Optimisation de la recharge d'un véhicule électrique en mouvement par induction sur une route adaptée

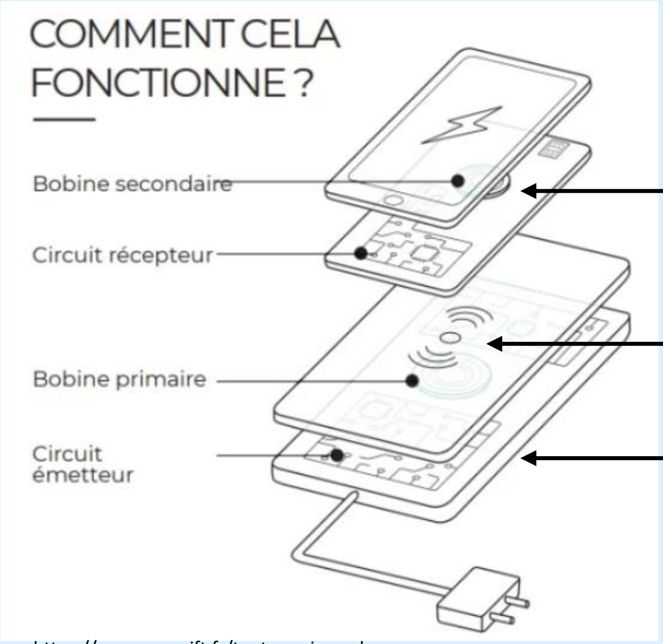
RIPERT Jérémy
12684

Sommaire

- Principe de la recharge par induction
- La modélisation
- L’inductance mutuelle M
- Le champ magnétique B
- Expériences
- Enjeux environnementaux et économiques
- Annexe

Principe de la recharge par induction

Existe depuis longtemps : brosse à dents électrique



https://www.creagift.fr/tout-savoir-sur-le-chargeur-a-induction-personnalise/

génère un courant dans la bobine secondaire

champ magnétique créé par le courant alternatif

génère un courant alternatif

Et sur la route ?

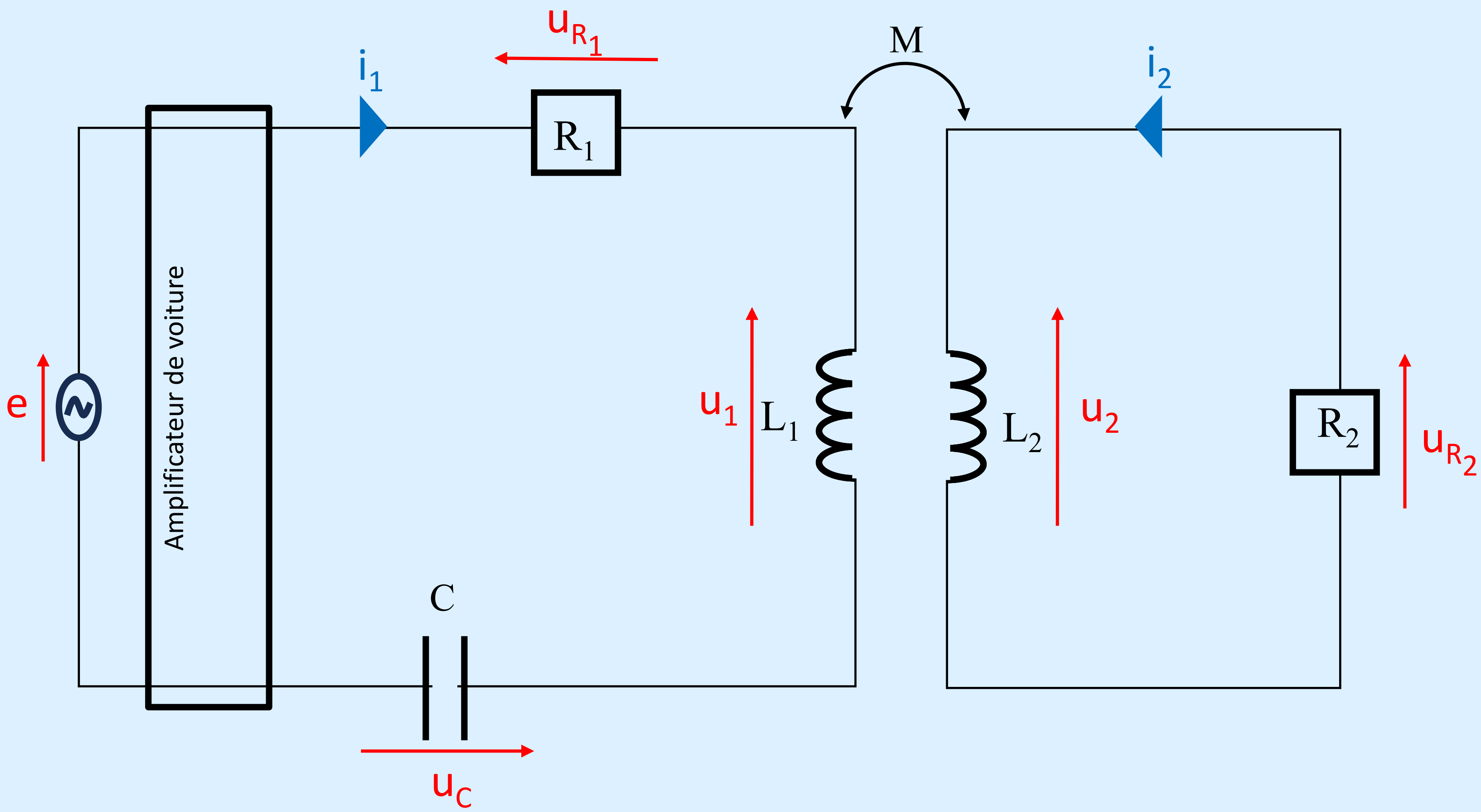
+ de véhicules électriques : grande évolution : 0,1% en 2010, 16,8% en 2023

+ de bornes de recharge

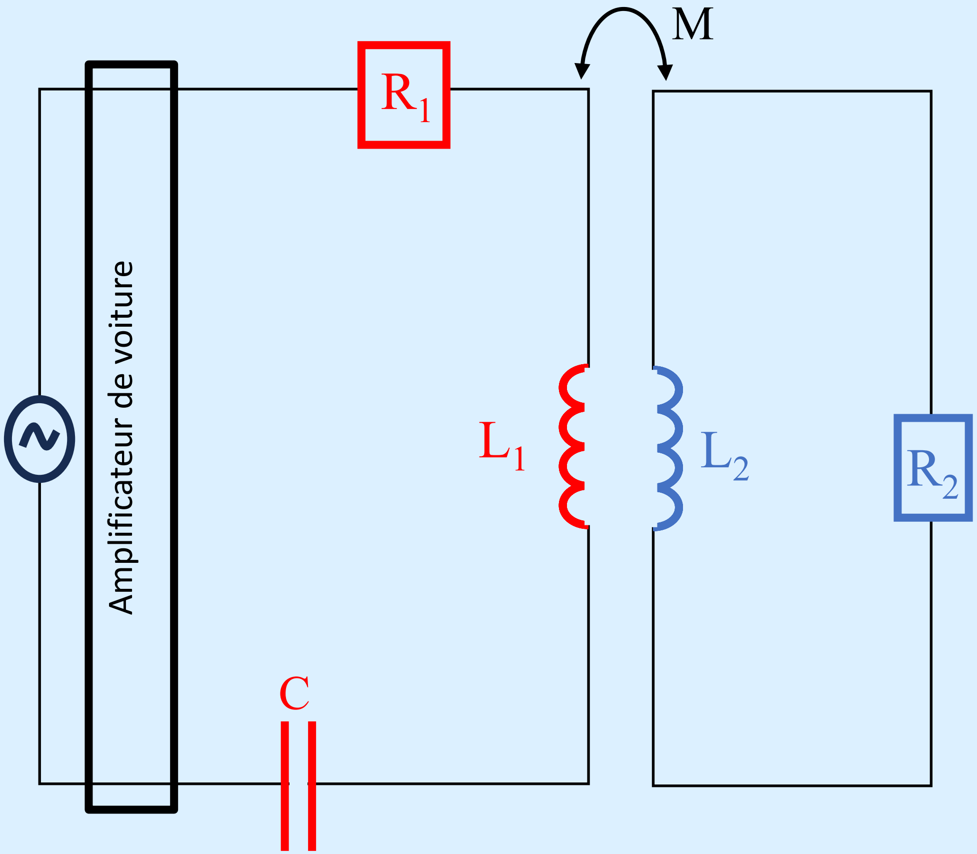
Arena del futuro :

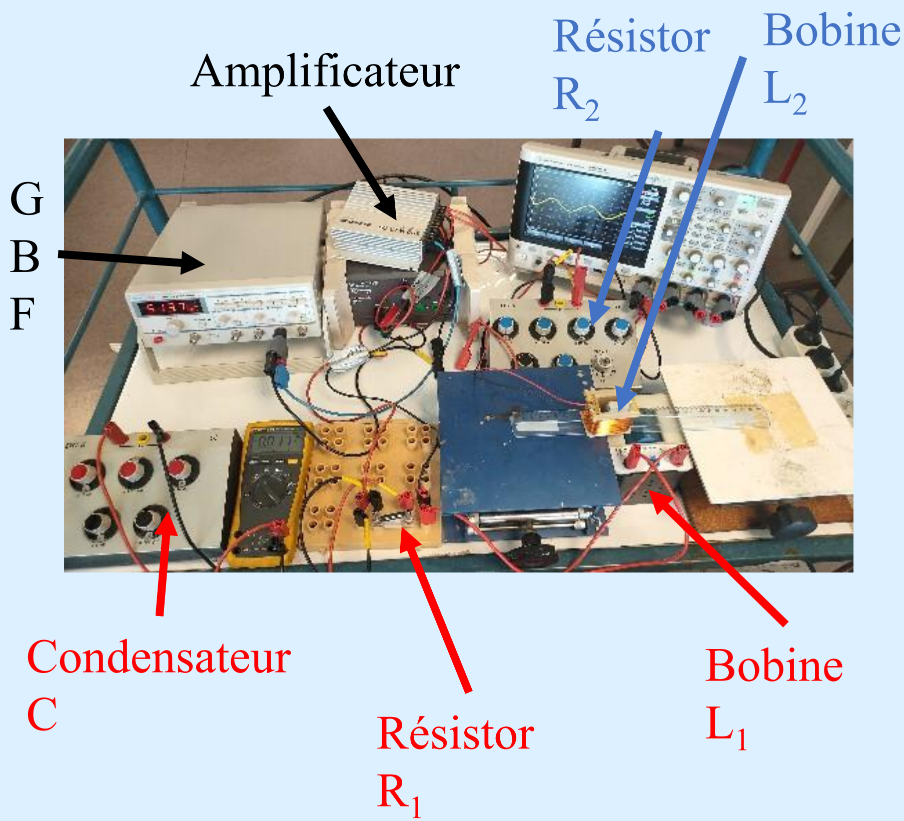
https://www.stellantis.com/fr/actualite/communiques-de-presse/2022/juin/le-circuit-arena-del-futuro-demontre-le-potentiel-de-la-recharge-par-induction-dynamique-pour-les-vehicules-electriques

Le circuit expérimental

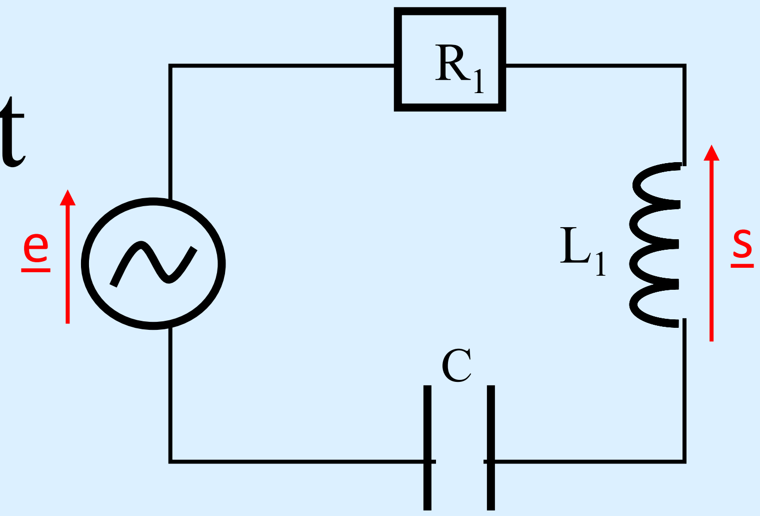


Le montage


M
R_1
Amplificateur de voiture
L_1
L_2
R_2
C


Amplificateur
Résistor R_2
Bobine L_2
GBF
Condensateur C
Résistor R_1
Bobine L_1

Fonction de transfert



$$\underline{H} = \frac{\underline{s}}{\underline{e}} = \frac{\underline{Z_{L_1}}}{\underline{Z_{L_1}} + \underline{Z_C} + \underline{Z_{R_1}}} = \frac{jL_1\omega}{jL_1\omega + \frac{1}{jC\omega} + R_1}$$

$$f_r = f_0\sqrt{\frac{2Q^2}{2Q^2 - 1}}$$

$$f_r = 969Hz$$

Les équations couplées

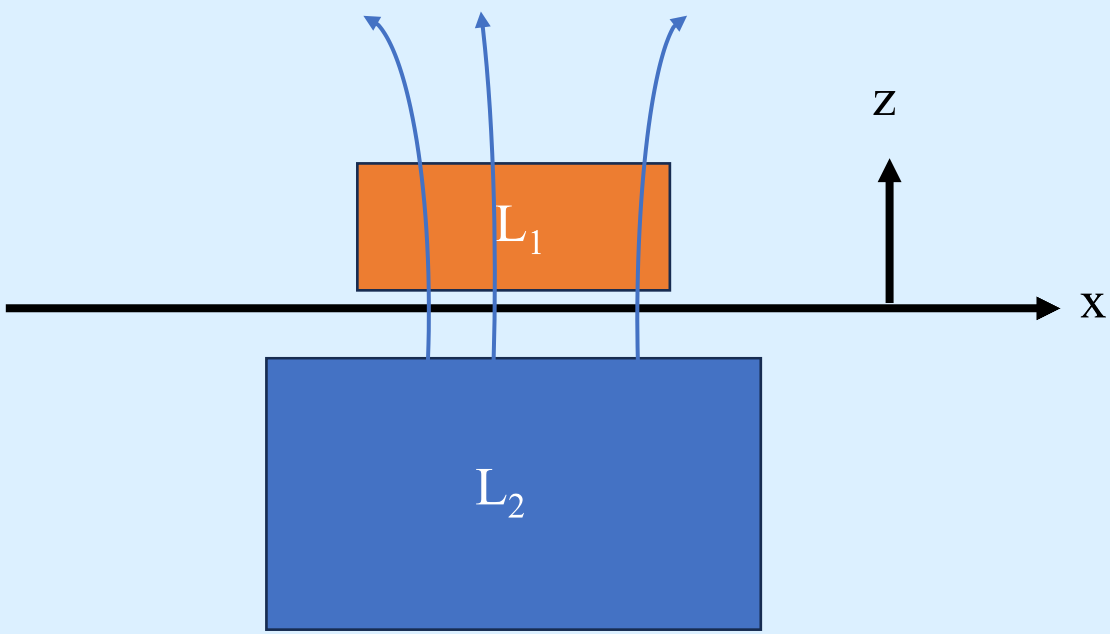
$$\begin{cases} u_1 = L_1 \dfrac{di_1}{dt} + M(x,y,z) \dfrac{di_2}{dt} \\ \\ u_2 = L_2 \dfrac{di_2}{dt} + M(x,y,z) \dfrac{di_1}{dt} \end{cases}$$

$$\Longrightarrow \begin{cases} \underline{i_1} = \dfrac{j\omega \underline{e}}{\frac{1}{C} + jR_1\omega - \omega^2 L_1 + \dfrac{jM(x,y,z)^2\omega^3}{R_2 + jL_2\omega}} \\ \\ \underline{i_2} = \dfrac{-jM(x,y,z)\omega}{R_2 + jL_2\omega} \underline{i_1} \end{cases}$$

L'inductance mutuelle

$$\text{définition de M} : \Phi_{1\rightarrow 2} = M(x)i_1 = N_{spires}\phi_{1\rightarrow 2}$$

$$\text{avec } \phi_{1\rightarrow 2} = \int\int_{(S(x))} \vec{B}.d\vec{S} = \int\int_{(S(x))} B_z(x)dS$$



Calcul de B

la loi de Biot et Savart : $\vec{B}(M) = \frac{\mu_0}{4\pi} \iiint_{(V)} \frac{\vec{j}dV \wedge \vec{u}_{PM}}{PM^2} = \frac{\mu_0}{4\pi} \int_{R_{min}}^{R_{max}} \int_{\frac{-h}{2}}^{\frac{h}{2}} \int_{(C)} \frac{\vec{j}dV \wedge \vec{u}_{PM}}{PM^2}$

Trop difficile a calculé

En discrétisant : $\vec{B}(M) = \frac{\mu_0}{4\pi} \sum_{r=R_{min}}^{R_{max}} \sum_{x=\frac{-h}{2}}^{\frac{h}{2}} \sum_{P\in(C)} \frac{\vec{j}dV \wedge \vec{u}_{PM}}{PM^2}$

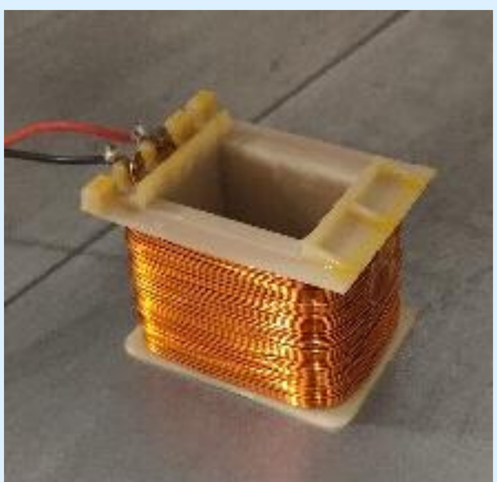
Calcul avec python

Calcul du nombre de spire de la bobine 2

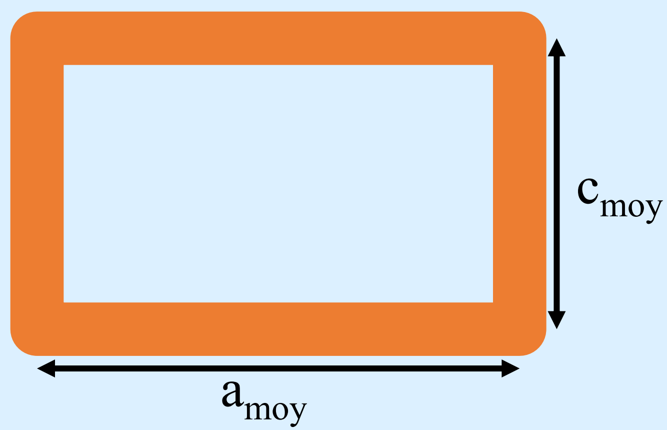
Calcul de la résistance d'un fil de cuivre sur une longueur connue

Calcul de la résistance de la bobine 2 d'où la longueur du bobinage : l = 51,5 m

D'où vient $$N_{spires} = \frac{L}{2(a_{moy} + c_{moy})}$$

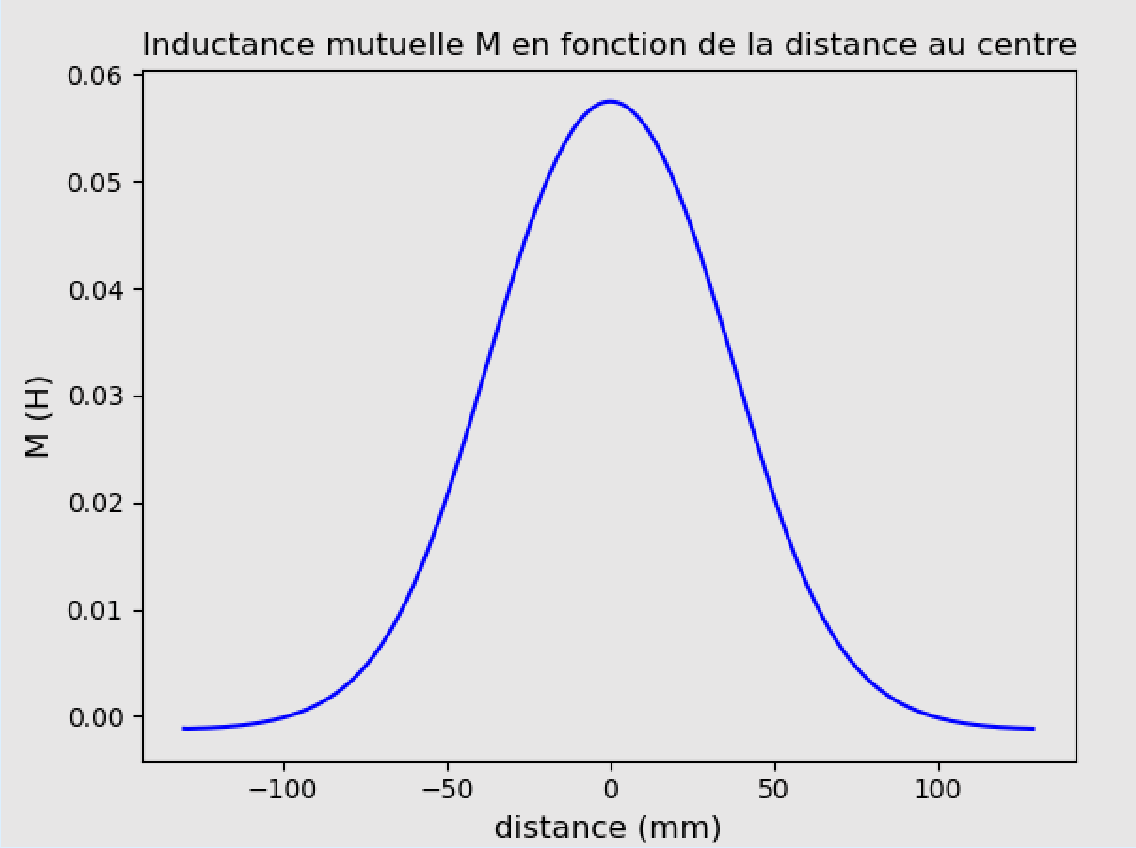


Donc le nombre de spires est 388



Retour sur M

Discrétisation : $$M(x) = N_{spires} \sum_{x-\frac{a_{moy}}{2}}^{x+\frac{a_{moy}}{2}} \sum_{\frac{-c_{moy}}{2}}^{\frac{c_{moy}}{2}} B_z dS$$



Comparaison

On regarde le maximum de $M(x)$: $M_{max} = 0.057$

Vérification de la relation : $M \leqslant \sqrt{L_1 L_2}$

avec $\sqrt{L_1 L_2} = 0.041$

Relation fausse mais simplification sur calcul de M pouvant l'expliquer

Fréquence de résonnance réelle

$$\frac{\underline{i_2}}{\underline{e}} = \frac{M(x)\omega^2}{\frac{R_2}{C} + j\frac{L_2}{C}\omega + jR_1R_2\omega - L_2R_1\omega^2 - L_1R_2\omega^2 - jL_1L_2\omega^3 + jM(x)^2\omega^3}$$

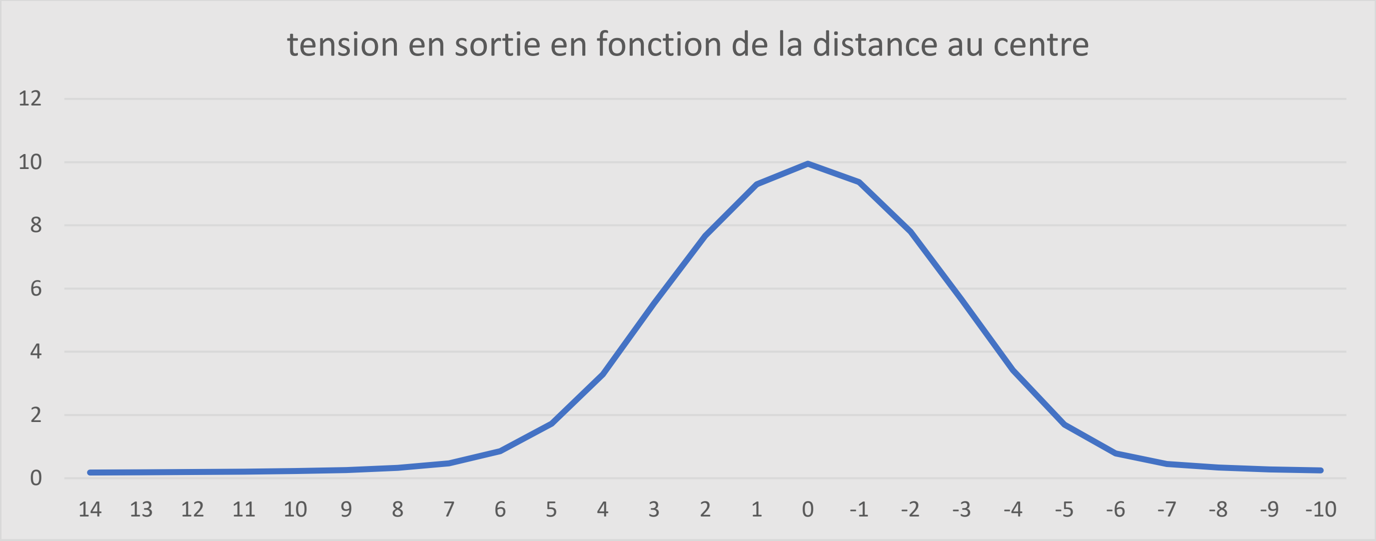
$$\left|\frac{\underline{i_2}}{\underline{e}}\right| = \frac{M(x)\omega^2}{\sqrt{(\frac{R_2}{C} - L_2R_1\omega^2 - L_1R_2\omega^2)^2 + (\frac{L_2}{C}\omega + R_1R_2\omega - L_1L_2\omega^3 + M(x)^2\omega^3)^2}}$$

De maximum : $\omega = 6175$ rad.s^{-1}

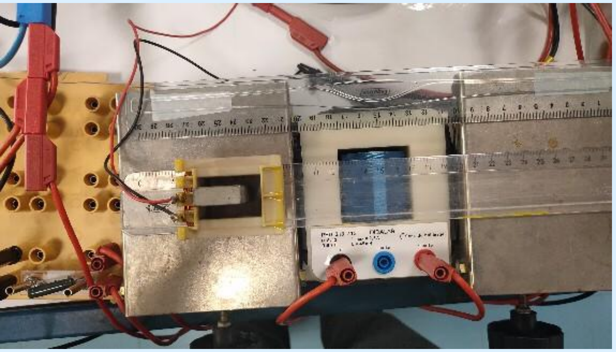
donc $f_r = 983$ Hz

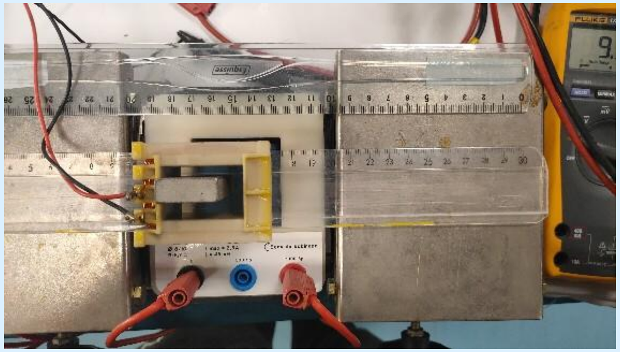
Du même ordre de grandeur que celle du circuit 1

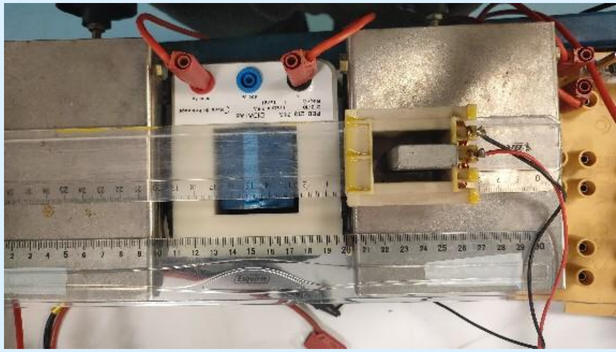
Expériences



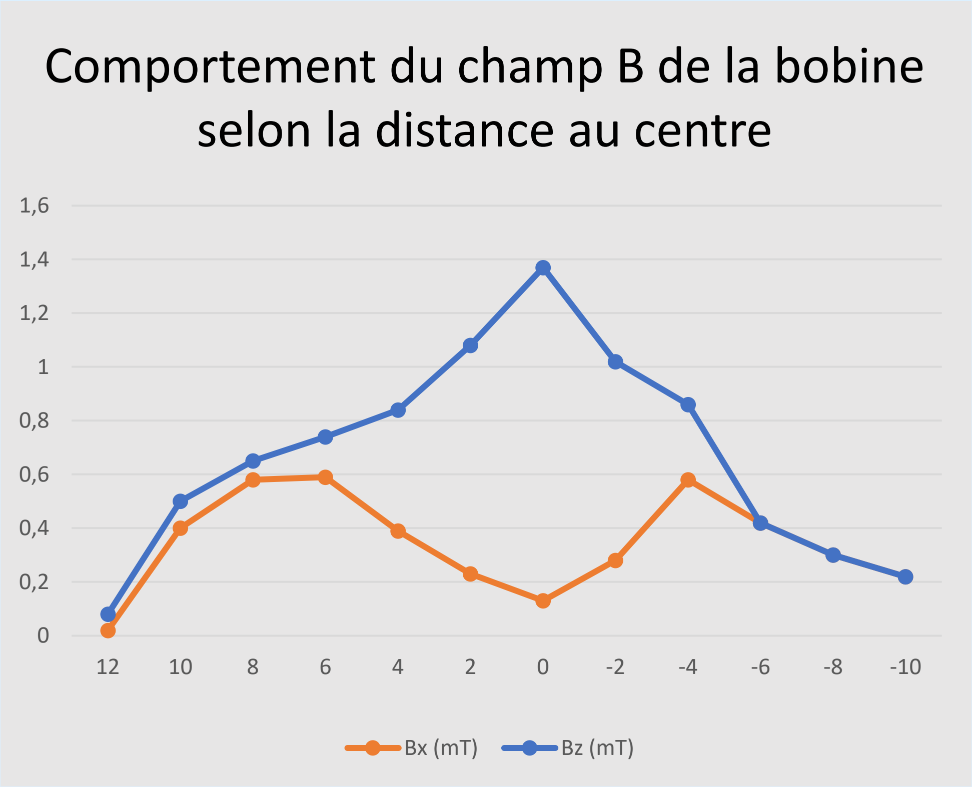
Max : d = 0 cm càd au-dessus de la bobine 1

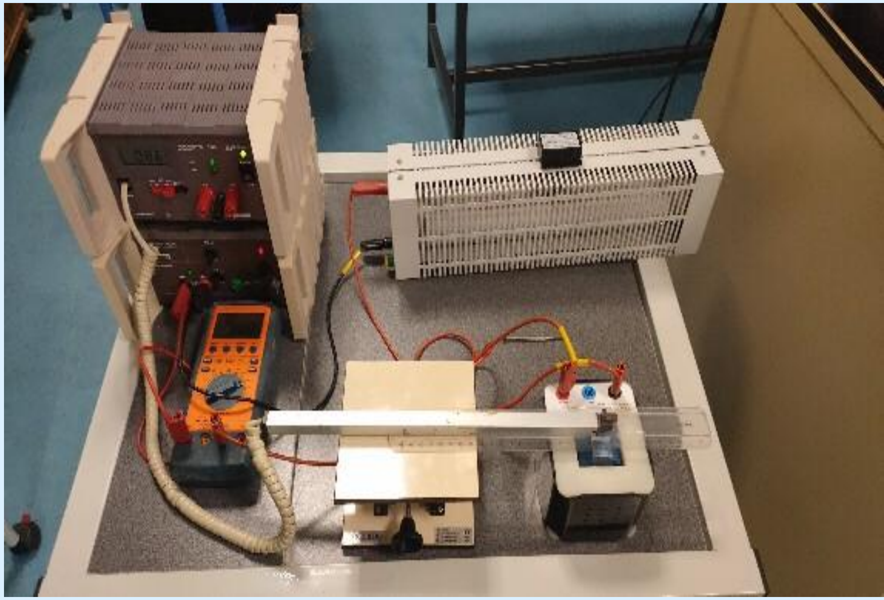




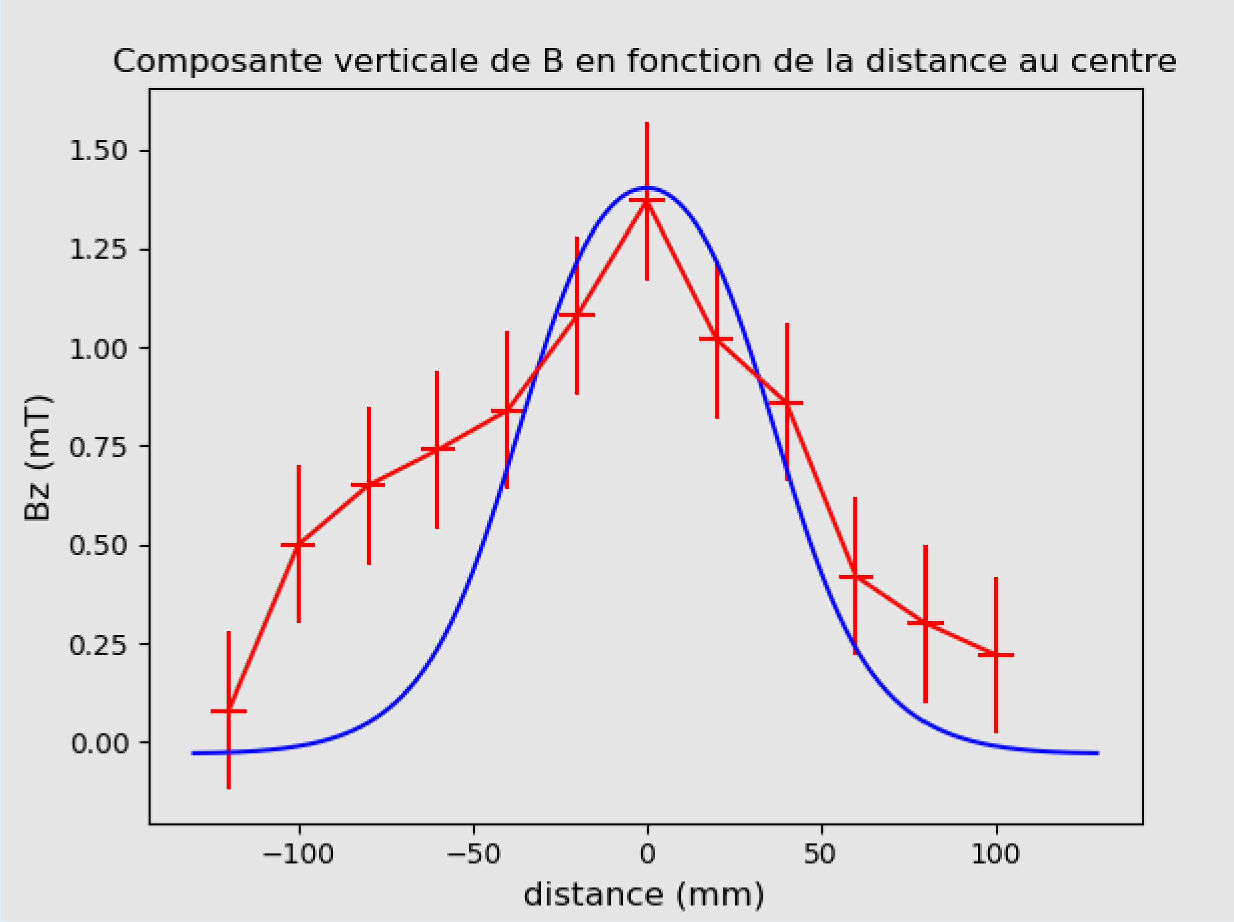


Le champ magnétique B



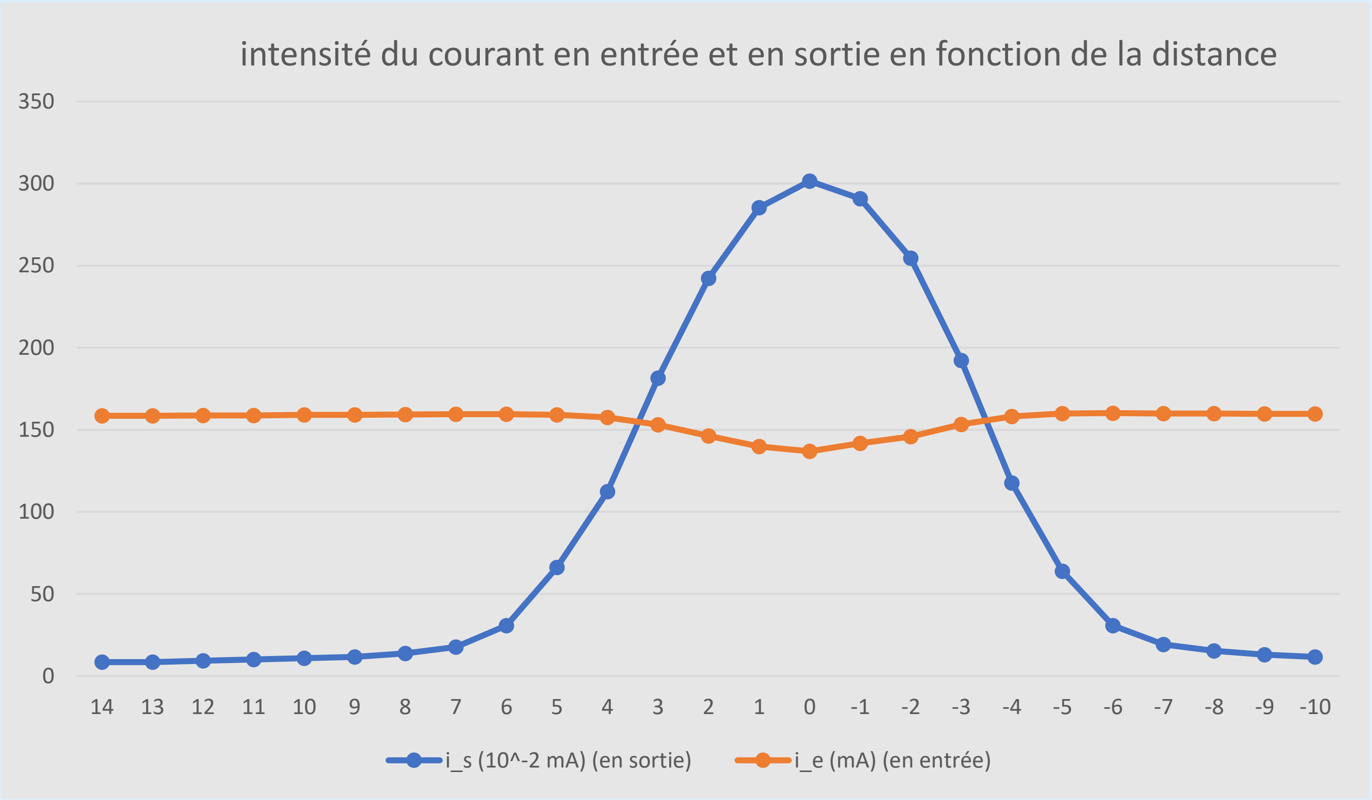


Comparaison avec la théorie

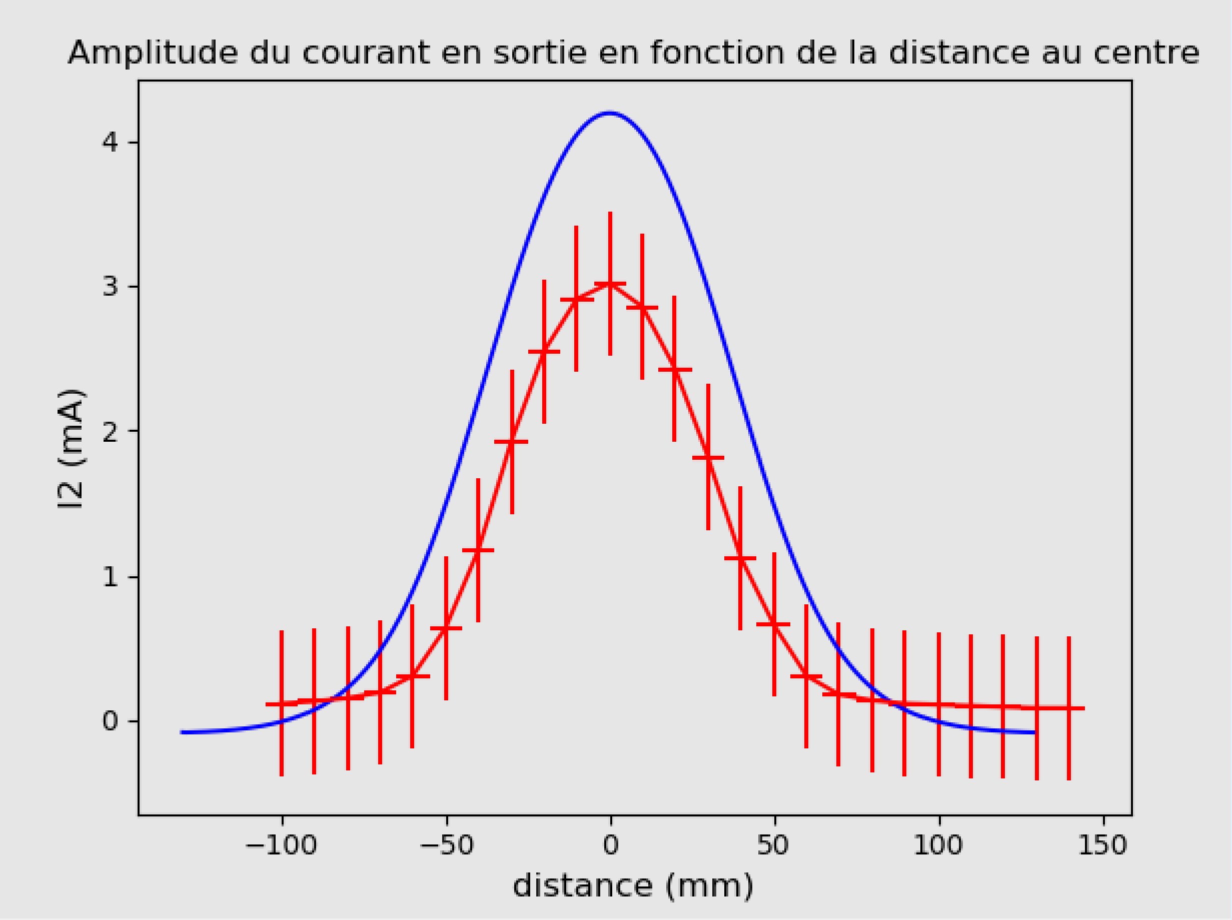


__ Bz en pratique   __ Bz en théorie

Expériences

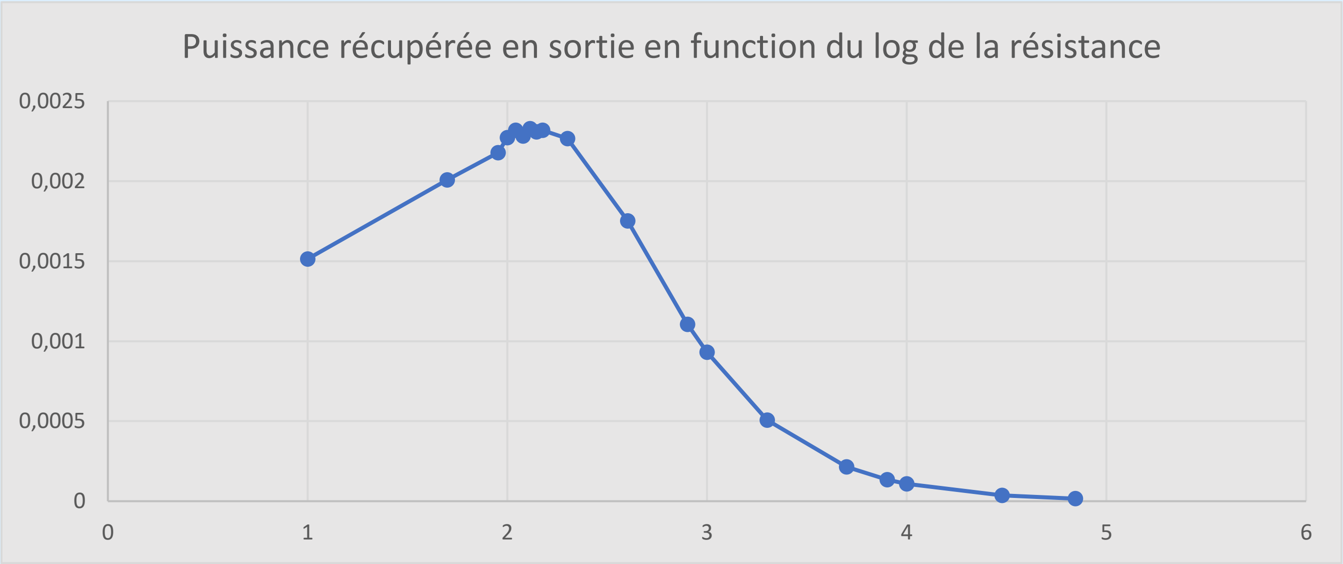


Comparaison avec la théorie



__ i2 en pratique __ i2 en théorie

Expériences



Max : $R_2 = 130\ \Omega$

Puissance récupérée

$$\mathcal{P}_{récup} = \int_{(\mathcal{R})} -u_{R_2} i_2(x) dx = \int_{-10}^{14} R_2 i_2^2(x) dx$$

avec $(\mathcal{R})$ le tronçon de route

$$\text{Discrétisation : } \mathcal{P}_{récup} = \sum_{x=-10}^{14} R_2 i_2^2(x) dx$$

$$\mathcal{P}_{récup,pratique} = 6,4 \times 10^{-5} \mathrm{W}$$

Rendement

$$\eta = \frac{\mathcal{P}_{récup}}{\mathcal{P}_{utilisée}} \text{ avec } \mathcal{P}_{utilisée} = 1,6 \times 10^{-4}\mathrm{W}$$

$$\eta = 0.41$$

Faible récupération d’énergie

Comparer avec la réalité

Le modèle fonctionne pour des petites bobines

En réalité, bobine bien plus grande → inductance plus élevée

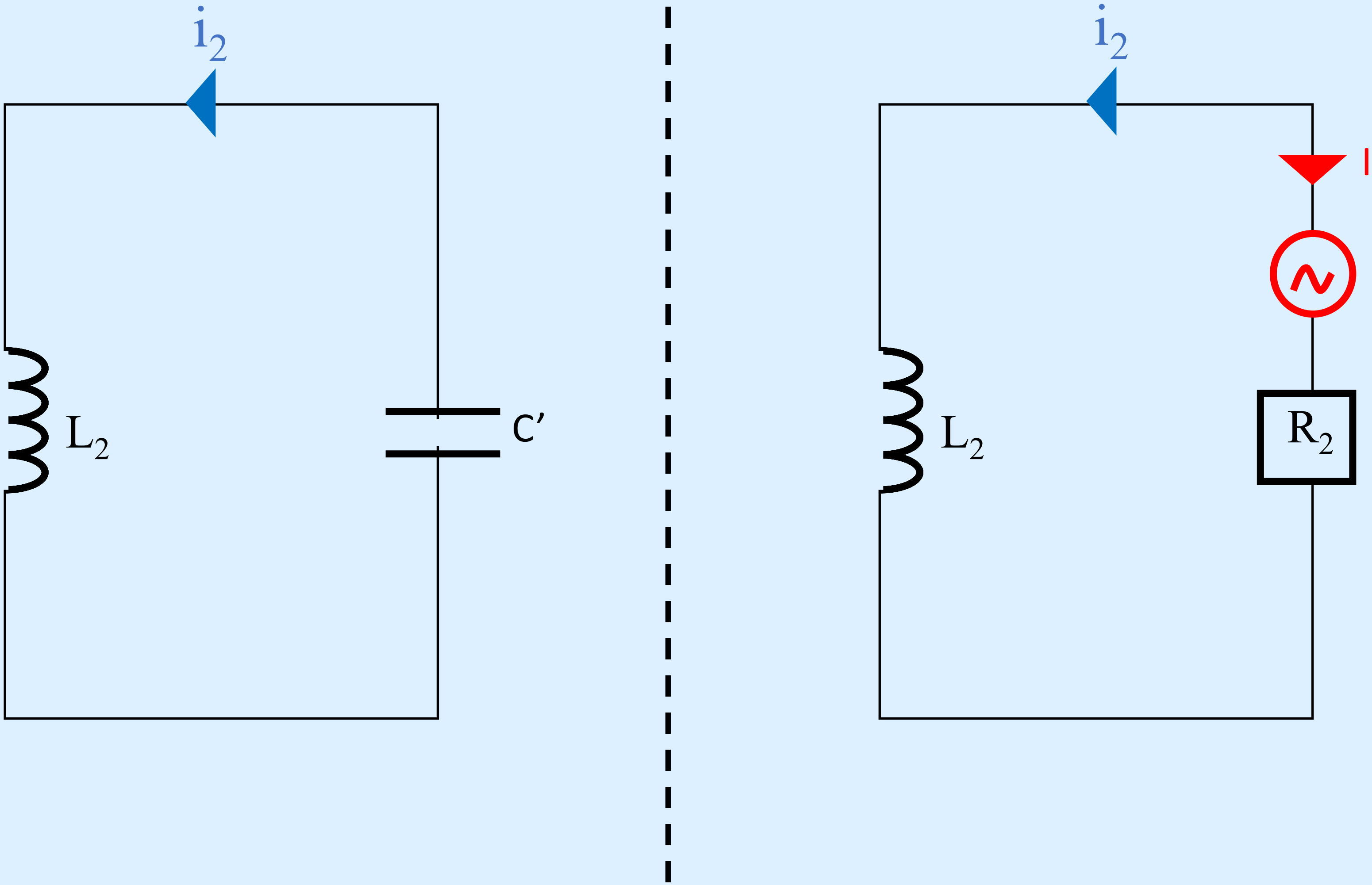
Puissance récupérée dépassant le 10 kW

Des rendements supérieurs à 90%

Karim Kadem. Modélisation et optimisation d'un coupleur magnétique pour la recharge par induction dynamique des véhicules électriques. Electromagnétisme. Université Paris-Saclay, 2020. Français. NNT : 2020UPAST032. tel-03253967

Francois Forest, Philippe Enrici, Thierry Martire, Eric Biagini, Achraf Hammoud, et al.. Conception d'un système de charge par induction de 22kW avec avec un fort espacement inducteur/induit. Symposium de Génie Electrique, Université de Lorraine [UL], Jul 2018, Nancy, France. hal-02981831

Pour d'autres utilités



Coups pour l’environnement

Important pour les hommes, animaux et plantes

Effets sur le foie et les voies respiratoires importants

Risques à haute concentration

Propagation dans l’eau

https://www.canada.ca/fr/sante-canada/services/substances-chimiques/fiches-renseignements/en-bref/cuivre-composes.html#a3

Coups de construction

En 2025, entre 8€/kg et 10€/kg

L’entreprise Nissan en 2023 , bobine de taille 1,6x0,3 m

Prix d’un km de route : 2 à 20 millions

Karim Kadem. Modélisation et optimisation d’un coupleur magnétique pour la recharge par induction dynamique des véhicules électriques. Electromagnétisme. Université Paris-Saclay, 2020. Français. NNT : 2020UPAST032. tel-03253967

https://www.asphalte-evolution.fr/location-revetements-routiers_construction-routiere_informations-sur-la-construction-routiere_combien-coute-la-construction-dune-route.phtml

Conclusion

Faire des tests en condition réelle : sur une vraie route

Étude du système avec plusieurs bobines

Merci pour votre écoute

Annexe

Équations couplées

$$\begin{cases} u_1 = L_1 \dfrac{di_1}{dt} + M(x,y,z)\dfrac{di_2}{dt} \\ \\ u_2 = L_2 \dfrac{di_2}{dt} + M(x,y,z)\dfrac{di_1}{dt} \end{cases}$$

$$\Longrightarrow \begin{cases} u_1 = e - u_C - u_{R_1} \\ u_2 = u_{R_2} = -R_2 i_2 \end{cases}$$

$$\Longrightarrow \begin{cases} \dfrac{de}{dt} - \dfrac{i_1}{C} - R_1\dfrac{di_1}{dt} = L_1\dfrac{d^2 i_1}{dt^2} + M(x)\dfrac{d^2 i_2}{dt^2} \\ \\ -R_2 i_2 = L_2\dfrac{di_2}{dt} + M(x)\dfrac{di_1}{dt} \end{cases}$$

$$e(t) = acos(\omega t) \Longrightarrow \underline{e}(t) = ae^{j\omega t}$$

$$\underline{i_1} = \underline{I_{01}}e^{j\omega t} \text{ avec } \underline{I_{01}} = I_{01}e^{j\phi_1}$$
$$\underline{i_2} = \underline{I_{02}}e^{j\omega t} \text{ avec } \underline{I_{02}} = I_{02}e^{j\phi_2}$$

$$\begin{cases} jw\underline{e} - \dfrac{\underline{i_1}}{C} - jR_1\omega\underline{i_1} = -\omega^2 L_1\underline{i_1} - \omega^2 M(x)\underline{i_2} \\ -R_2 i_2 = jL_2\omega\underline{i_2} + jM(x)\underline{i_1} \end{cases}$$

$$\Longrightarrow \begin{cases} \underline{i_1} = \dfrac{j\omega\underline{e}}{\frac{1}{C} + jR_1\omega - \omega^2 L_1 + \dfrac{jM(x,y,z)^2\omega^3}{R_2 + jL_2\omega}} \\ \\ \underline{i_2} = \dfrac{-jM(x,y,z)\omega}{R_2 + jL_2\omega}\underline{i_1} \end{cases}$$

$$\frac{\underline{i_2}}{\underline{e}} = \frac{M(x)\omega^2}{\frac{R_2}{C} + j\frac{L_2}{C}\omega + jR_1R_2\omega - L_2R_1\omega^2 - L_1R_2\omega^2 - jL_1L_2\omega^3 + jM(x)^2\omega^3}$$

$$\left|\frac{\underline{i_2}}{\underline{e}}\right| = \frac{M(x)\omega^2}{\sqrt{(\frac{R_2}{C} - L_2R_1\omega^2 - L_1R_2\omega^2)^2 + (\frac{L_2}{C}\omega + R_1R_2\omega - L_1L_2\omega^3 + M(x)^2\omega^3)^2}}$$

Annexe

Détermination de C

$$\underline{H} = \frac{\underline{s}}{\underline{e}} = \frac{\underline{Z_{L_1}}}{\underline{Z_{L_1}} + \underline{Z_C} + \underline{Z_{R_1}}} = \frac{jL_1\omega}{jL_1\omega + \frac{1}{jC\omega} + R_1}$$

d'où $\underline{H} = \dfrac{1}{1 - j\dfrac{R_1}{L_1\omega} - \dfrac{1}{L_1C\omega^2}}$

On pose $\omega_0 = \dfrac{1}{\sqrt{L_1C}}$, $Q = \dfrac{1}{R_1}\sqrt{\dfrac{L_1}{C}}$ et $x = \dfrac{\omega}{\omega_0}$

donc $\underline{H} = \dfrac{1}{1 - j\frac{1}{Qx} - j\frac{1}{x^2}} = \dfrac{1}{1 - \frac{1}{x^2} - j\frac{1}{Qx}}$

$$G = |\underline{H}| = \frac{1}{\sqrt{1 + (\frac{1}{Qx} + \frac{1}{x^2})^2}} = \frac{1}{\sqrt{(1 - \frac{1}{x^2})^2 + \frac{1}{(Qx)^2}}}$$

$G(f_r) = G(\omega_r) = G_{max}$ donc $f : x \longmapsto (1 - \frac{1}{x^2})^2 + \frac{1}{(Qx)^2}$ doit atteindre un minimum avec

$f'(x) = 2\dfrac{2}{x^3}(1 - \dfrac{1}{x^2}) - \dfrac{2}{Q^2x^3}$

On cherche donc $f'(x) = 0$ c'est-à-dire $2 - \dfrac{2}{x^2} - \dfrac{1}{Q^2} = 0 \implies x^2(2 - \dfrac{1}{Q^2}) - 2 = 0$

d'où $x = \sqrt{\dfrac{2Q^2}{2Q^2 - 1}}$ d'où $f_r = f_0\sqrt{\dfrac{2Q^2}{2Q^2 - 1}}$

AN : $f_r = 969Hz$

Annexe

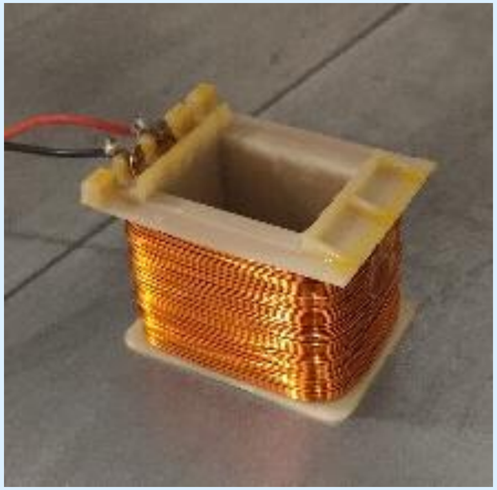
Calcul de N_{spires}

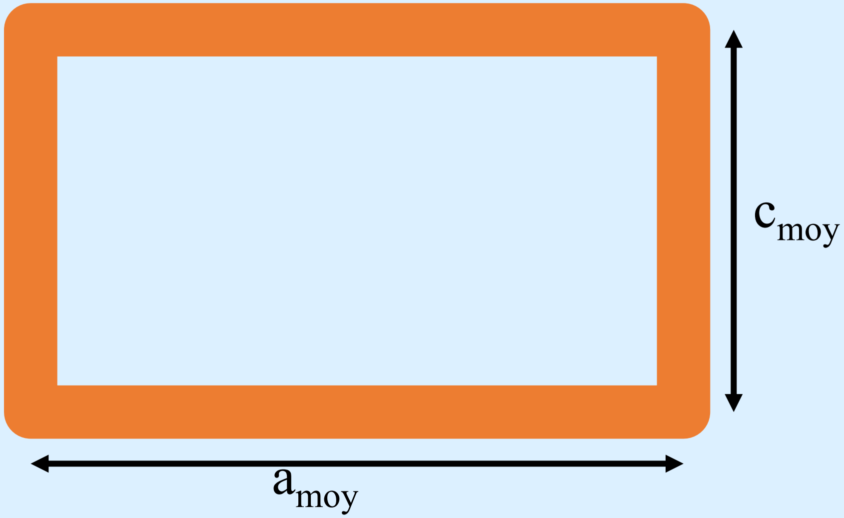
e épaisseur du fil de cuivre et L longueur du bobinage

$$L = \sum_{i=0}^{N} 4(a_0 + 2ie)(c_0 + 2ie)(\frac{b_0 + 2ie}{e})$$

En simplifiant : $N = \dfrac{eL}{2b_{moy}(a_{moy} + c_{moy})}$

$$N_{spires} = N\frac{b_{moy}}{e} = \frac{L}{2(a_{moy} + c_{moy})}$$

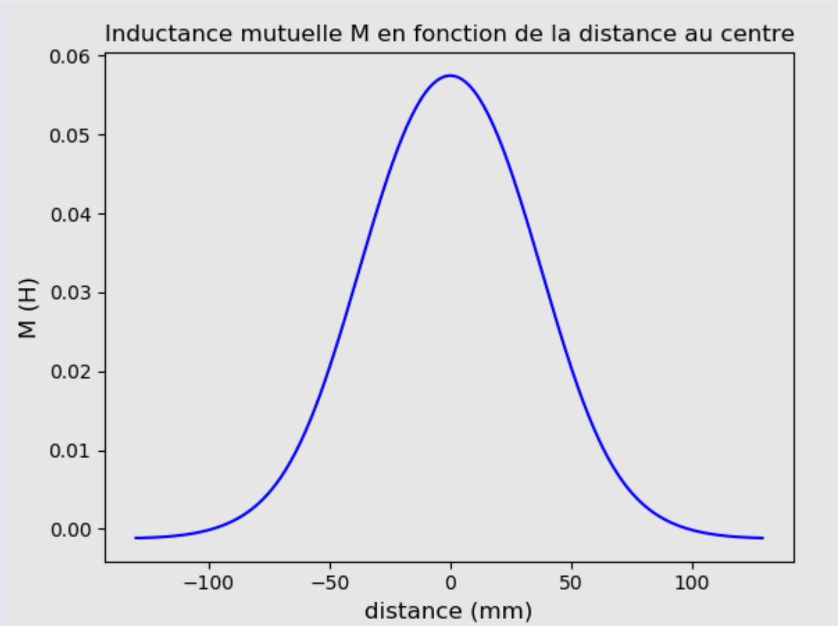




Annexe

Inductance mutuelle M

```
def M_x (x, B) :
    '''calcul de M(x)'''
    c = int(cmoy/2)
    a = int(amoy/2)
    phi = 0
    for z in range (mid-c, mid+c+1) :
        for y1 in range (y-a, y+a+1) :
            phi += B[mid-h+15][y1][mid][0]*10**(-6)
    return N*phi/i1
```



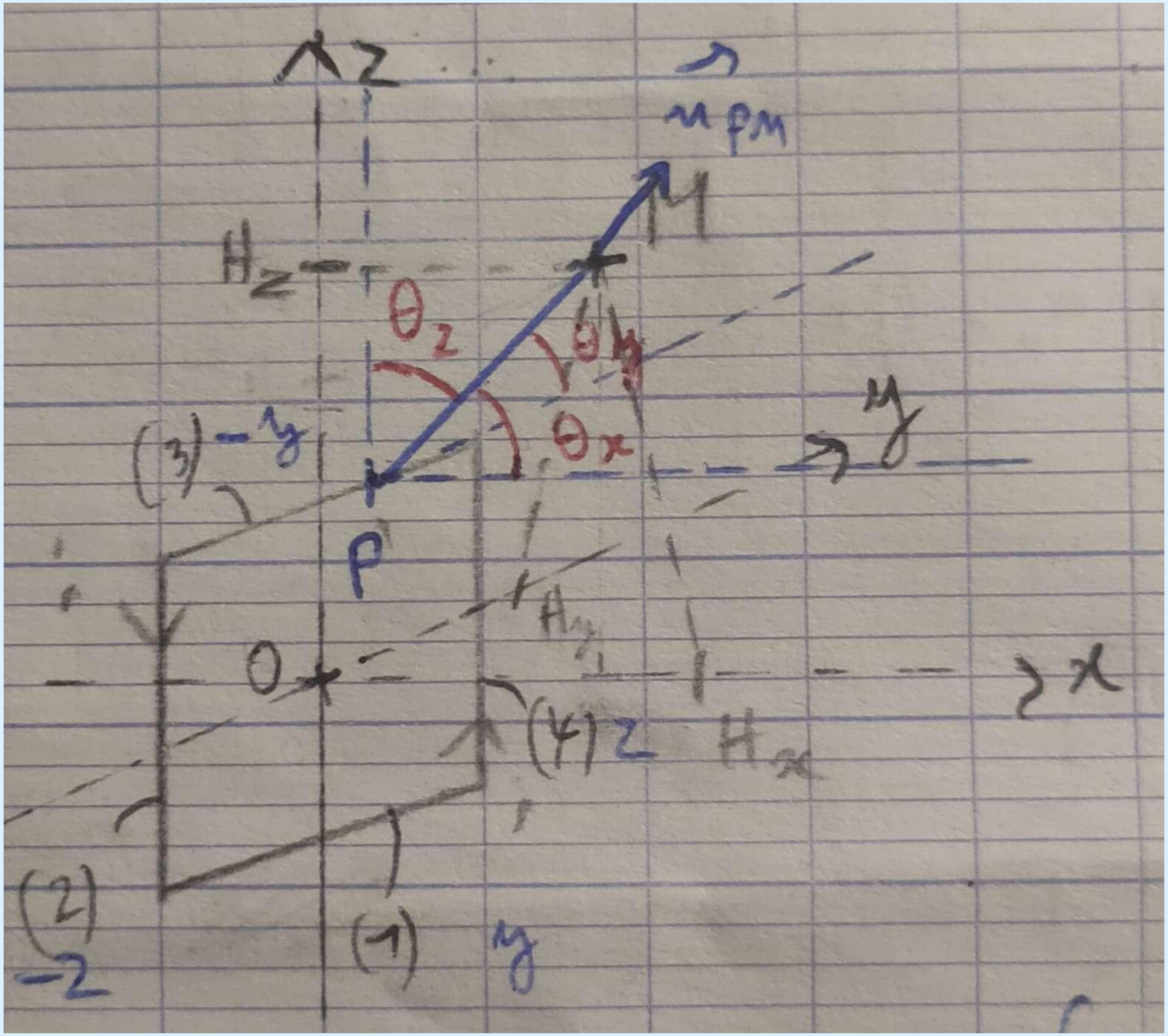

```
fig = plt.figure()
fig.patch.set_facecolor('#E7E6E6')
ax = fig.add_subplot(111)
ax.patch.set_facecolor('#E7E6E6')

plt.xlabel("distance (mm)", fontsize=12)
plt.ylabel('M (H)', fontsize=12)
plt.title('Inductance mutuelle M en fonction de la distance au centre', fontsize=12)

plt.plot(dist,M,'b')
plt.show()
```

Annexe

Schéma champ B



Annexe

Calcul théorique de B

```
def B_M(espace,x,y,z) :
    '''calcul le champ B en M selon les composantes x, y et z'''
    B = [0,0,0]
    nj = norme_j(i,e)
    if espace[x][y][z] == 3 :
        return B
    else :
        h_dem = int(h/2)
        for xp in range(-h_dem,h_dem+1) :
            for yp in range(-Rmax,Rmax+1) :
                for zp in range(-Rmax,Rmax+1) :
                    if abs(yp) < abs(zp) : r = abs(zp)
                    else : r = abs(yp)

                    dsj = ds_j(espace,mid+xp,mid+yp,mid+zp,r)
                    pm = distance(x,y,z,xp+mid,yp+mid,zp+mid)
                    if dsj == "-z" :
                        B = [B[0] + 1e-3*nj*(y-(mid+yp))/(pm**3), B[1] - 1e-3*nj*(x-(mid+xp))/(pm**3), B[2]]
                    elif dsj == "z" :
                        B = [B[0] - 1e-3*nj*(y-(mid+yp))/(pm**3), B[1] + 1e-3*nj*(x-(mid+xp))/(pm**3), B[2]]
                    elif dsj == "-y" :
                        B = [B[0] - 1e-3*nj*(z-(mid+zp))/(pm**3), B[1], B[2] + 1e-3*nj*(x-(mid+xp))/(pm**3)]
                    elif dsj == "y" :
                        B = [B[0] + 1e-3*nj*(z-(mid+zp))/(pm**3), B[1], B[2] - 1e-3*nj*(x-(mid+xp))/(pm**3)]

        return mu0/4/pi *1e-9* np.array(B)
```

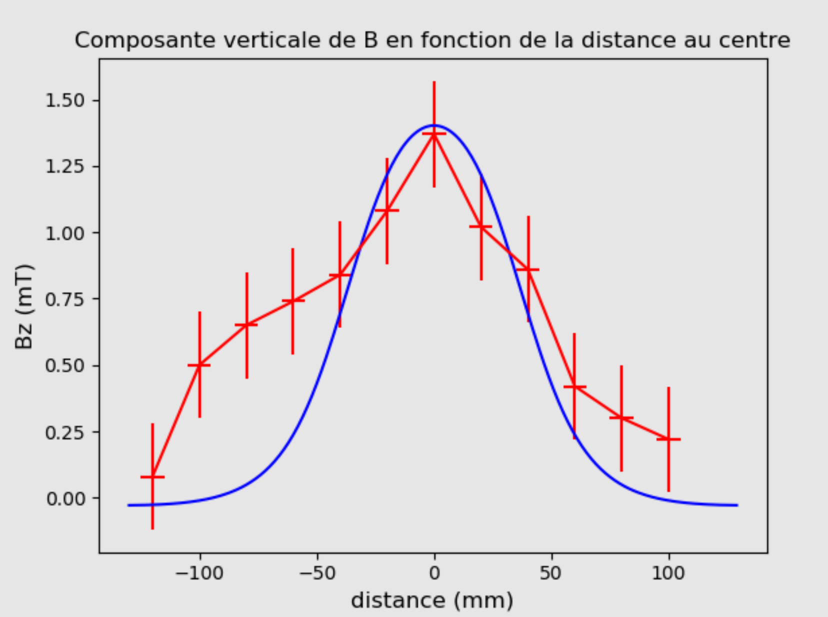
Annexe

Tracé de B_z

```
fig = plt.figure()
fig.patch.set_facecolor('#E7E6E6')
ax = fig.add_subplot(111)
ax.patch.set_facecolor('#E7E6E6')

plt.xlabel("distance (mm)", fontsize=12)
plt.ylabel('Bz (mT)', fontsize=12)
plt.title('Composante verticale de B en fonction de la distance au centre', fontsize=12)

Bzt = [Bzt[i] for i in range (20,dim-20)]
plt.plot(dist,np.array(Bzt),'b')
plt.errorbar(x=dist2,y=np.array(Bzp),yerr=0.2,xerr=5,color='r',ecolor='r')
plt.show()
```



Annexe

Tracé de i_2

```
fig = plt.figure()
fig.patch.set_facecolor('#E7E6E6')
ax = fig.add_subplot(111)
ax.patch.set_facecolor('#E7E6E6')

plt.xlabel("distance (mm)", fontsize=12)
plt.ylabel('I2 (mA)', fontsize=12)
plt.title('Amplitude du courant en sortie en fonction de la distance au centre', fontsize=12)

plt.plot(dist,np.array(i2t),'b')
plt.errorbar(x=dist2,y=np.array(i2p)*10**(-2), xerr=5, yerr=0.5, ecolor='r', color='r')
plt.show()
```