



# TRANSMISSION OPTIMALE D'ENERGIE SANS FIL

COURBOT CORENTIN  
N° SCEI: 25411

# Contexte

## ENCOMBRANT

La durée de recharge à l'arrêt est un inconvénient car elle immobilise le véhicule et l'usager le temps de la recharge



## FAIBLE ENTRETIEN

Le moteur thermique contient plus de 2000 pièces contre environ 150 pour le moteur électrique

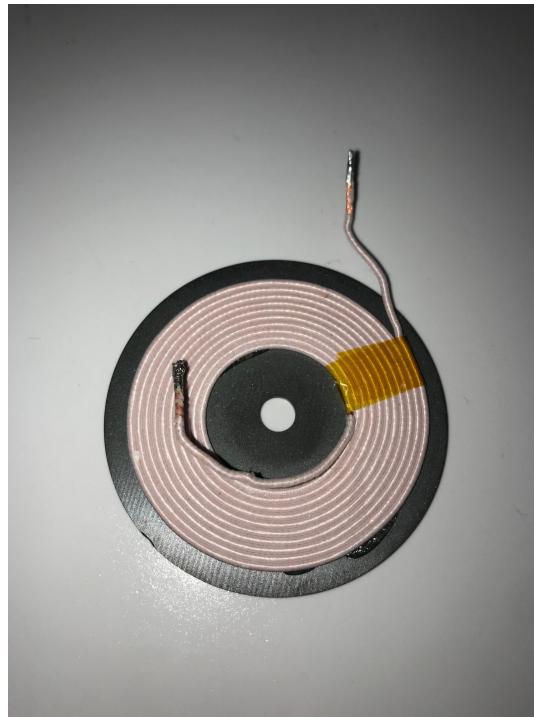
## EFFICACITE

Le moteur électrique présente un meilleur rendement que le moteur thermique (90% contre 45% environ)

“

*Comment optimiser le couplage  
inductif dans le but de recharger les  
véhicules électriques?*

## Matériel utilisé



Inductance	<b>15mH</b>	<b>7,1mH</b>	<b>7,1mH</b>
Résistance	<b>3,02Ω</b>	<b>0,07Ω</b>	<b>0,07Ω</b>
Capacité parasite (déterminée ultérieurement)	<b>50pF</b>	<b>40pF</b>	<b>40pF</b>

# Sommaire

Etude de l'influence  
des paramètres  
géométriques

Influence  
de la  
nature du  
circuit

Application  
au monde  
automobile

- Distance à l'axe
- Dés-alignement
- Déviation angulaire

- Bobine à fils classiques
- Circuit résonant
- Bobine à fils de Litz

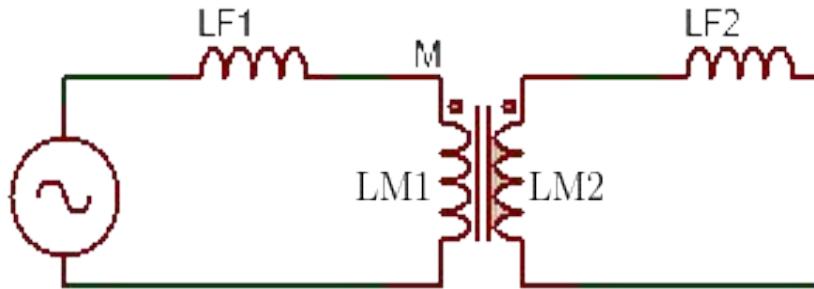
- Types de recharge
- Cas du véhicule à l'arrêt
- Cas du véhicule en mouvement

# 1.

## INFLUENCE DES PARAMETRES GEOMETRIQUES

# Coefficient de couplage théorique

Les pertes de flux liées à un couplage non parfait sont modélisées par des inductances de fuites:



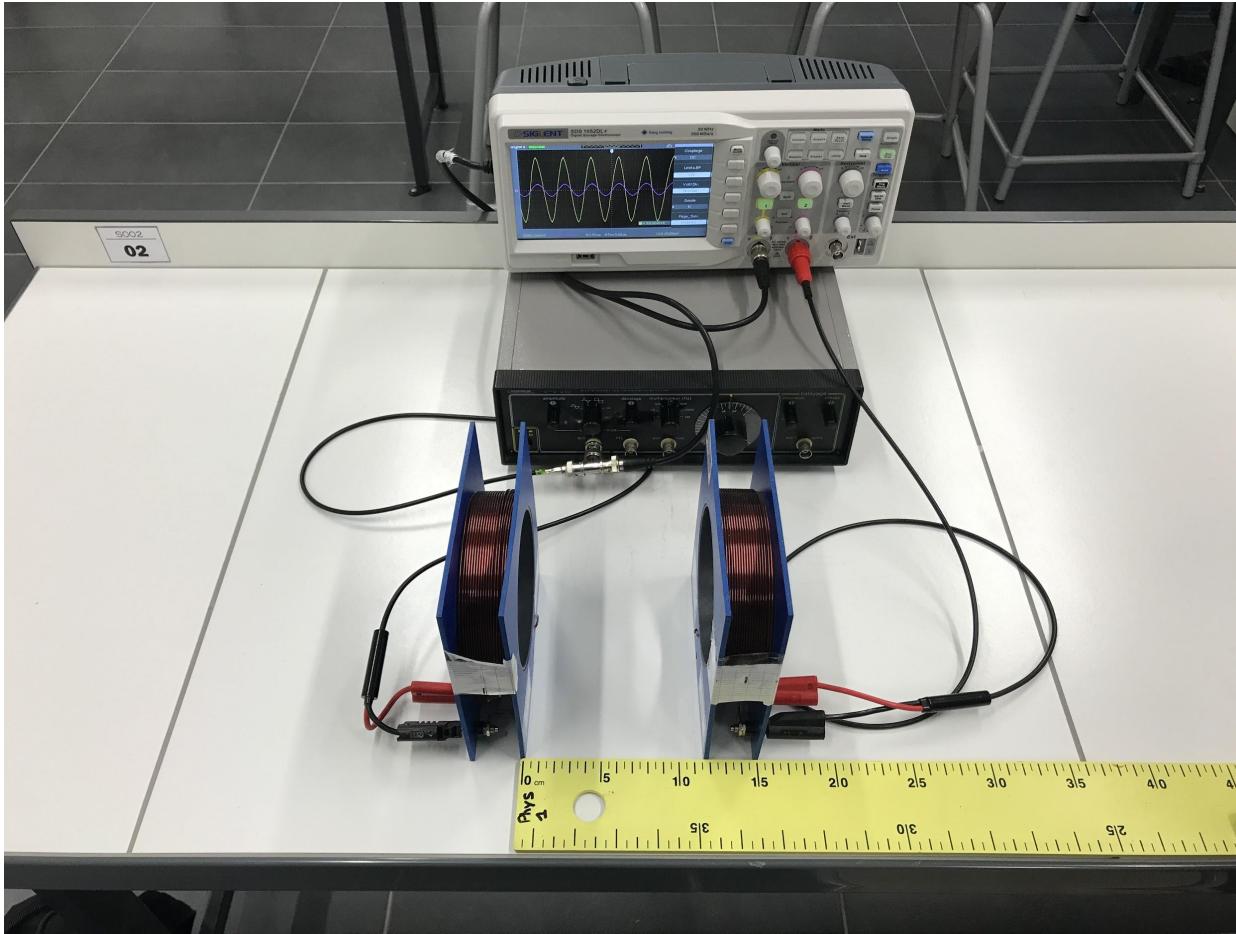
$$L_1 = L_{f1} + L_{m1}$$
$$L_2 = L_{f2} + L_{m2}$$
$$k = \frac{M}{\sqrt{L_1 L_2}}$$

$M$  définit l'inductance mutuelle du couplage entre les 2 circuits électriques et  $k$  le coefficient de couplage

Dans le cas de deux bobines identiques:

$$k = \frac{M}{L}$$

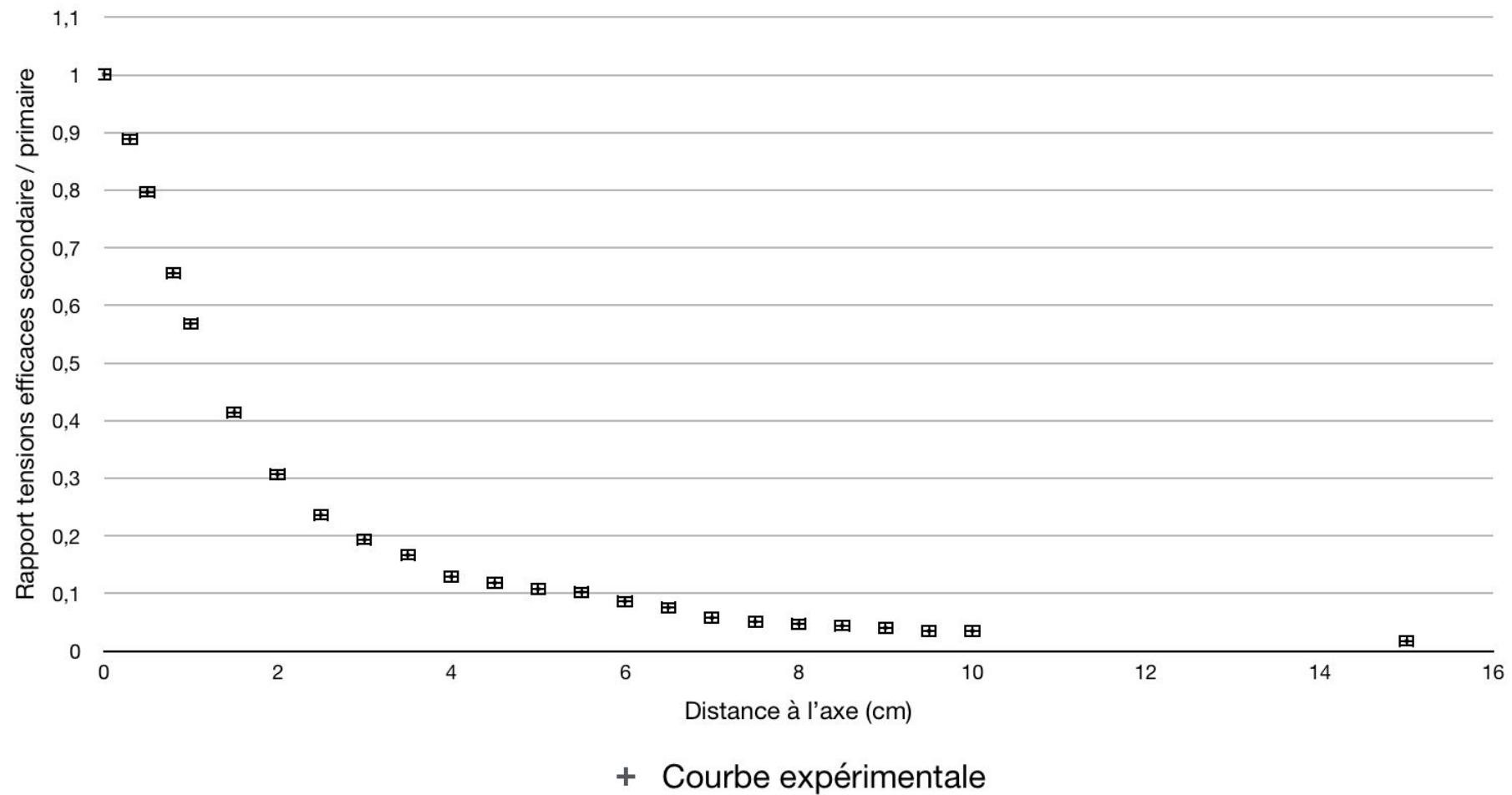
# Distance à l'axe



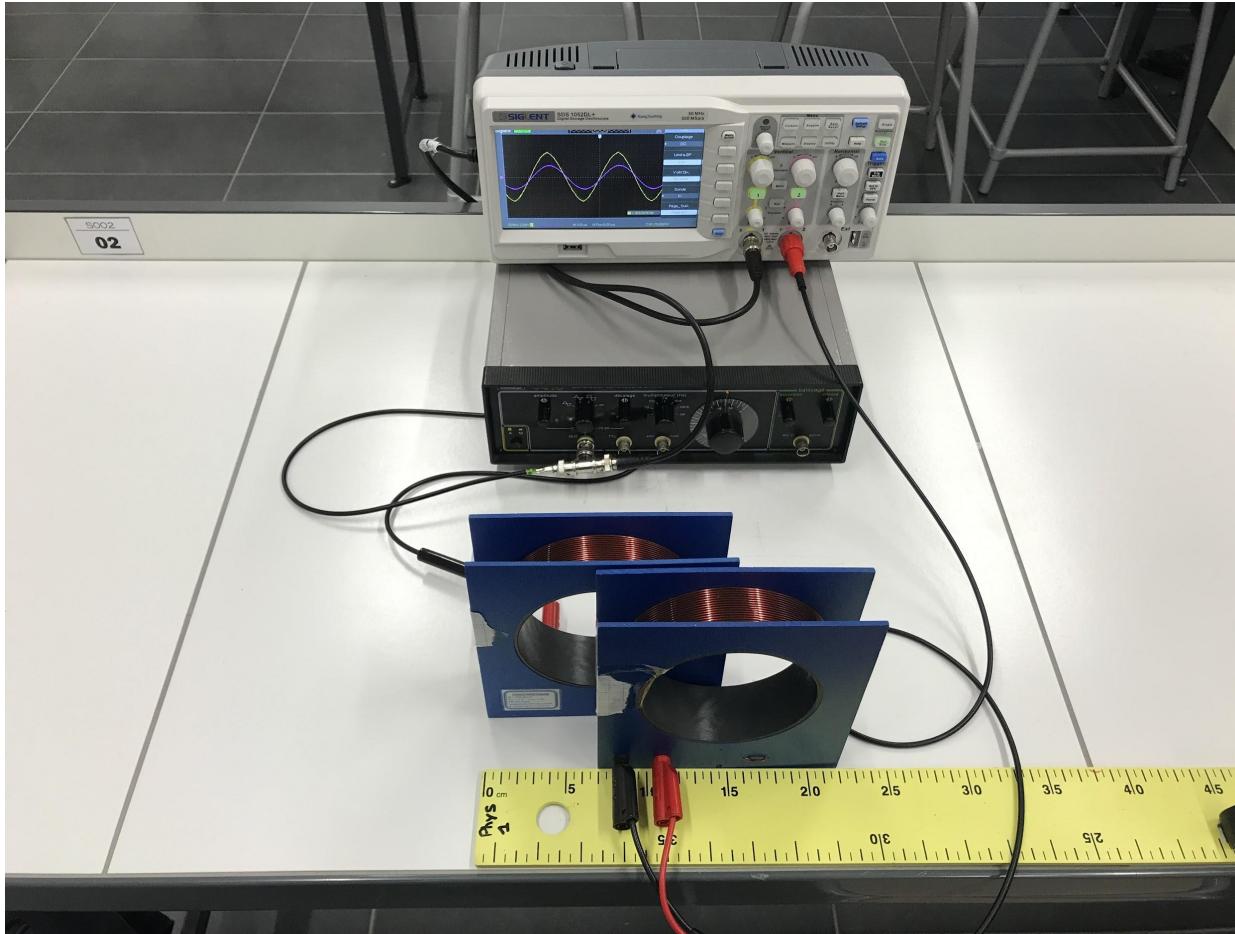
Protocole expérimental: faire varier la distance entre les deux bobines et mesurer pour chaque distance le rapport des tensions efficaces

# Distance à l'axe

Influence de la distance à l'axe



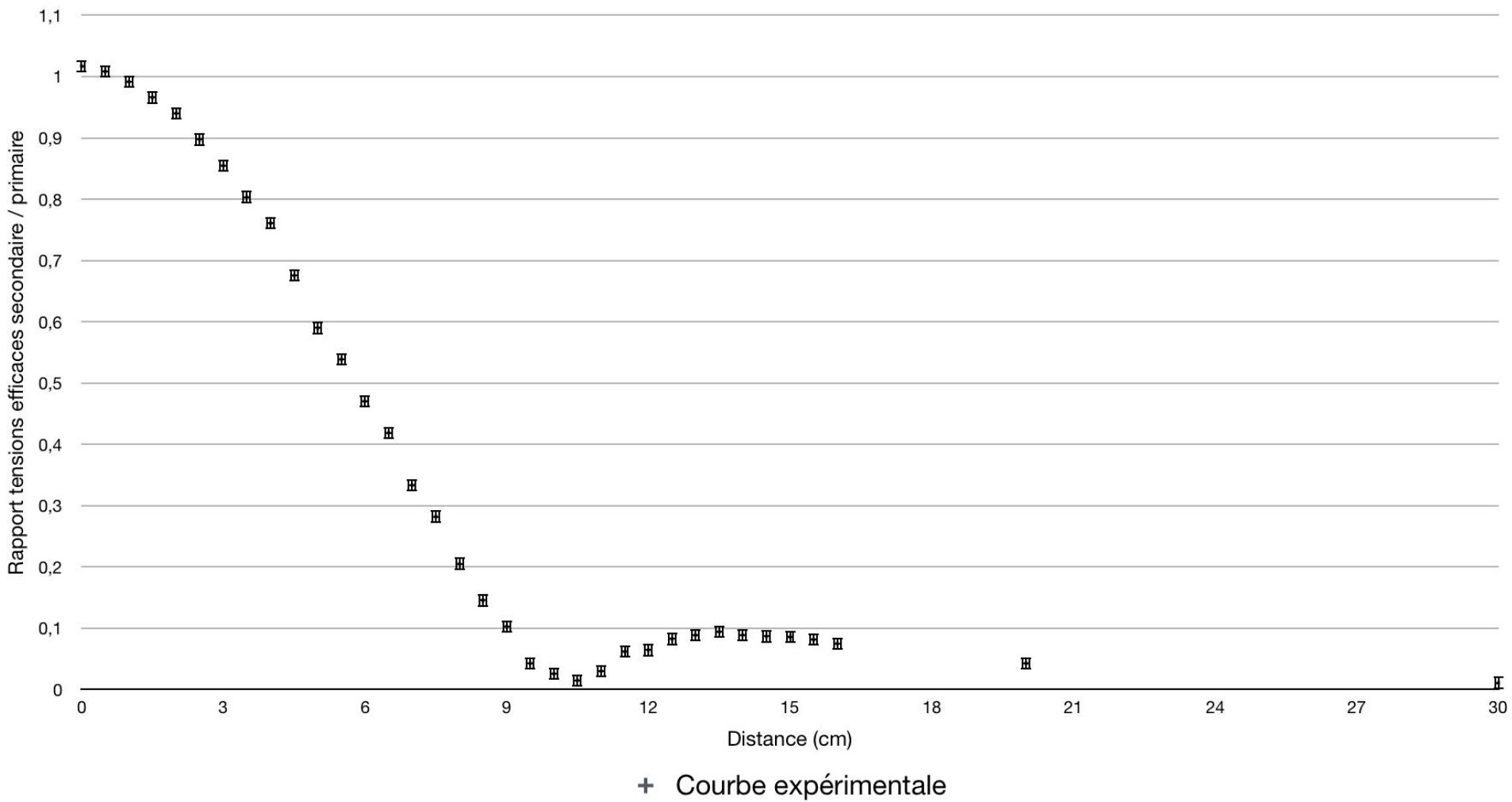
# Dés-alignement



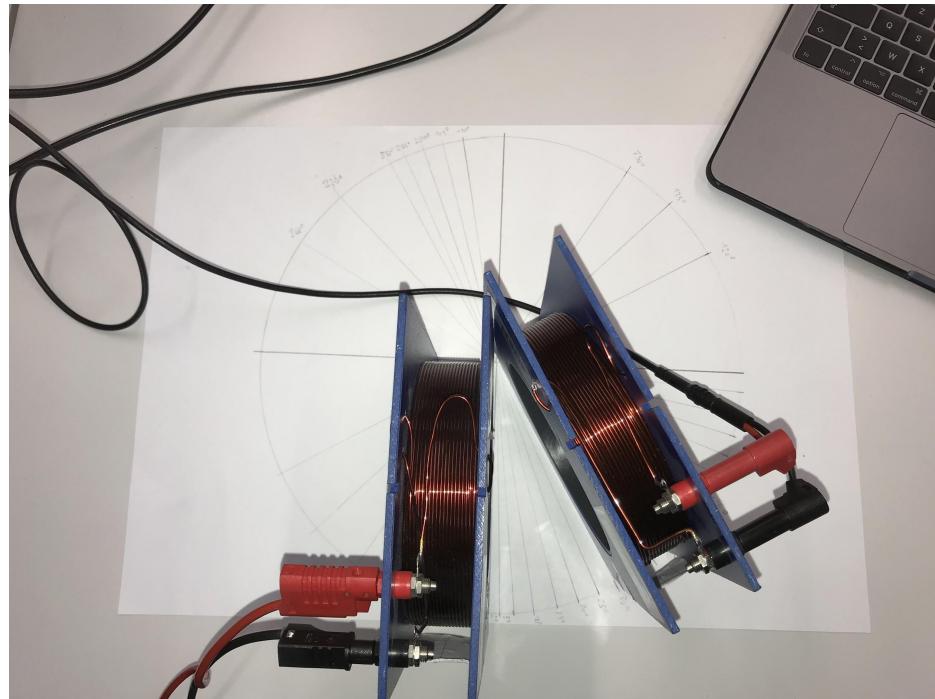
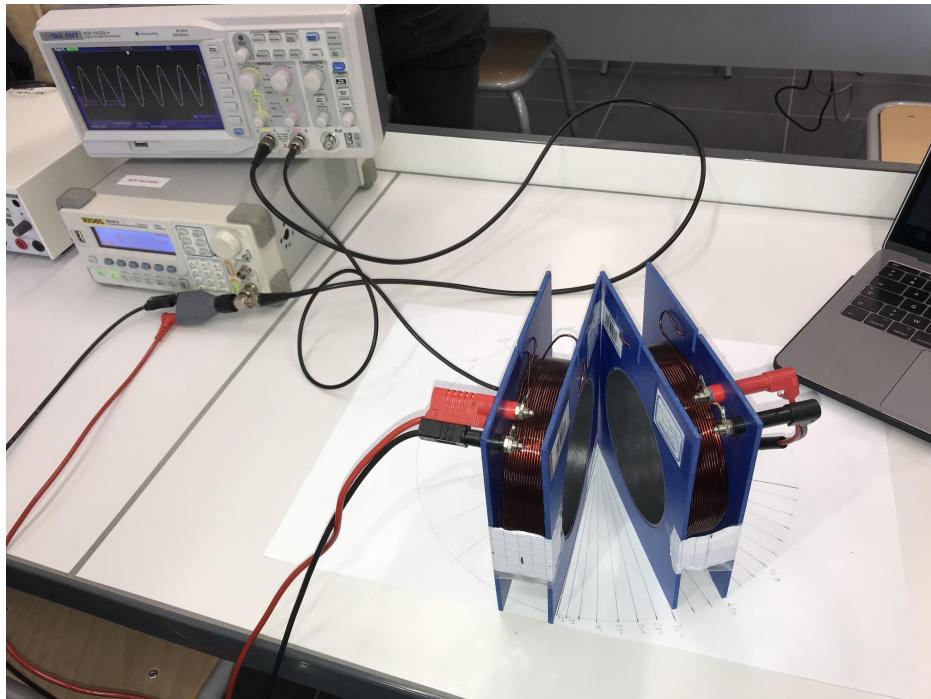
Protocole expérimental: faire varier la distance entre les deux bobines et mesurer pour chaque distance le rapport des tensions efficaces

# Dés-alignement

Influence du dés-alignement



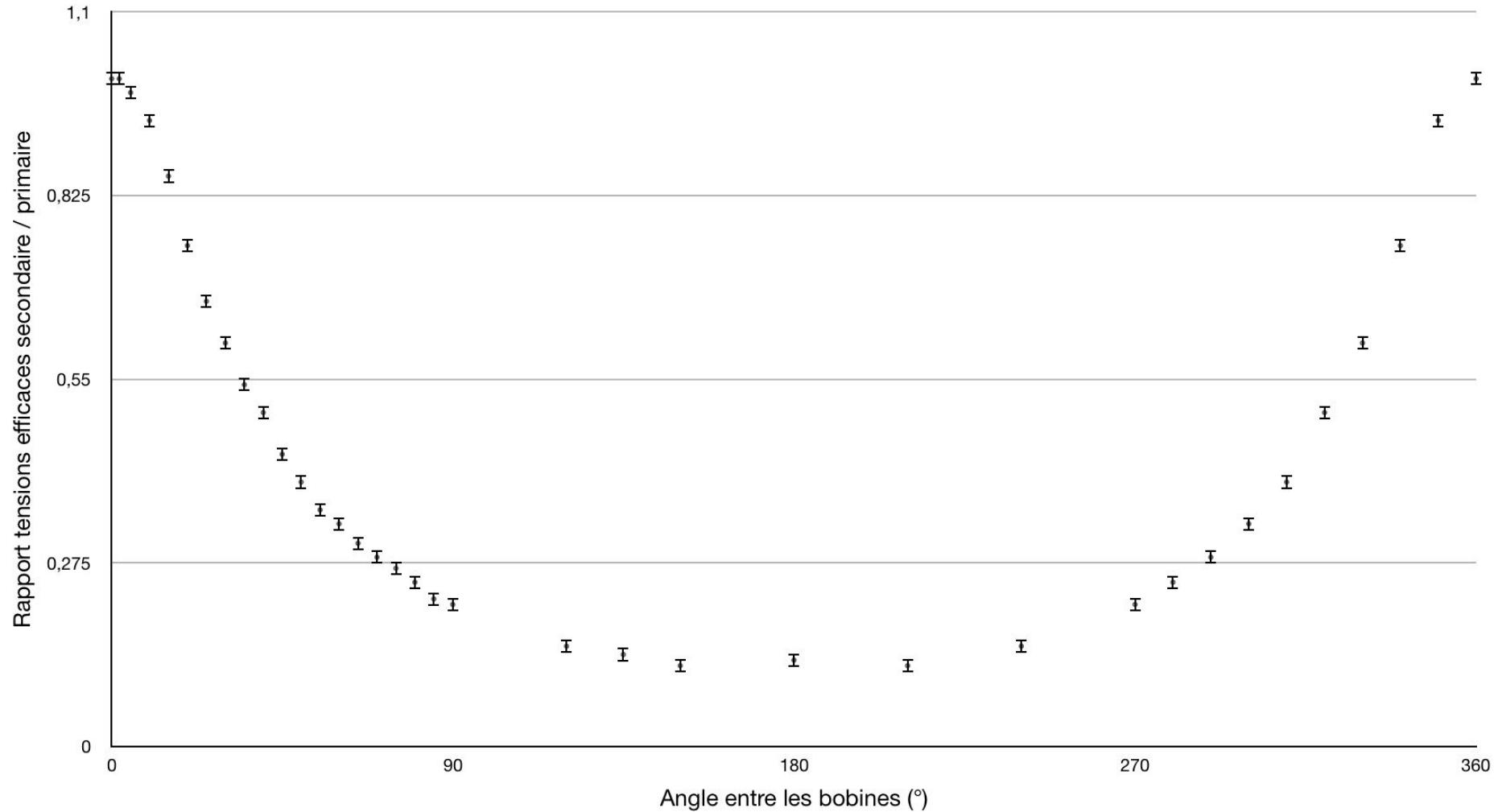
# Déviation angulaire



Protocole expérimental: faire varier l'angle entre les deux bobines et mesurer pour chaque valeur d'angle le rapport des tensions efficaces

# Déviation angulaire

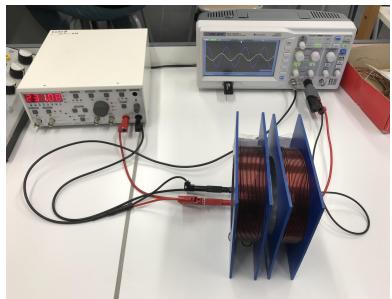
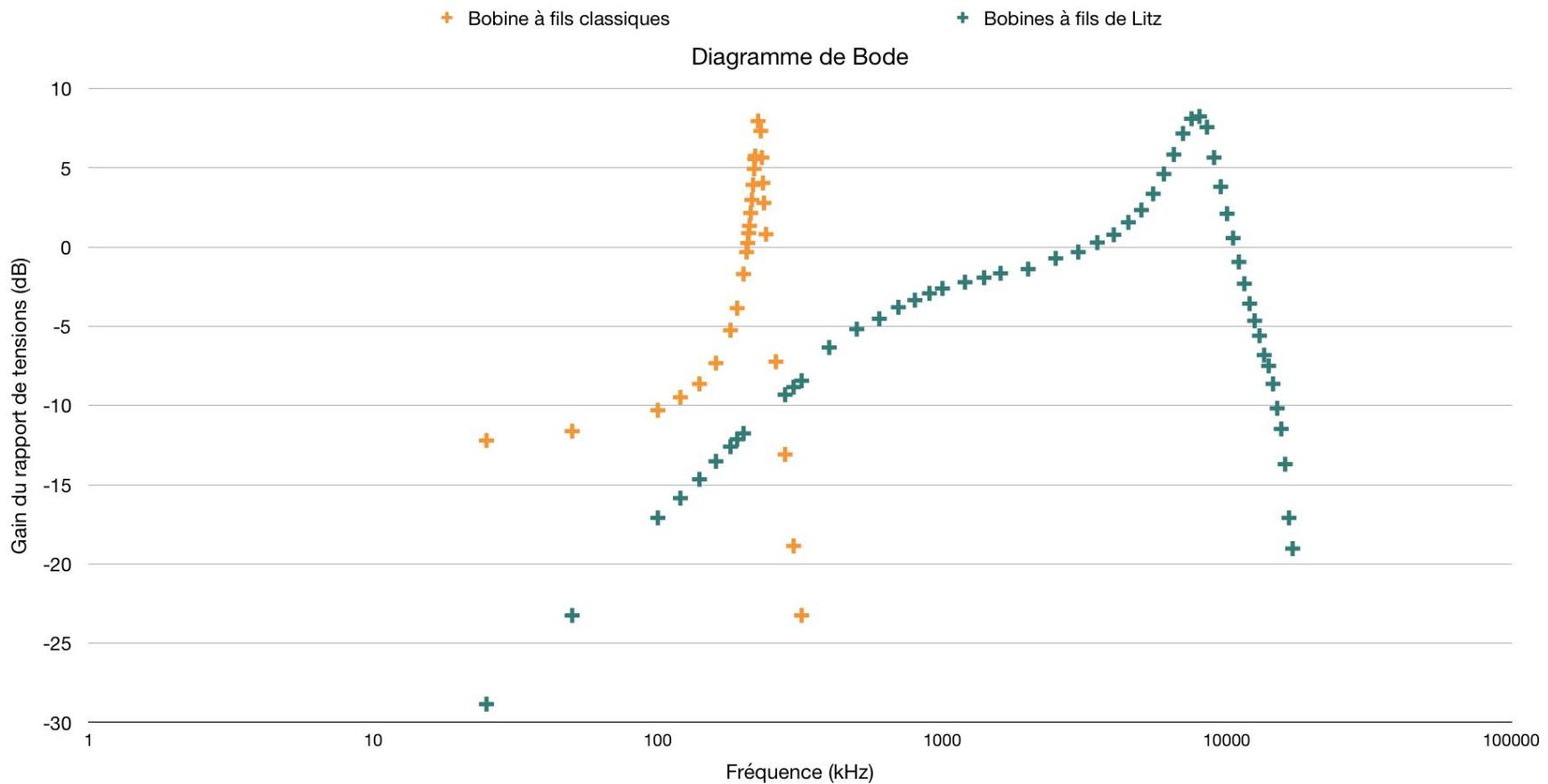
Influence de l'angle



## 2.

# INFLUENCE DE LA NATURE DU CIRCUIT ÉLECTRIQUE

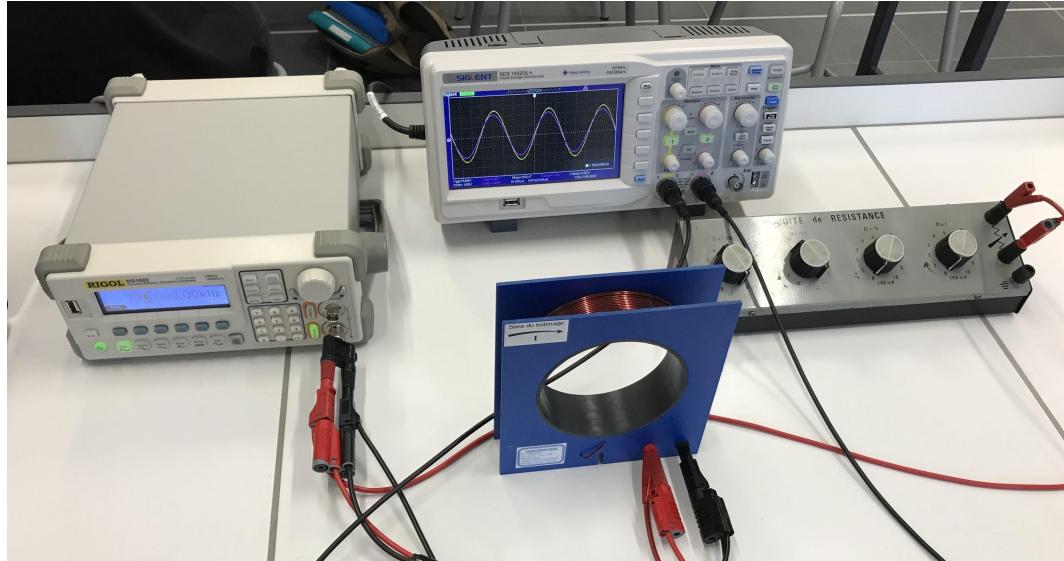
# Présentation des bobines



Allures similaires au circuit RLC, ce qui peut être causé par la présence de capacités parasites inter-fils

# Etude des bobinages

## DETERMINATION DE LA CAPACITE PARASITE PAR AUTO-RESONANCE



Mesure de la fréquence de résonance  $f$ ,  
ainsi on en déduit que:

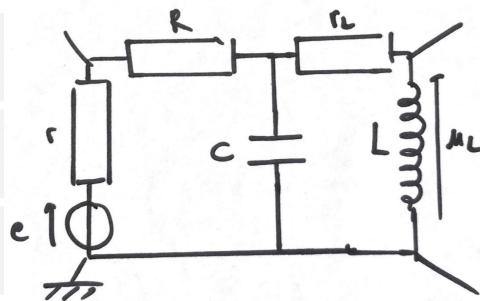
$$C = \frac{1}{4(\pi f)^2 L} \text{ avec } f=188\text{kHz}$$

Puis finalement  $C=50\text{pF}$

R **2kΩ**

L **15mH**

r **50Ω**



# Circuit résonant: étude théorique

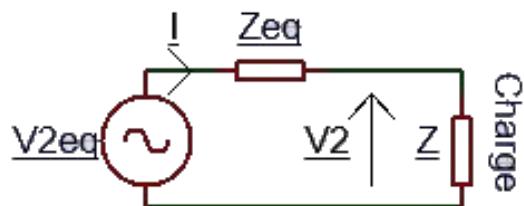
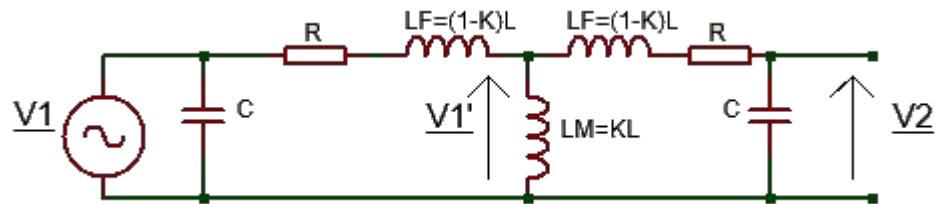
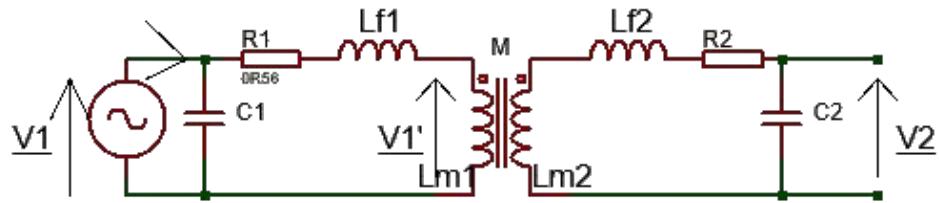


Schéma de thévenin équivalent

$$\underline{V}_{2eq} = \frac{k.jl\omega}{(R + j.l\omega)(1 - LC\omega^2 + j.RC\omega)} \cdot \underline{V}_1$$

On vérifie expérimentalement que  $R \ll L\omega$

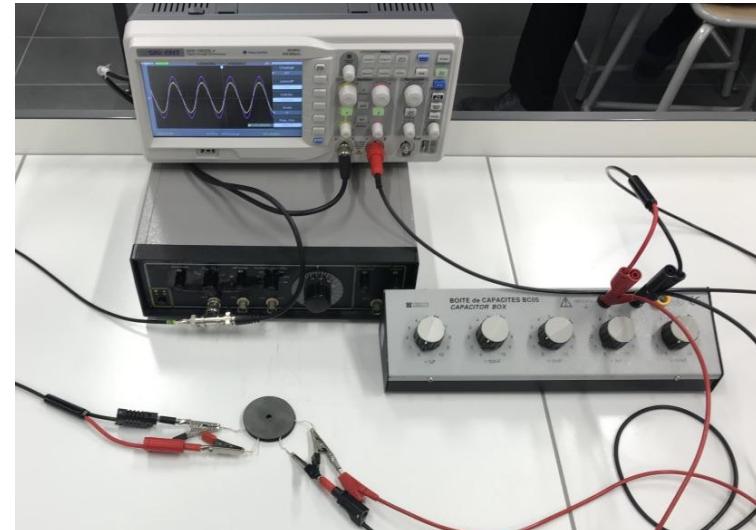
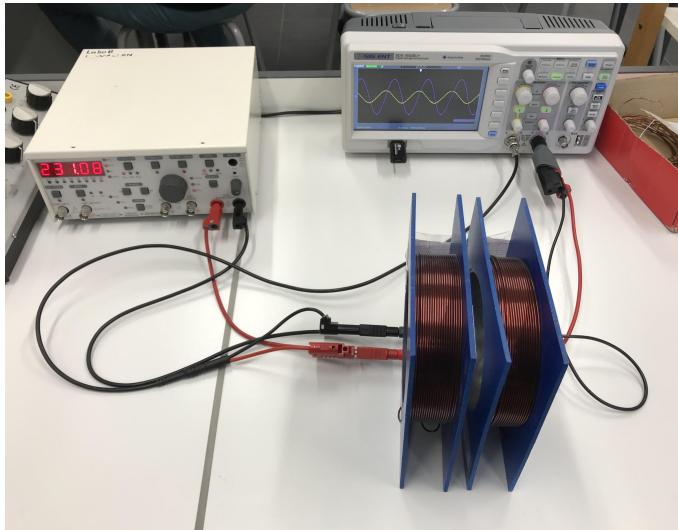
Et ainsi :

$$\underline{V}_{2eq} = \frac{k}{(1 - LC\omega^2 + j.RC\omega)} \cdot \underline{V}_1$$

$$Z_{eq} \simeq \frac{R + j.L\omega}{1 - LC\omega^2 + j.RC\omega}$$

A la résonance en  $f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$ :  $\frac{\underline{V}_{2max}}{\underline{V}_1} = \frac{k}{R} \sqrt{\frac{L}{C}}$

# Circuit résonant



Sans capacité au secondaire

Fréquence de résonance

k

225kHz

4,2e-4

Avec capacité au secondaire  
(Cadapt=16nF)

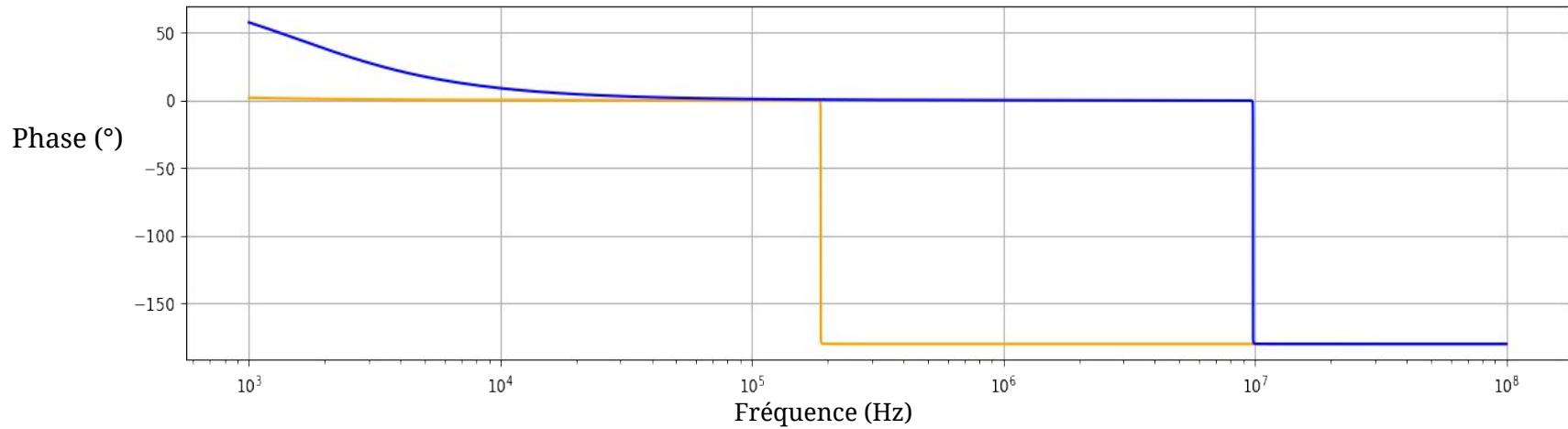
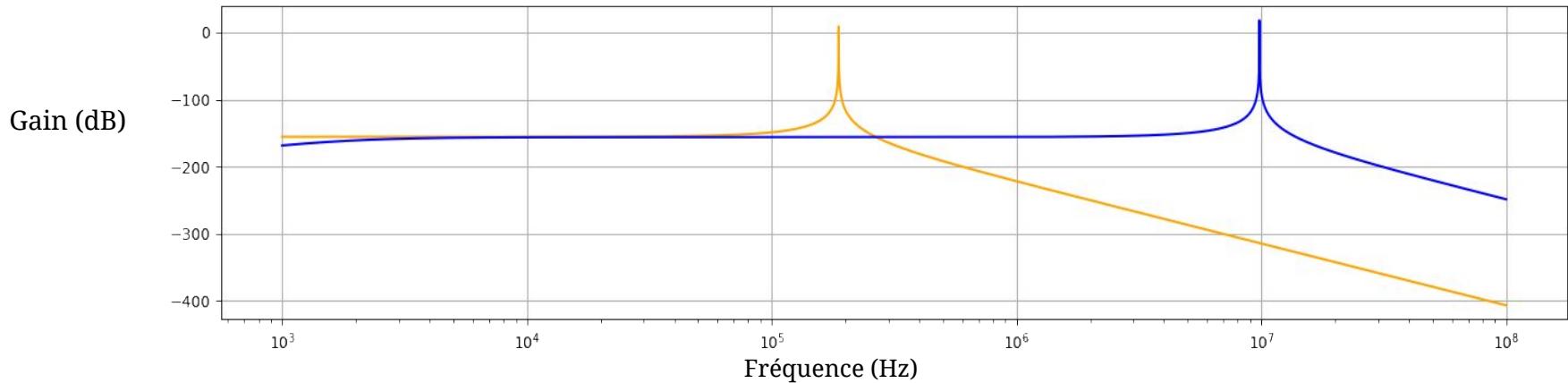
322kHz

4,1e-4

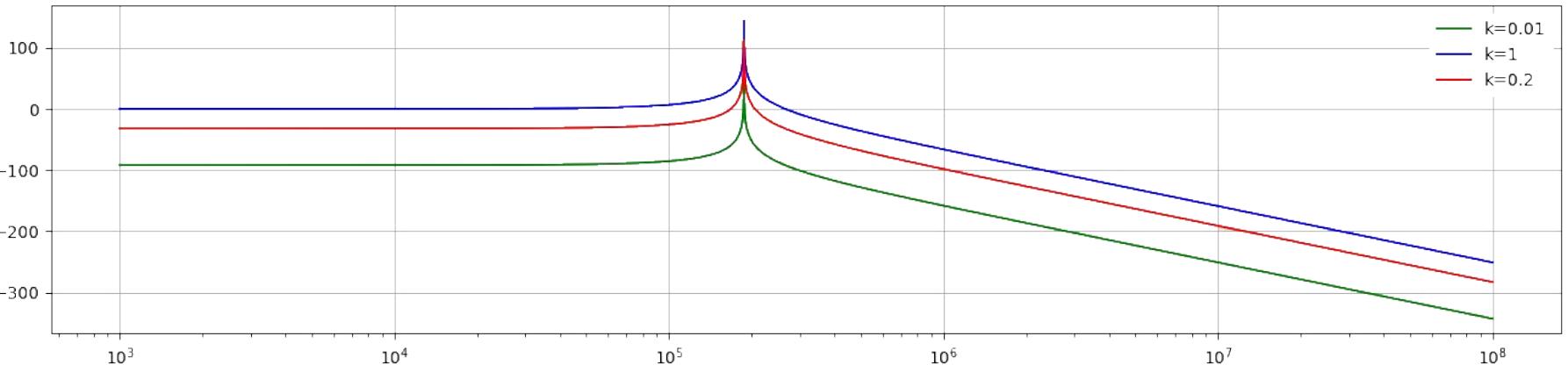
Ajout d'une capacité au secondaire afin de réduire la fréquence de résonance du circuit utilisant des fils de Litz pour la situer dans le domaine d'utilisation

# Diagramme de Bode théorique

- bobines à fils de Litz      - bobines classiques

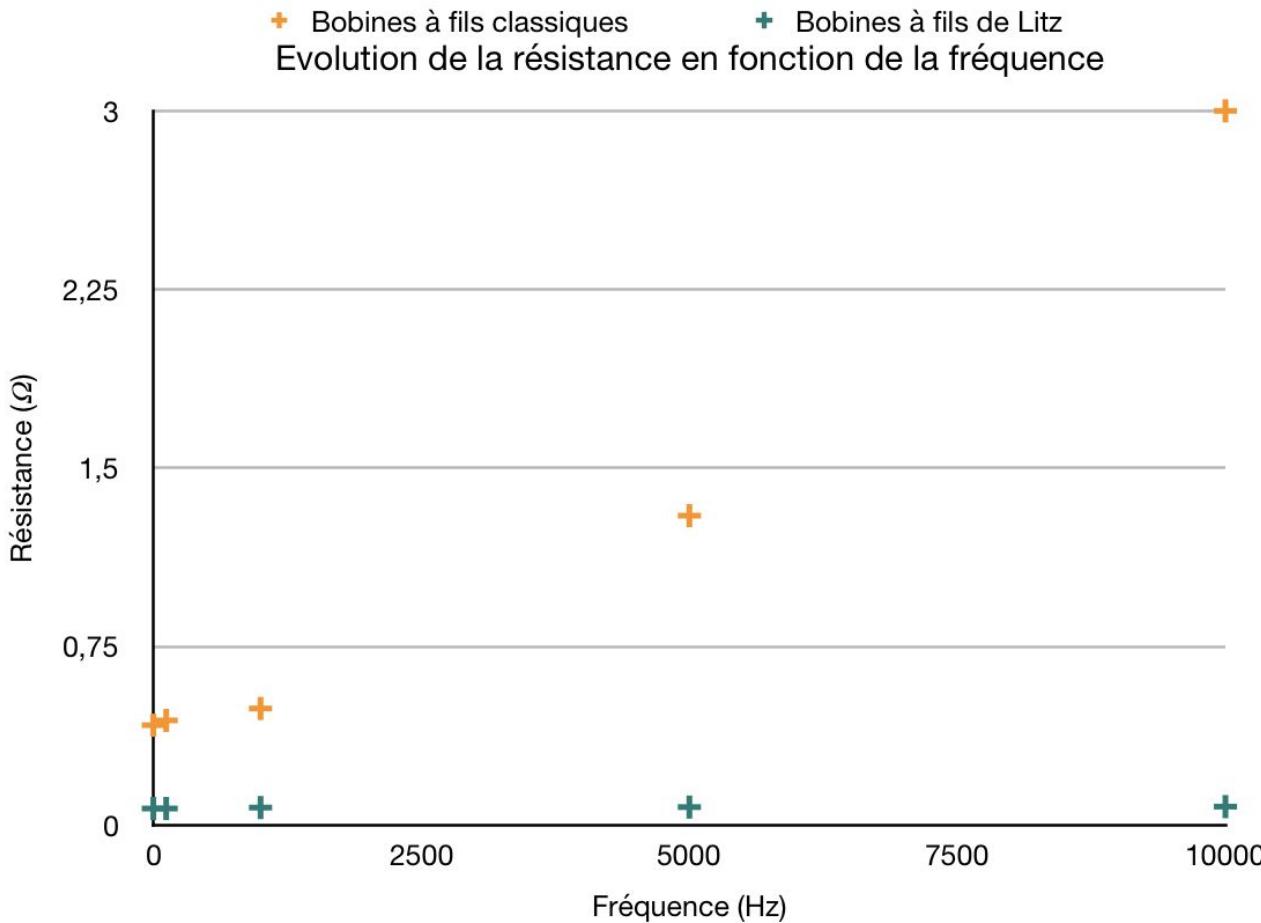


# Diagramme de Bode théorique



Apriori, la fréquence de résonance ne dépend pas du coefficient de couplage

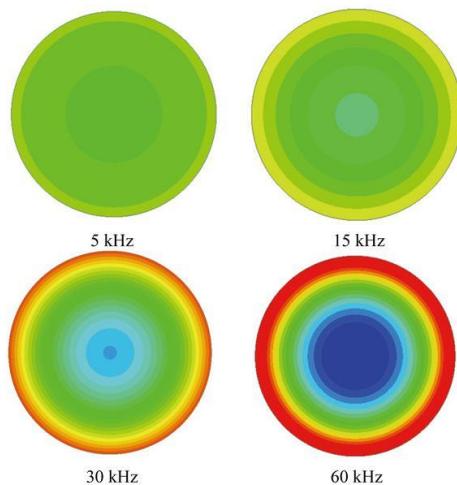
# Évolution de la résistance



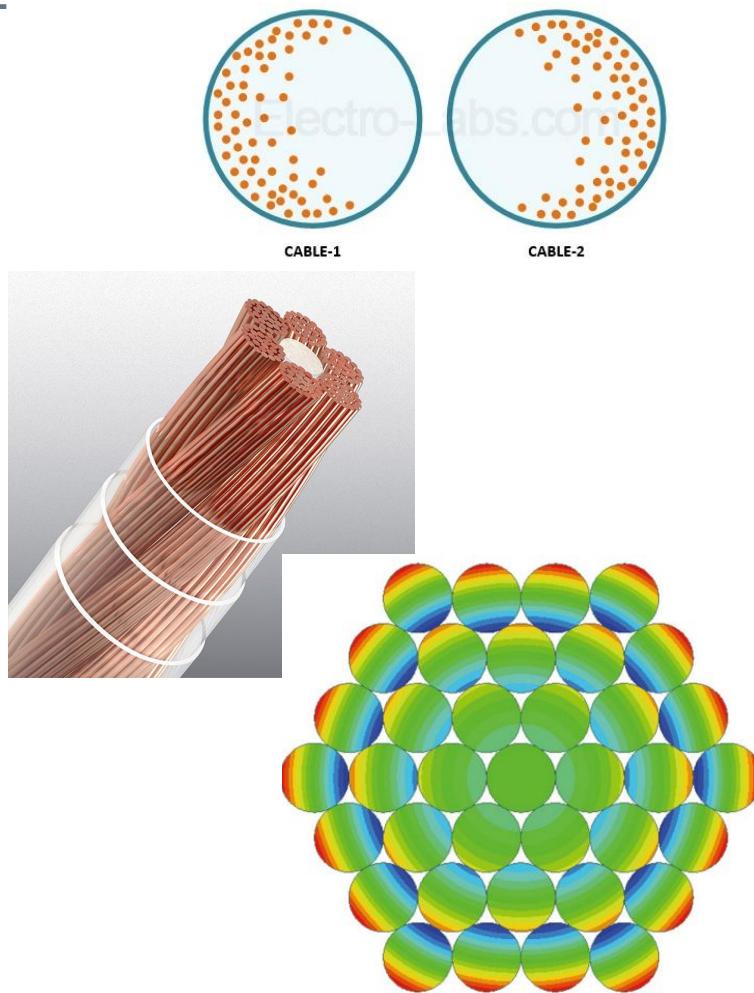
Pertes par effet Joule moins importantes pour des fils de Litz: plus avantageux dans l'application au monde automobile

# Fils de Litz et fils classiques

## EFFET DE PEAU ET EFFET DE PROXIMITÉ



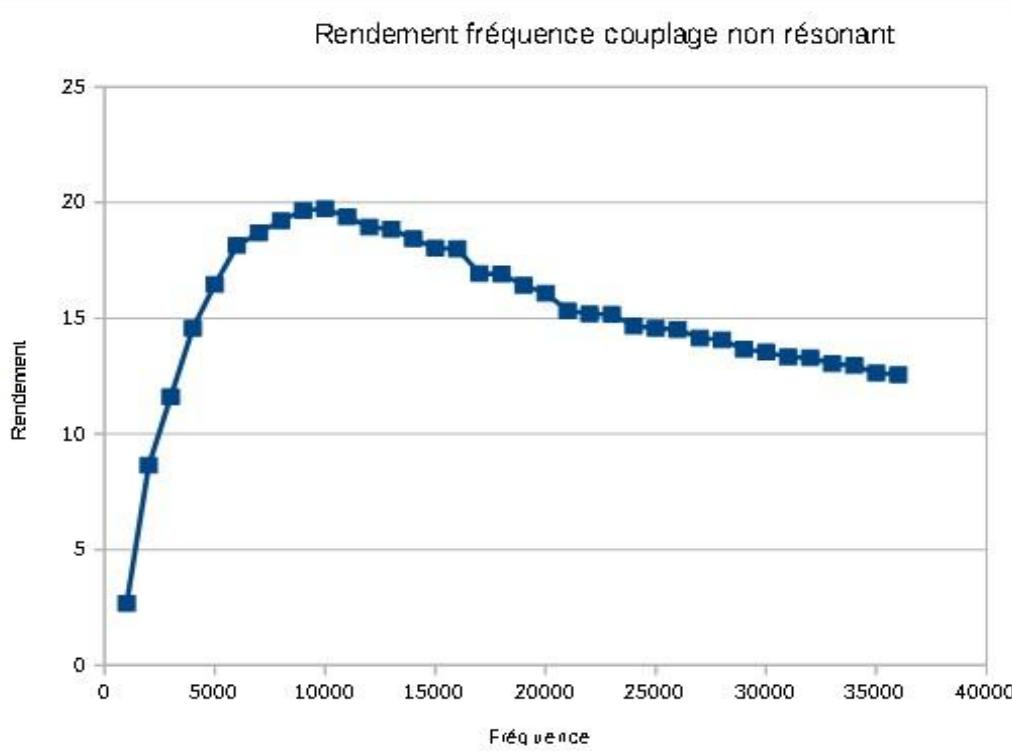
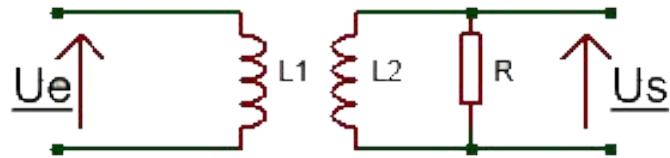
Fil de cuivre  
classique



# Rendement circuit non résonant

## ETUDE DU RENDEMENT

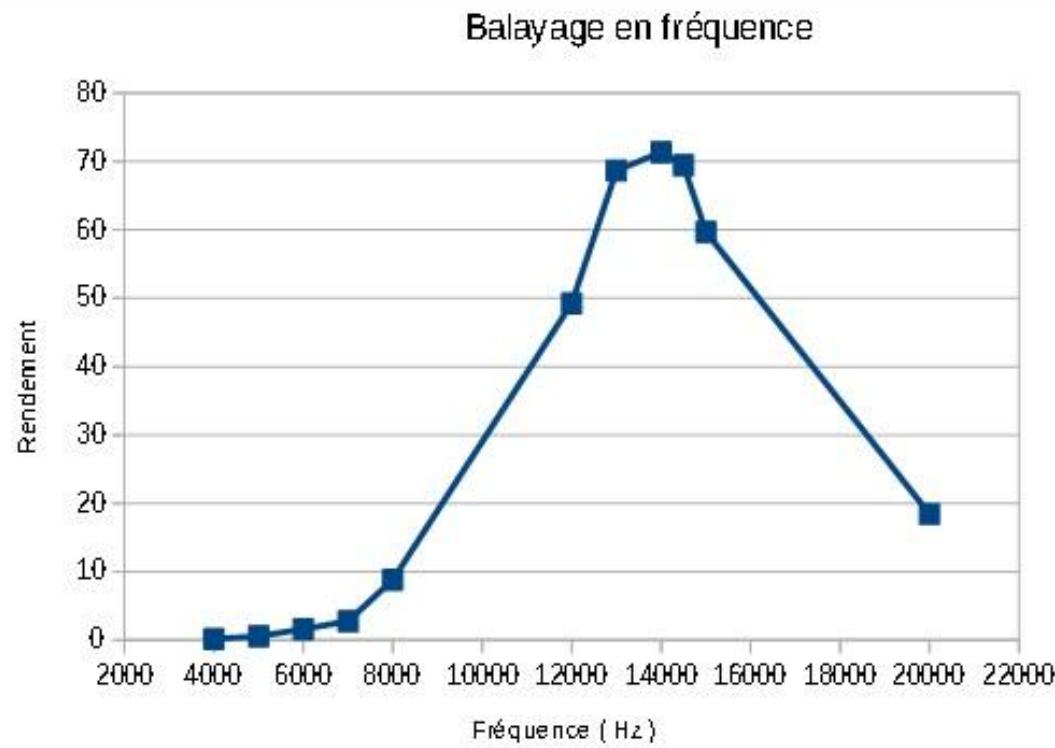
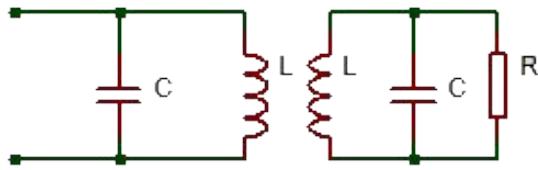
Réalisation d'une étude fréquentielle: étude de la variation du rendement en fonction de la fréquence



Le rendement maximal obtenu est de **19%** à  $f=10\text{kHz}$  pour une charge  $R=80\Omega$

Il est indispensable d'envisager l'utilisation de la résonance

# Rendement circuit résonant



Le rendement maximal obtenu est de **71%** à  $f=12\text{kHz}$  pour une charge  $R=80\Omega$  et  $C=1.1\mu\text{F}$

Ce qui est perfectible mais encourageant

# 3. APPLICATION AU MONDE AUTOMOBILE

# Types de recharge possibles

## RECHARGE À L'ARRÊT

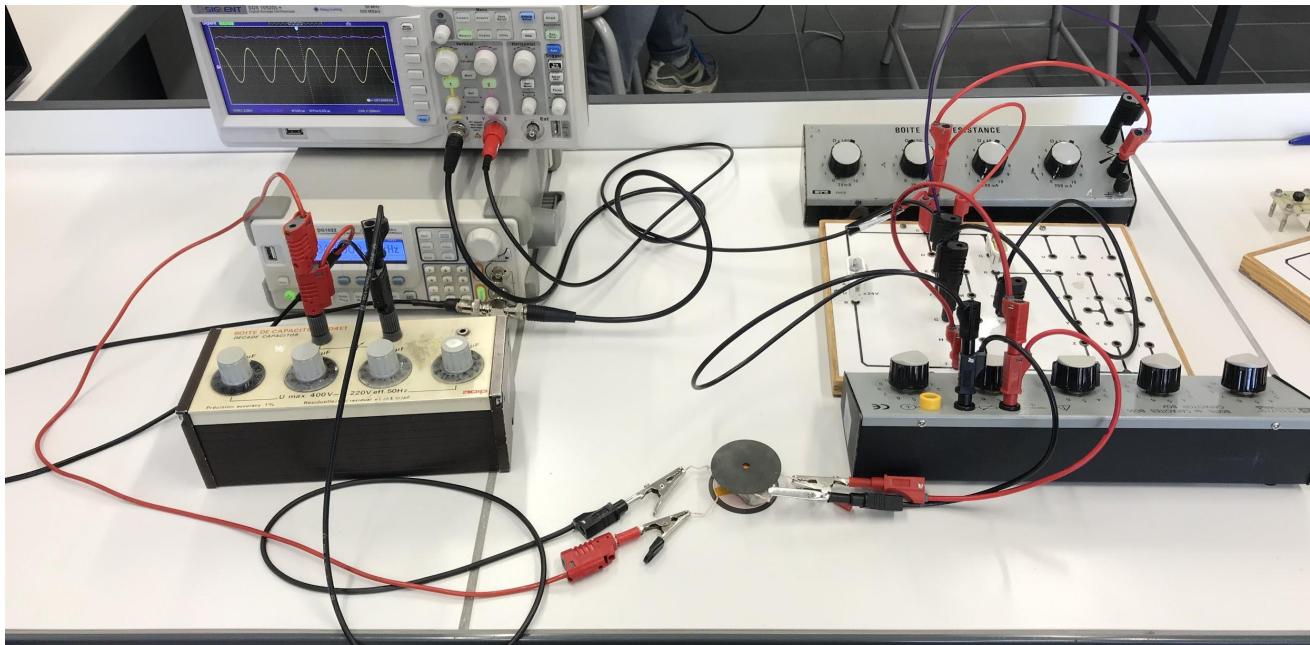


## RECHARGE EN MOUVEMENT

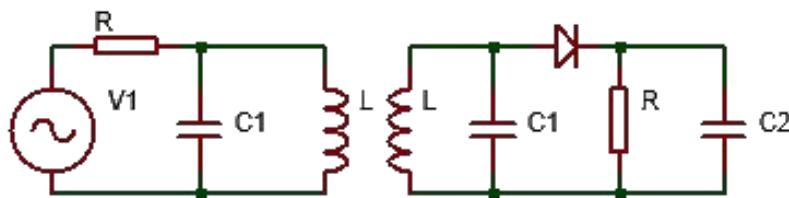


# Charge de la batterie

## OBTENTION D'UNE TENSION CONTINUE AU SECONDAIRE

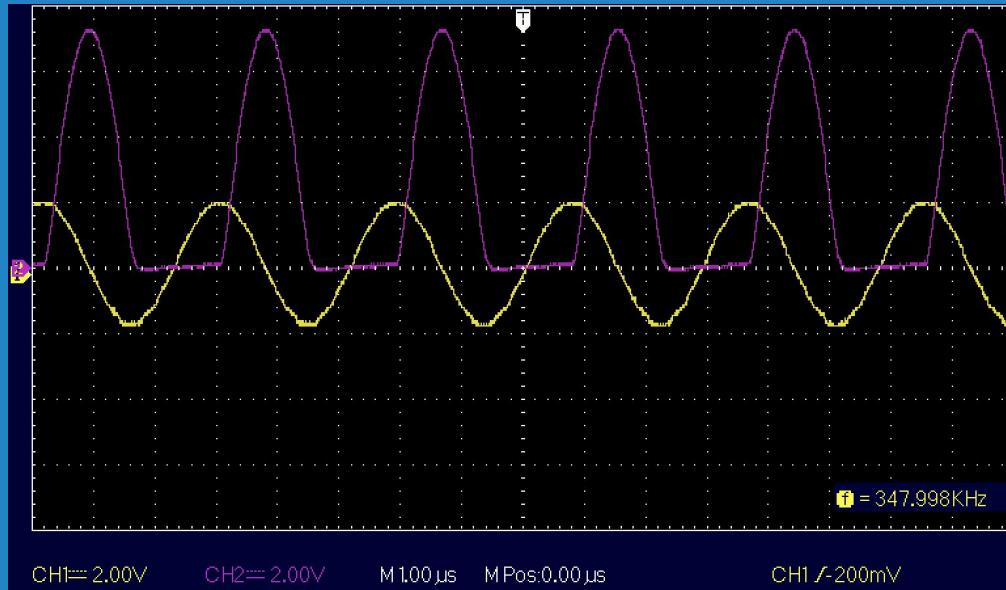


R	<b>variable</b>	C1	<b>40nF</b>
L	<b>7,1µH</b>	C2	<b>grand</b>
r	<b>50Ω</b>		

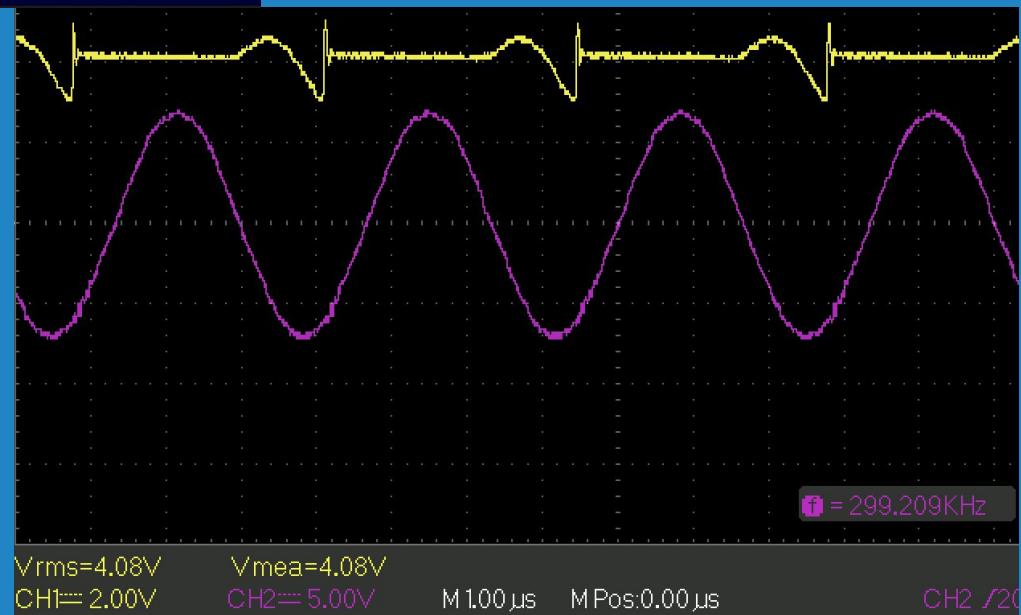


La valeur de C1 est posée de telle sorte que la fréquence de résonance du circuit soit de 300 kHz

# Charge de la batterie



Tension redressée par la diode rapide

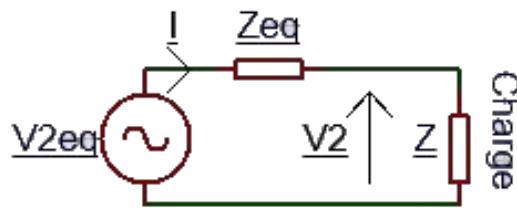


Tension pseudo-continue aux bornes de la charge

# Cas du véhicule à l'arrêt: adaptation d'impédance

## RECHERCHE D'OPTIMISATION DU RENDEMENT PAR ADAPTATION D'IMPÉDANCE

L'étude précédente donne à la résonance:



$$P_{max} = \frac{k^2 \cdot V_1^2}{4.R}$$

$$\underline{Z}_{eqmin} \approx \frac{L}{R.C}$$

$$w_0 = \frac{1}{\sqrt{L.(C + C_{adapt})}}$$

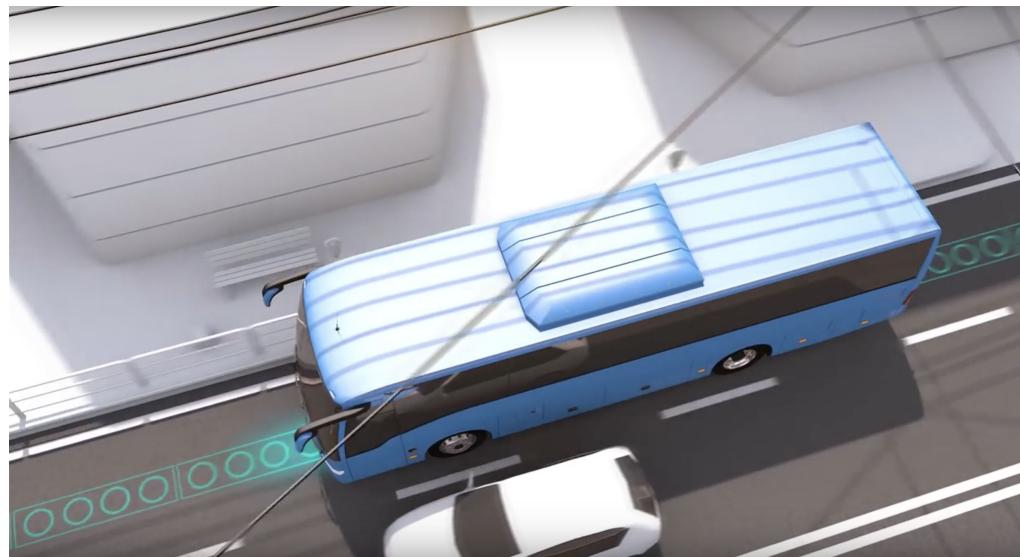
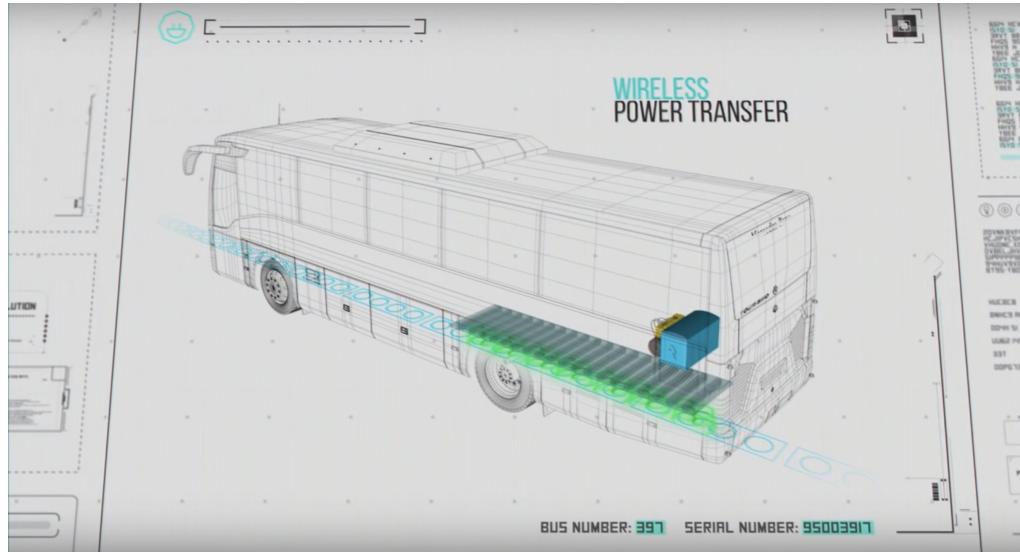
Adaptation d'impédance pour obtenir une puissance de sortie maximale:

$$\underline{Z} = \frac{L}{R.(C + C_{adapt})}$$

Pour avoir le meilleur rendement, il faut déterminer  $C_{adapt}$  tel que  $\underline{Z}_{eqmin}$  soit négligeable devant la valeur de la charge résistive

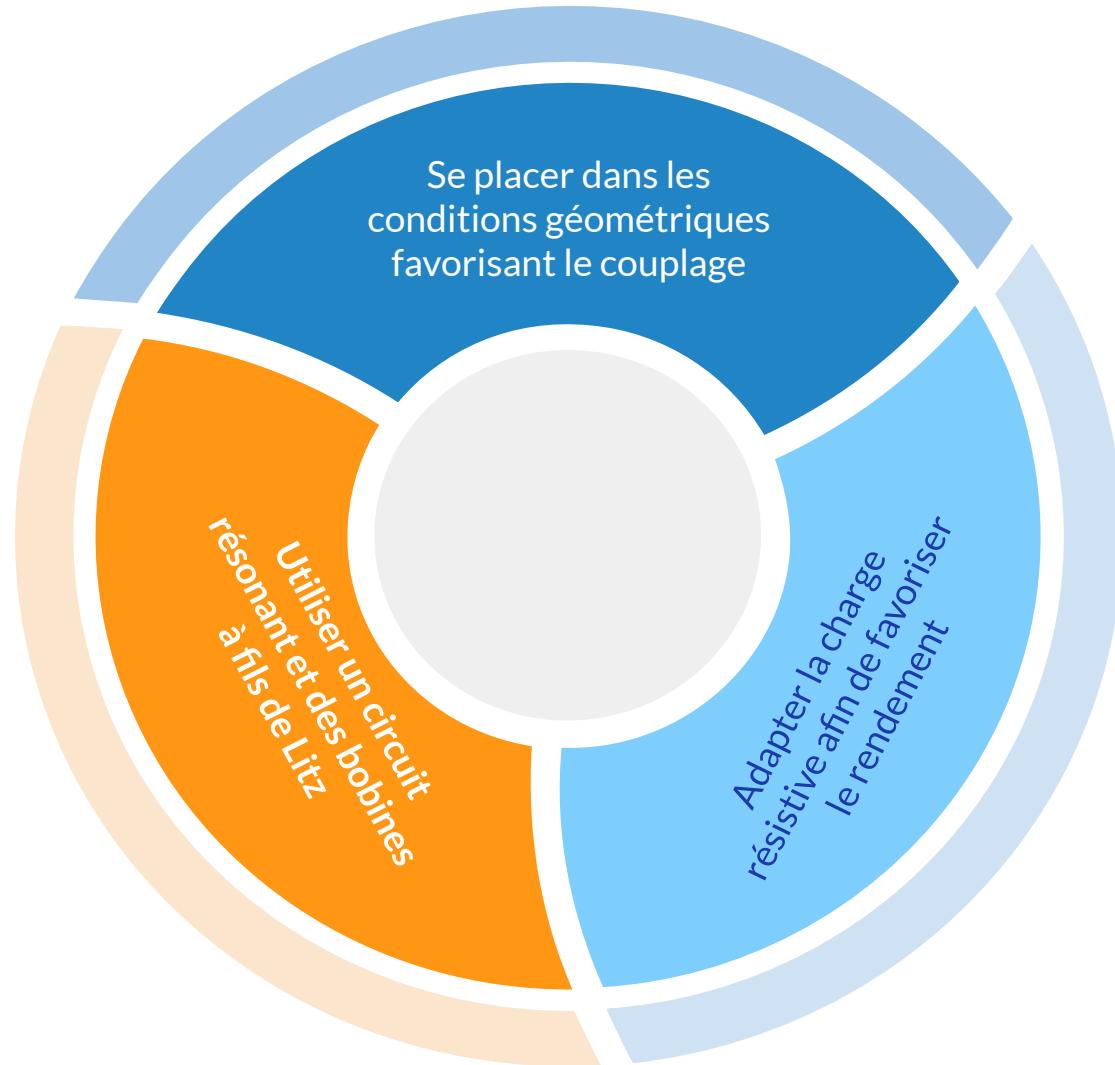
**On ne peut pas obtenir simultanément une puissance maximale et un rendement maximal pour une même valeur de charge**

# Recharge en mouvement



La complexité réside dans la nécessité de standardiser les bobines, cela demande aussi un coût élevé (quantité de cuivre importante)

# Bilan



# 4. ANNEXE

# Diagrammes Bode

## Bode des deux circuits expérimentaux

```
7 from matplotlib.pyplot import *
8 from numpy import *
9 from pylab import *
10
11
12 k1=4.2e-4
13 R1=3
14 L1=15e-3
15 C1=48e-12
16
17 k2=4.1e-4
18 R2=0.07
19 L2=7.1e-6
20 C2=37e-12
21
22
23 def H(w,k,L,R,C):
24     return (1j*k*L*w)/((R+1j*L*w)*(1-L*C*w**2+1j*R*C*w))
25
26 puissance_f=arange(3,8,0.001)
27
28 W=2*pi*10**puissance_f
29 F=10**puissance_f
30
31 phase1=angle(H(W,k1,L1,R1,C1), 'deg')
32 phase2=angle(H(W,k2,L2,R2,C2), 'deg')
33
34 module1=20*log(absolute(H(W,k1,L1,R1,C1)))
35 module2=20*log(absolute(H(W,k2,L2,R2,C2)))
36
37 subplot(211)
38 semilogx(F,module1, "orange")
39 semilogx(F,module2, "blue")
40 grid(True)
41
42 subplot(212)
43 semilogx(F,phase1, "orange")
44 semilogx(F,phase2, "blue")
45 grid(True)
46
47 show()
```

## Comparaison pour différents k

```
7 from matplotlib.pyplot import *
8 from numpy import *
9 from pylab import *
10
11
12 k1=0.01
13 R1=3
14 L1=15e-3
15 C1=48e-12
16
17 k2=1
18 k3=0.2
19
20
21
22 def H(w,k,L,R,C):
23     return (1j*k*L*w)/((R+1j*L*w)*(1-L*C*w**2+1j*R*C*w))
24
25 puissance_f=arange(3,8,0.001)
26
27 W=2*pi*10**puissance_f
28 F=10**puissance_f
29
30 phase1=angle(H(W,k1,L1,R1,C1), 'deg')
31 phase2=angle(H(W,k2,L1,R1,C1), 'deg')
32 phase3=angle(H(W,k3,L1,R1,C1), 'deg')
33
34 module1=20*log(absolute(H(W,k1,L1,R1,C1)))
35 module2=20*log(absolute(H(W,k2,L1,R1,C1)))
36 module3=20*log(absolute(H(W,k3,L1,R1,C1)))
37
38 subplot(211)
39 semilogx(F,module1, "green", label="k=0.01")
40 semilogx(F,module2, "blue", label="k=1")
41 semilogx(F,module3, "r", label="k=0.2")
42 grid(True)
43
44 subplot(212)
45 semilogx(F,phase1, "green", label="k=0.01")
46 semilogx(F,phase2, "blue", label="k=1")
47 semilogx(F,phase3, "r", label="k=0.2")
48
49
50 grid(True)
51
52 show()
```