud sinusal (ou nœud de Keith et Flack) situé dans la partie haute de l'oreillette droite
- le nœud auriculoventriculaire (ou nœud d'Aschoff Tawara), dans la partie basse du septum inter auriculaire, qui se prolonge par le faisceau de His
- la faisceau de His dans la cloison interventriculaire qui se divise en deux branches qui aboutissent au réseau de Purkinje
- Le réseau de purkinje situé à la face endocardiaque des parois ventriculaires

1. Aorte
2. Veine cave supérieure
3. **Nœud sinusal**
4. Oreillette gauche
5. Oreillette droite
6. Valve tricuspide
7. Veine cave inférieure
8. Ventricule droit
9. Valve aortique
10. **Nœud atrio-ventriculaire**
11. Valve mitrale
12. **Faisceau de His**
13. **Système de His-Purkinje**
14. Ventricule gauche
15. Muscle cardiaque



Les cellules du nœud sinusal sont des cellules dotées d'une propriété particulière, en effet ces cellules se dépolarise spontanément et façon rythmique, la dépolarisation d'une cellule correspond à une inversion du potentiel de membrane.

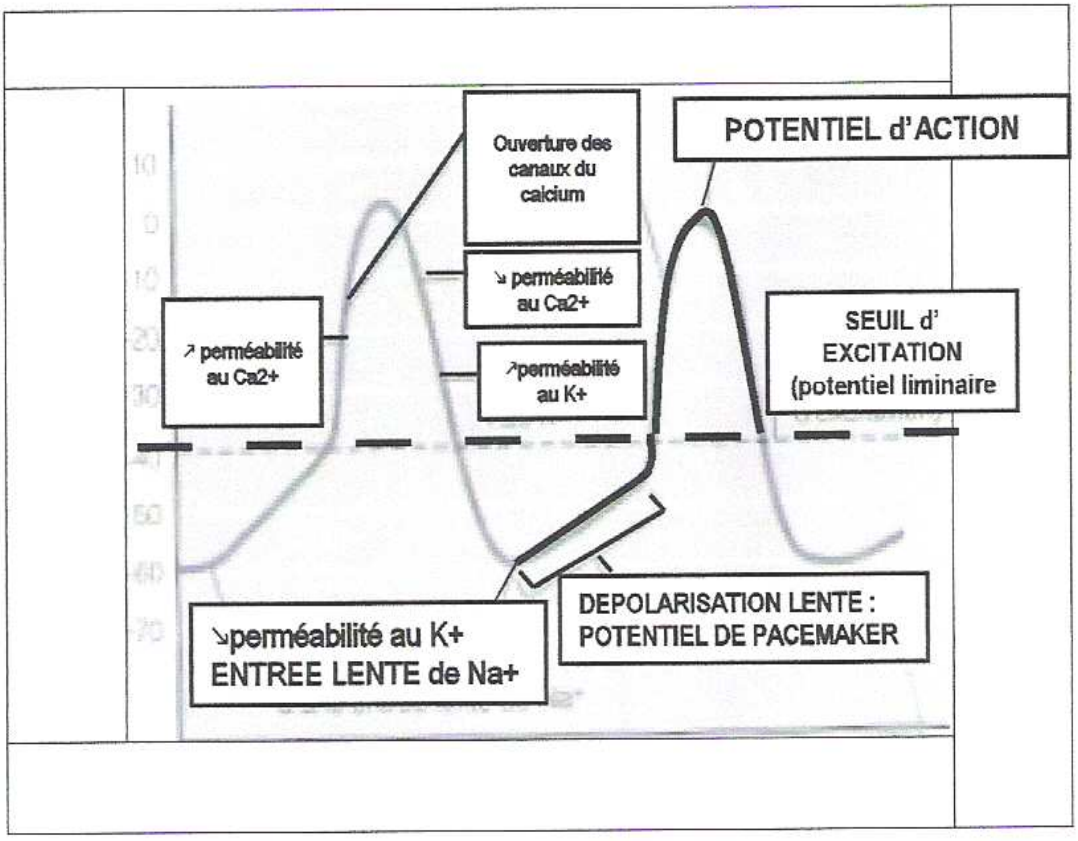
Toute les cellules sont polarisées négativement à l'intérieur et positivement à l'extérieur, la différence de potentiel entre les deux faces de la membrane des cellules est appelé potentiel de membrane .

Ainsi la dépolarisation correspond à une entrée de charges positives (des ions Na^+ et des ions Ca^{2+}), cette entrée de charges positives se fait progressivement

et dès que la cellule atteint son seuil de dépolarisation, elle se dépolarise rapidement entraînant la création d'un potentiel d'action.

Phénomènes électriques : AUTOMATISME CARDIAQUE

Potentiel « PACEMAKER »

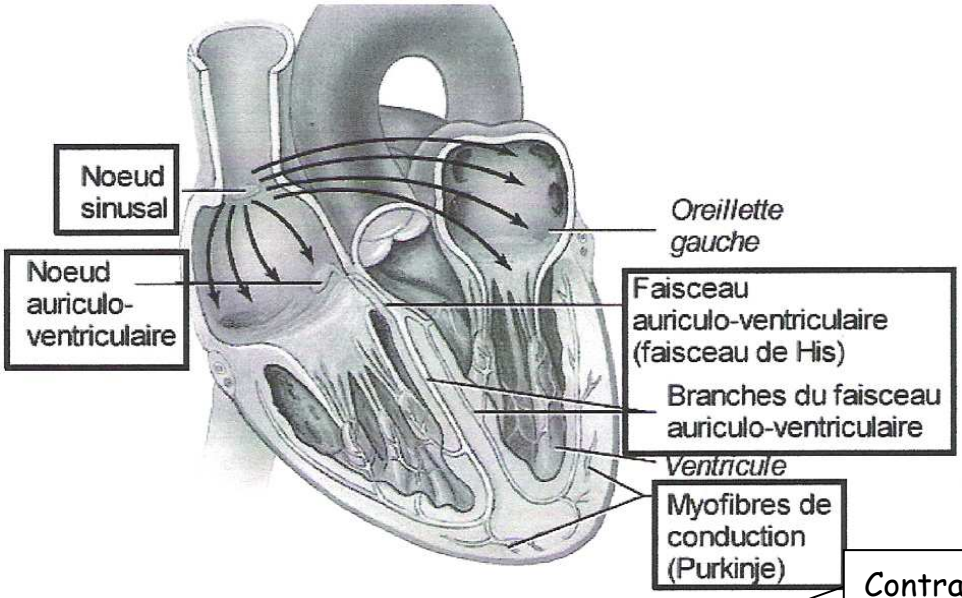


Cette dépolarisation se transmet ensuite de proche en proche aux différentes parties du tissu nodal

La dépolarisation au niveau du nœud sinusal va entraîner la contraction des oreillettes puis l'influx atteint le nœud auriculo ventriculaire ce qui permet un certain délai entre l'activation auriculaire et ventriculaire. Puis la dépolarisation emprunte le faisceau de His et ses branches pour atteindre le réseau de Purkinje et la totalité des fibres ventriculaires ; les ventricules droit et gauche se contracte alors, entraînant la propulsion du sang dans les artères pulmonaires et l'aorte.

Phénomènes électriques : AUTOMATISME CARDIAQUE

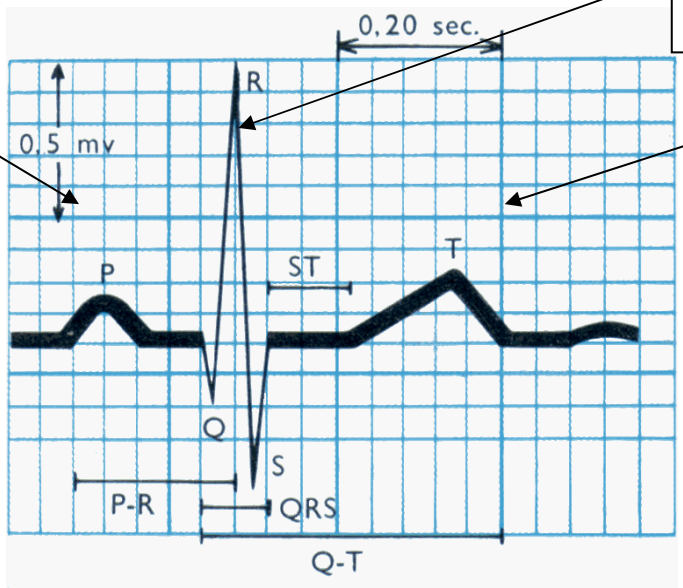
Conduction de l'INFLUX NERVEUX



un

Contraction des ventricules

Contraction des oreillettes

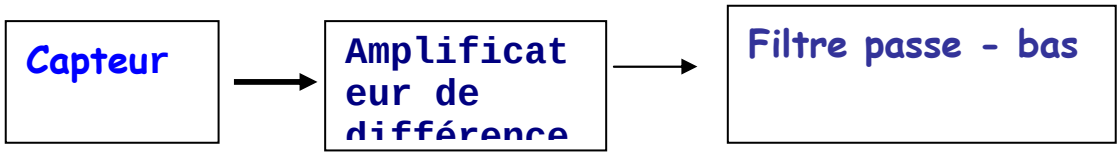


Relâchement du coeur

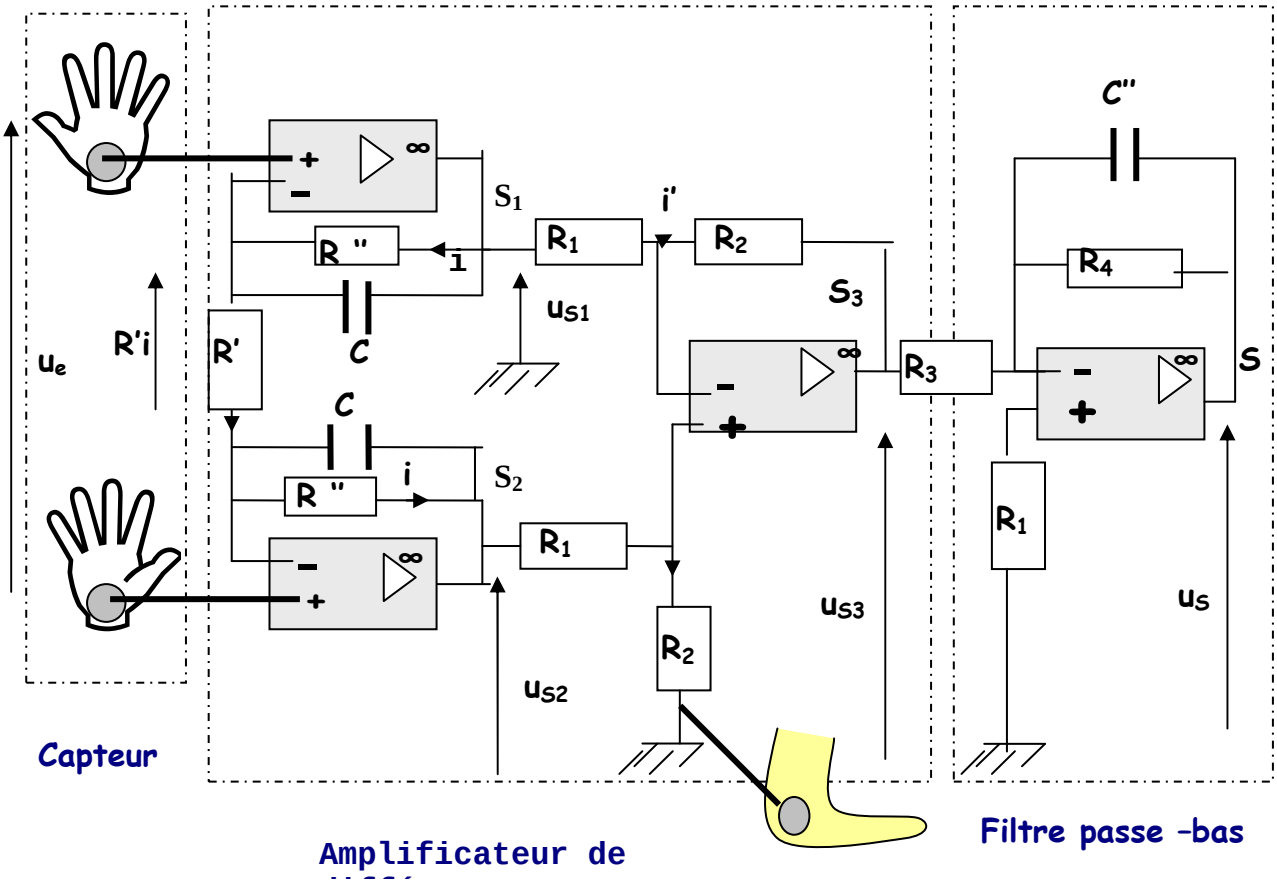
13 Détection de la tension créée par les battements cardiaques

Toute activité musculaire s'accompagne d'effets électriques ; les échanges ioniques à travers la paroi de chaque cellule induisent des dipôles électriques. Les

champs élémentaires créés par les cellules du muscle cardiaque s'additionnent pour fournir un champ électrique cardiaque qui se manifeste entre deux points quelconques du corps humain par une tension variable au cours du temps, sensiblement périodique. On se propose de mette en évidence cette tension.
La chaîne de mesure comporte les éléments suivants :



Le capteur est constitué de trois électrodes prégélifiées auto-adhésives ; l'une est placée sur la partie antérieurs du poignet gauche, l'autre sur la postéro-externe du poignet droit, la troisième est placée en dessous de la cheville et reliée à la masse.
Les deux autres électrodes sont reliées à l'entrée non inverseuse de deux amplificateurs opérationnels.



$R' = 20\ k\Omega \quad R'' = 1 M\Omega \quad R_1 = 10\ k\Omega \quad R_2 = 47\ k\Omega \quad R_3 = 100\ k\Omega$
$C = 100\ nF \quad C' = 1\ \mu F$

L'intensité du courant dans les fils du capteur est nulle.

L'amplificateur de différence comporte un premier étage différentiel à sorties flottantes et un second étage à sortie référencée à la masse.

La présence du conducteur ohmique de résistance R' impose le passage d'un courant dans les branches de contre réaction des deux premiers amplificateurs. S'il existe des parasites ils seront court-circuités par les condensateurs de capacité C placés en dérivation sur les conducteurs ohmiques de résistance R".

Tous les amplificateurs du montage fonctionnant en régime linéaire, la tension différentielle de chacun d'eux est nulle.

Pour le premier étage nous avons :

$$u_{S1} = R''i + R'i + R''i + u_{S2} \qquad u_{S1} - u_{S2} = 2R''i + R'i = (2R'' + R')i$$

$$u_e = R'i \qquad u_{S1} - u_{S2} = \frac{(R' + 2R'')u_e}{R'}$$

Pour le second étage nous avons :

$$u_{S_2} = (R_1 + R_2)i \qquad u_{S1} = R_1 i' + R_2 i \qquad u_{S2} - u_{S1} = R_1(i - i')$$

$$u_{S3} = -R_2 i' + R_2 i = R_2(i - i') \qquad u_{S3} = \frac{R_2}{R_1}(u_{S2} - u_{S1})$$

A l'aide des relations précédentes , nous obtenons pour les deux étages :

$$u_{S3} = \frac{-R_2(R' + 2R'')u_e}{R_1 R'} = -\left[\frac{R_2}{R_1}\left(1 + \frac{2R''}{R'}\right)\right]u_e$$

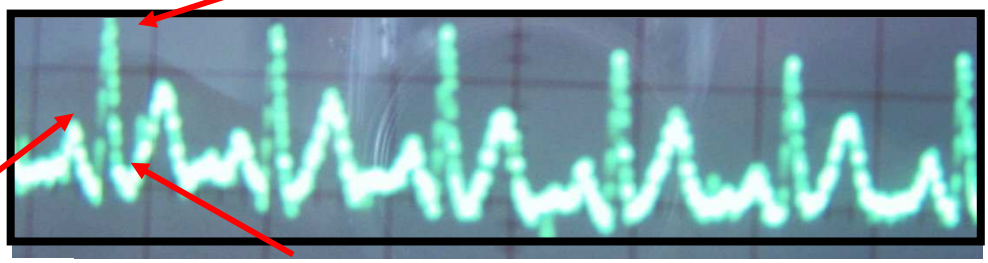
Le dernier étage est un filtre passe -bas

Un filtre passe – bas est un quadripôle dont la bande passante est [0, f_C], f_C est la fréquence de coupure. Ici $f_C = \frac{1}{2\pi RC}$

Ce filtre affaiblit de façon notable l'amplitude des tensions de fréquences plus élevées que la fréquence de coupure. Ce filtre permet aussi d'obtenir une amplification de la tension d'entrée (montage amplificateur – inverseur).

A l'aide d'un oscilloscope à mémoire, réglé en mode Roll (ou défilement) et sur une durée de balayage de 500 ms on obtient l'oscillogramme suivant

Onde QRS contraction des ventricules

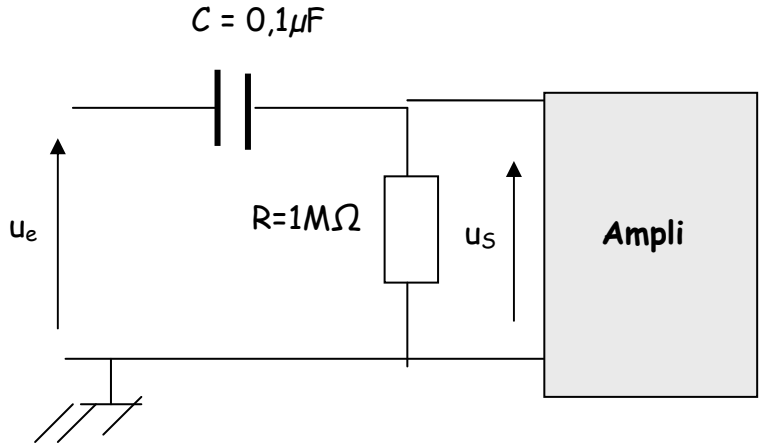


Onde P : contraction des oreillettes

Onde T

Le commutateur d'entrée de l'oscilloscope est placé en position AC ' alternating current ».

En mode AC l'entrée de l'oscilloscope est constituée de l'association série d'un condensateur de capacité C = 0,1µF en série avec un conducteur ohmique de résistance R = 1MΩ. La tension aux bornes du conducteur ohmique est ensuite amplifiée. L'association série CR constitue un filtre passe – haut qui permet d'éliminer la tension continue. La tension u_S est donc une tension variable dont on a supprimé la composante continue.



Pourquoi est-il nécessaire pour certaines personnes d'avoir un pace maker ?

Ce circuit électrique propre au cœur peut présenter des troubles de fonctionnement passagers ou permanents. Le stimulateur naturel (le nœud sinusal) peut par exemple s'arrêter et ne reprendre son activité qu'après quelques secondes. Ou encore, la conduite électrique peut être temporairement interrompue entre les oreillettes et les ventricules. Cela entraînera un arrêt des contractions du cœur pendant quelques secondes.

L'organe le plus sensible à un arrêt cardiaque momentané étant le cerveau, il s'ensuit un vertige ou, si l'arrêt se prolonge, une perte de connaissance. Les troubles de formation ou de conduction de l'impulsion électrique cardiaque peuvent n'être que partiels et donner lieu alors à des battements cardiaques trop lents. A côté des diverses maladies cardiaques, des phénomènes de vieillissement du système de conduction électrique figurent parmi les causes principales de ces troubles. Ces troubles sont toujours caractérisés par un ralentissement ou un arrêt passager des battements cardiaques, qui sont regroupés sous le terme de «bradycardie» (brady = lent).

Le stimulateur cardiaque artificiel pallie les troubles du système de conduction en produisant une impulsion électrique en cas de besoin.

En général ces troubles de la conduction entraînent des étourdissements, des vertiges, des malaises, voir des syncopes.
Pour confirmer le diagnostic, on procède tout d'abord à une exploration électrophysiologique des voies de conduction : il s'agit de réaliser un élect Pour confirmer le diagnostic, on procède tout d'abord à une exploration électrophysiologique des voies de conduction : il s'agit de réaliser un électrocardiogramme.
Une fois le diagnostic établie on procède alors à l'implantation du pace maker,
Le boîtier en titane en titane est implanté sous la peau au niveau du muscle pectoral, la ou les sondes sont ensuite introduites par une veine jusqu'à l'oreillette gauche puis le ventricule gauche où la fixation est assurée grâce à un barbillon dans le myocarde. Cette intervention est réalisée sous anesthésie locale.
Enfin, le médecin procède à la programmation du boîtier électronique afin d'adapter le fonctionnement du pace maker à la pathologie du patient.

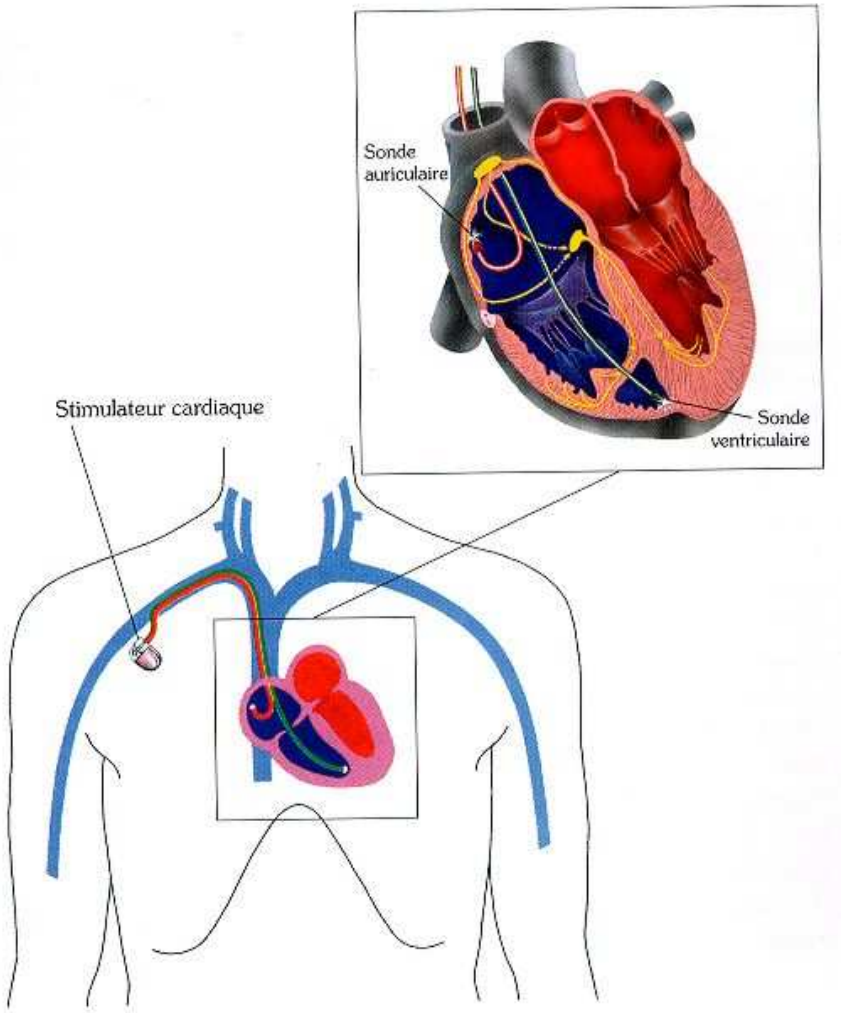
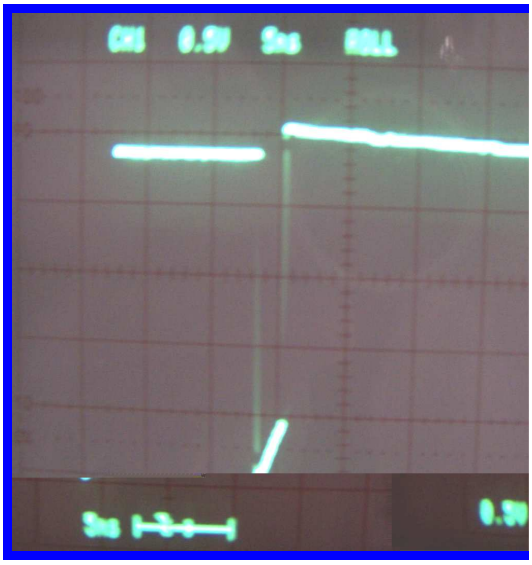


Schéma de l'implantation du pace maker

14 Comment fonctionne le pacemaker ?

Le stimulateur cardiaque artificiel est formé d'un boîtier en titane, un métal très bien toléré par le corps humain. Le boîtier renferme une pile et un module électronique. Il est relié au cœur par une ou plusieurs sondes (*figure 2*) La partie électronique assure la surveillance des impulsions électriques propres du cœur. Lorsqu'un battement cardiaque fait défaut, elle commande l'envoi d'une impulsion électrique fournie par la pile, puis transmise par la sonde au muscle cardiaque où l'impulsion déclenchera un battement cardiaque. Le stimulateur n'entre donc en fonction que lorsque le rythme cardiaque généré par le cœur est inférieur à une fréquence- seuil.



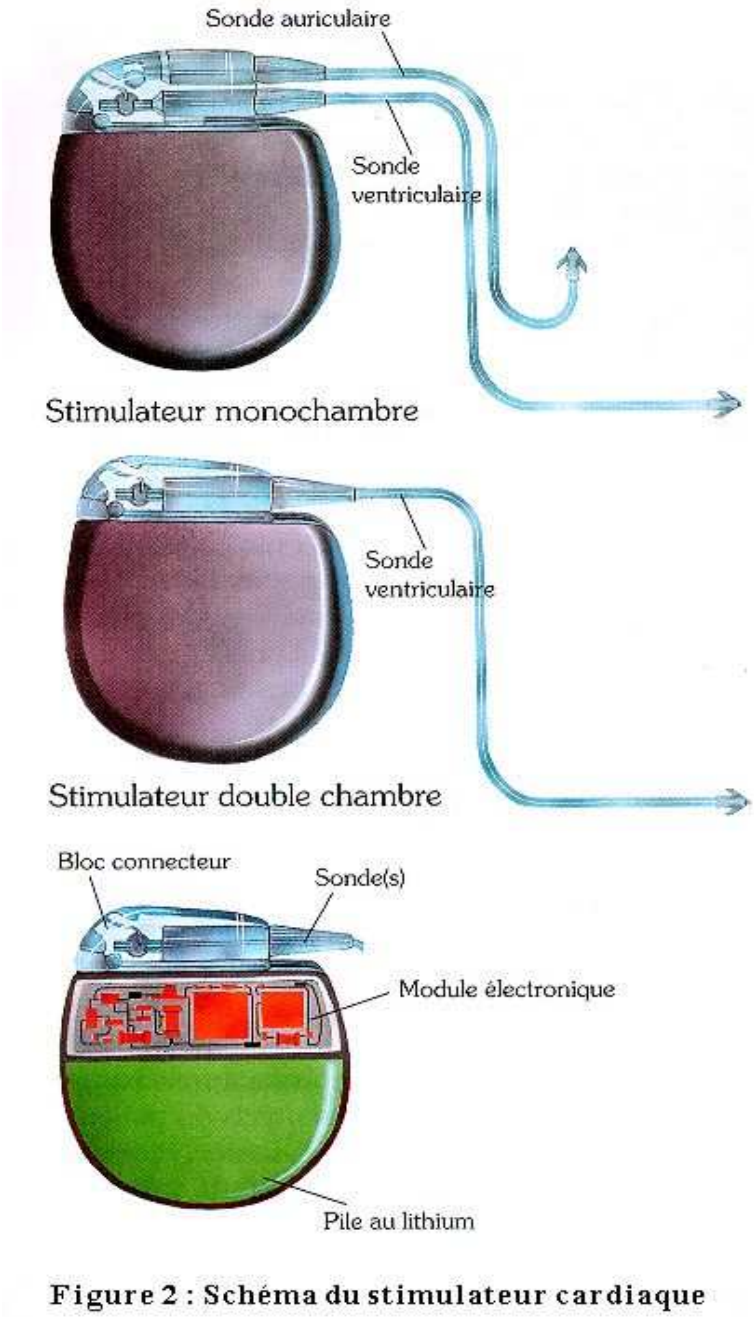


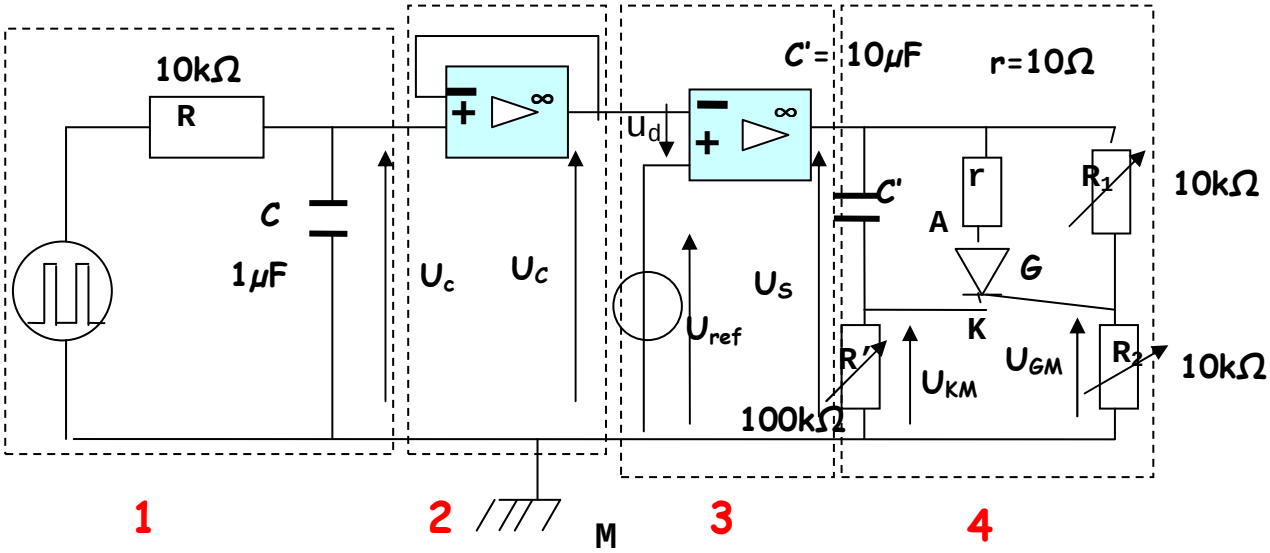
Figure 2 : Schéma du stimulateur cardiaque

Impulsion délivrée par le pacemaker

On sait que les cellules sont polarisées positivement à l'extérieur et négativement à l'intérieur ; les charges négatives générées par le pace maker entraînent l'ouverture des protéines canaux voltage dépendant (présentes dans la membrane), il y a alors afflux de charges négatives à l'intérieur des cellules du tissus nodal ce qui entraîne la dépolarisation des cellules et donc la propagation de l'influx nerveux.

15. Simulation du principe du pacemaker

Notre cœur se contracte entre 60 et 80 fois par minute, grâce à un stimulateur naturel : le nœud sinusal. Lorsque celui-ci ne remplit plus correctement son rôle, un pacemaker va forcer le muscle cardiaque à battre régulièrement en lui envoyant de petites impulsions électriques par l'intermédiaire de sondes.
Le pacemaker est en fait un générateur d'impulsions. L'impulsion est une tension dont la durée τ est faible devant la période T.
. Le pacemaker n'entre en fonction que lorsque le rythme cardiaque généré par le cœur est inférieur à une fréquence seuil.
Afin de simuler le fonctionnement d'un pacemaker, on a conçu le montage suivant :



Etage 1 : Convertisseur fréquence tension

Le générateur de signaux délivre une tension rectangulaire avec une tension d'offset positive et de rapport cyclique r $=\frac{\tau}{T}$. Cette tension simule les battements cardiaques.. Le condensateur se charge pendant la durée τ et se décharge pendant la durée T - τ à travers le conducteur ohmique de résistance R. la valeur moyenne de la tension U_C aux bornes du condensateur est donnée par l'expression $U_C = U_{e\,max}\frac{\tau}{T} = U_{e\,max}\tau f$ (U_{emax} est l'amplitude de la tension délivrée par le générateur)..
La tension aux bornes du condensateur est donc proportionnelle à la fréquence f des battements cardiaques. On a réalisé un convertisseur fréquence – tension.

Etage 2 : Montage suiveur

L'utilisation de la tension de sortie U_C de l'étage 1 nécessite de placer un montage suiveur destiné à conserver les performances du circuit.

Etage 3 ; Comparateur

Dans ce montage, l'amplificateur étant en boucle ouverte, la tension de sortie U_S est saturée.

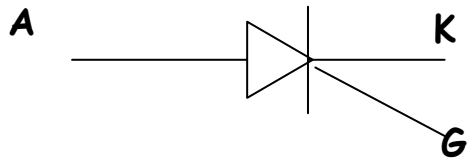
$U_S = U_{sat}$ si la tension différentielle d'entrée u_d est positive, soit si $U_C < U_{ref}$

U_{ref} est une tension continue de référence.

$U_S = -U_{sat}$ si $u_d < 0$ soit si $U_C > U_{ref}$

Etage 4 : Générateur d'impulsions à thyristor

Le thyristor est fonctionnellement équivalent à une diode (AK) dont la conduction est commandée par le courant injecté sur une électrode supplémentaire appelée gâchette (G).



$U_{AK} > 0$ Si l'on injecte un courant de faible intensité i_G entre la gâchette et la cathode K, le thyristor devient passant dans le sens direct (de A vers K). ; alors l'intensité du courant qui traverse le thyristor est importante et la tension U_{AK} est faible ($UAK \approx 0$).

Si **$U_{AK} < 0$** le thyristor est toujours bloqué et le système ne peut être réamorcé que lorsque l'on envoie un courant dans la gâchette au moment où U_{AK} devient positif.

Envisageons le cas où la tension d'entrée de l'étage 4 soit U_{sat} et le condensateur de capacité C' déchargé. Dans ce cas $U_{KM} = U_{sat}$. La tension entre la gâchette G et la masse U_{GM} est fixée à l'aide d'un pont diviseur de tension $U_{GM} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} U_{sat}$

$U_{GM} < U_{KM} = U_{sat}$ aucun courant ne circule dans la gâchette, le thyristor est alors bloqué .Le condensateur C' va se charger et donc la tension U_{KM} va diminuer.

Lorsque $U_{KM} = U_{GM} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} U_{sat}$ un courant va de nouveau circuler dans la gâchette, ce qui va débloquer le thyristor. La tension aux bornes de ce dernier

est faible et le condensateur va se décharger très rapidement. De nouveau $U_{KM} = U_{sat}$, le thyristor est bloqué et le condensateur va se charger et ainsi de suite…..

Simulation

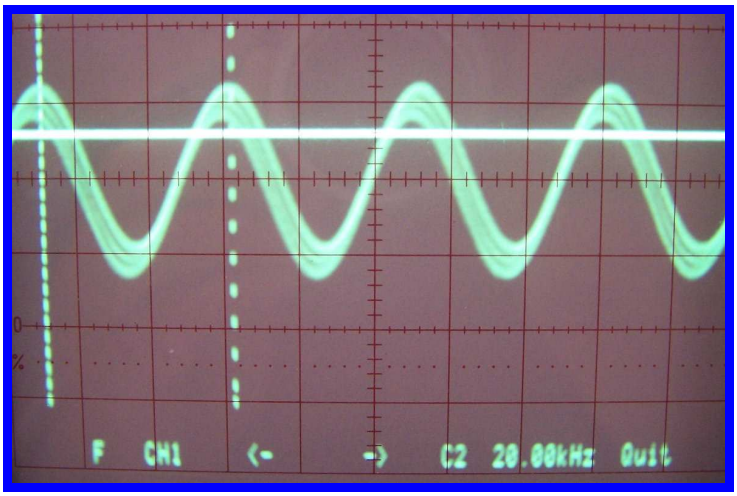
La fréquence des battements cardiaques devient inférieure à une fréquence seuil, la tension aux bornes du condensateur C de l'étage 1 diminue (U_C = kf). Cette tension U_C devient alors inférieure à la tension de référence U_{ref} ce qui entraîne un basculement de la sortie du comparateur à U_{sat}. Cette tension va alors commander l'émission d'impulsions par l'étage 4 qui va de nouveau accélérer les battements cardiaques.
La tension U_C = kf va donc augmenter. Lorsque cette tension sera supérieure à U_{ref} la sortie du comparateur va basculer à $-U_{sat}$, ce qui va entraîner le blocage du thyristor.

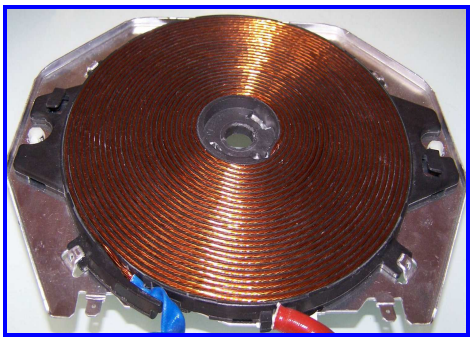
Grâce aux progrès de la technique, la plupart des stimulateurs cardiaques peuvent être réglés en appliquant un appareil de programmation spécial sur la peau au-dessus du stimulateur. Cet appareil communique avec la partie électronique du stimulateur par des ondes électromagnétiques et permet de modifier les réglages du stimulateur en fonction des besoins du patient. L'un des réglages importants concerne la fréquence de base, c'est-à-dire la fréquence que le stimulateur va assurer.

Le système de conduction électrique du cœur pouvant présenter des troubles à plusieurs niveaux, **plusieurs types de stimulateurs** ont été développés afin de corriger au mieux les différents troubles. En plus du **système unicaméral** (ou monochambre) décrit ci-dessus, il existe un **système à double chambre**. Ce système est doté d'une deuxième électrode reliée à l'oreillette droite. Cela permet de respecter la fonction de l'oreillette soit en la stimulant avant les ventricules, soit en détectant son activité en provenance du stimulateur naturel, le nœud sinusal, pour ensuite stimuler le ventricule en cas de défaillance de la Conduction auriculo -ventriculaire.Le système double chambre améliore souvent la fonction cardiaque en permettant une accélération des battements lors d'activités physiques notamment.Les stimulateurs à **fréquence cardiaque asservie** à l'activité disposent en plus d'un mécanisme capable de détecter l'activité physique du patient et d'accélérer la fréquence de stimulation et donc les battements cardiaques selon l'activité du sujet. Le médecin traitant choisira le type de stimulateur adapté à l'état du patient.

Comment la plaque à induction modifie-t-elle le fonctionnement du pace maker ?

Alimentons une bobine de plaque à induction, récupérée chez un vendeur de pièces détachées d'électroménager, et branchons la aux bornes d'un générateur de signaux délivrant une tension alternative sinusoïdale de fréquence 20 kHz.
Connectons un fil conducteur à une des bornes d'entrée d'un oscilloscope. En jouant sur la sensibilité et la base de temps, on observe une tension sinusoïdale de fréquence 20 kHz.





Bobine plate d'une plaque à induction

La bobine parcourue par un courant variable, crée une onde électromagnétique (propagation dans l'espace d'un champ électrique et d'un champ magnétique variables).
Ce champ électrique va faire vibrer les électrons du fil, jouant le rôle d'une antenne. Il apparaît donc aux bornes du fil une tension détectée par l'oscilloscope de fréquence 20 kHz.

La sonde qui relie le pace maker au cœur est constituée d'un ressort en titane de 75 cm de longueur, entourée par une gaine en silicone.
Lorsqu'on s'approche d'une plaque à induction, le champ magnétique crée par cette dernière va générer dans le ressort de la sonde une tension induite (phénomène d'induction électromagnétique).

Cette tension amplifiée par le pacemaker entraîne le dérèglement du module de stimulation du pace maker, celui-ci émet en permanence des impulsions sans prendre en compte l'activité propre du cœur, il s'en suit une modification du rythme cardiaque.
Il est donc conseillé de ne pas s'approcher d'une plaque à induction à moins de trois mètres.

BIBLIOGRAPHIE

📖 MPI : Collection Durandeau. Mesures Physiques et informatiques Edition Hachette
📖 Première STI, Physique appliquée. Génie électronique Edition Hachette

📖 Terminale STI, Génie électronique, Physique appliquée Edition Hachette

📖 SVT seconde Edition Hachette

📖 SVT première S Edition Hachette

📖 Physiologie humaine

🖰 www. Bostons scientific .fr

🖰 www. Fondation suisse de cardiologie.com

Remerciements

Nous remercions particulièrement Mme Chassaing (cardiologue au centre hospitalier d'Angoulême), Mme Boutinon (responsable du service cardiologie au centre hospitalier d'Angoulême), M Gauthier J.P (Ingénieur et Directeur général de la société St jude Médical), le personnel du laboratoire de sciences physiques, M Dupuy et Mme Ponceau professeurs de Sciences physiques et de SVT au lycée Guez de Balzac qui nous ont encouragé et soutenu tout au long de notre projet.