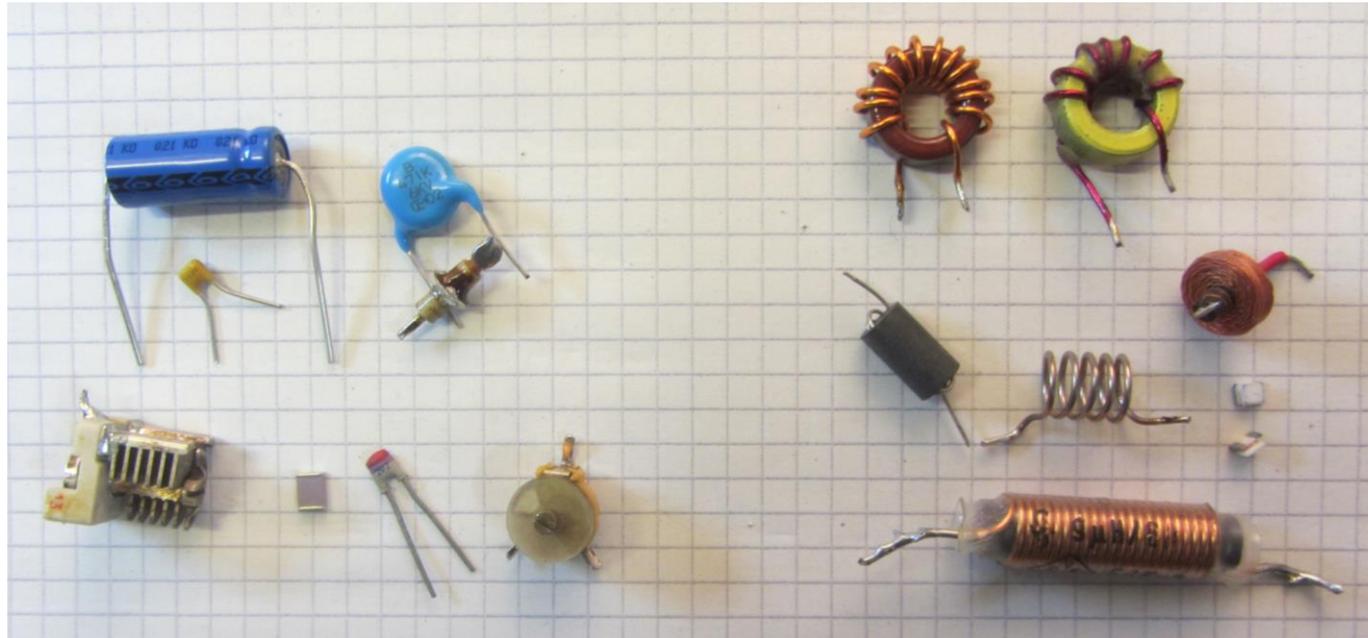


Inductances et Condensateurs

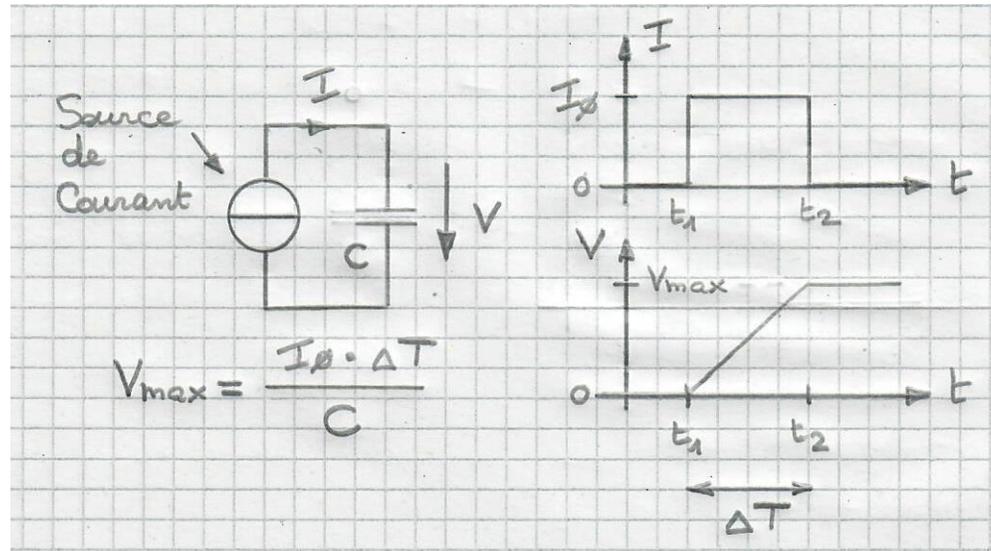
Leurs comportements du courant continu aux hautes fréquences



Les condensateurs et inductances sont des éléments réactifs Il stockent de l'énergie électrique

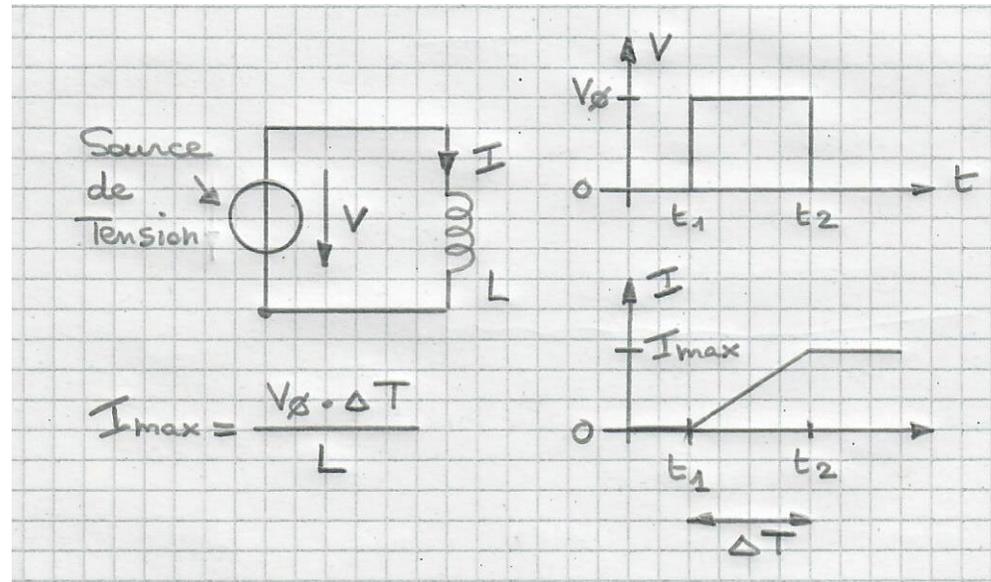
- Condensateur
 - Isolant
 - S'oppose aux variations de la tension
- Inductance
 - Conducteur
 - S'oppose aux variations du courant

Condensateur Comportement en DC



- Au temps $t=t_1$, $V=0$ (le condensateur est déchargé)
- Entre t_1 et t_2 , la source envoie un courant constant I_0 dans le condensateur
- Entre t_1 et t_2 , la tension aux bornes du condensateur augmente linéairement
- Après t_2 , le condensateur reste chargé à une valeur constante V_{MAX}
- La quantité de charge accumulée après t_2 vaut $Q = V_{MAX} * C = \Delta T * I_0$
- Exemple: charger un condensateur de $1000\mu\text{F}$ avec 1mA pendant 1 seconde $\rightarrow V_{MAX}=1$ Volt

Inductance Comportement en DC



- Au temps $t=t_1$, $I=0$ (aucun courant ne traverse la self)
- Entre t_1 et t_2 , la source applique une tension constante V_0 aux bornes de la self
- Entre t_1 et t_2 , le courant qui traverse la self augmente linéairement
- Après t_2 , le courant à travers la self vaut I_{MAX}
- Il continue de circuler à travers l'inductance et la source de tension (qui ne s'oppose pas à ce courant car elle a une impédance interne nulle \rightarrow source de tension parfaite)
- Exemple: courant à travers une inductance de 1mH avec une tension de 1V appliquée pendant 1 milliseconde $\rightarrow I_{MAX}=1$ Ampère

Inductance et Condensateur

Courants et tensions

- La tension aux bornes du condensateur apparaît après le courant
- On peut dire que le courant est en avance sur la tension

- Le courant à travers la bobine apparaît après la tension
- Ici, le courant est en retard sur la tension

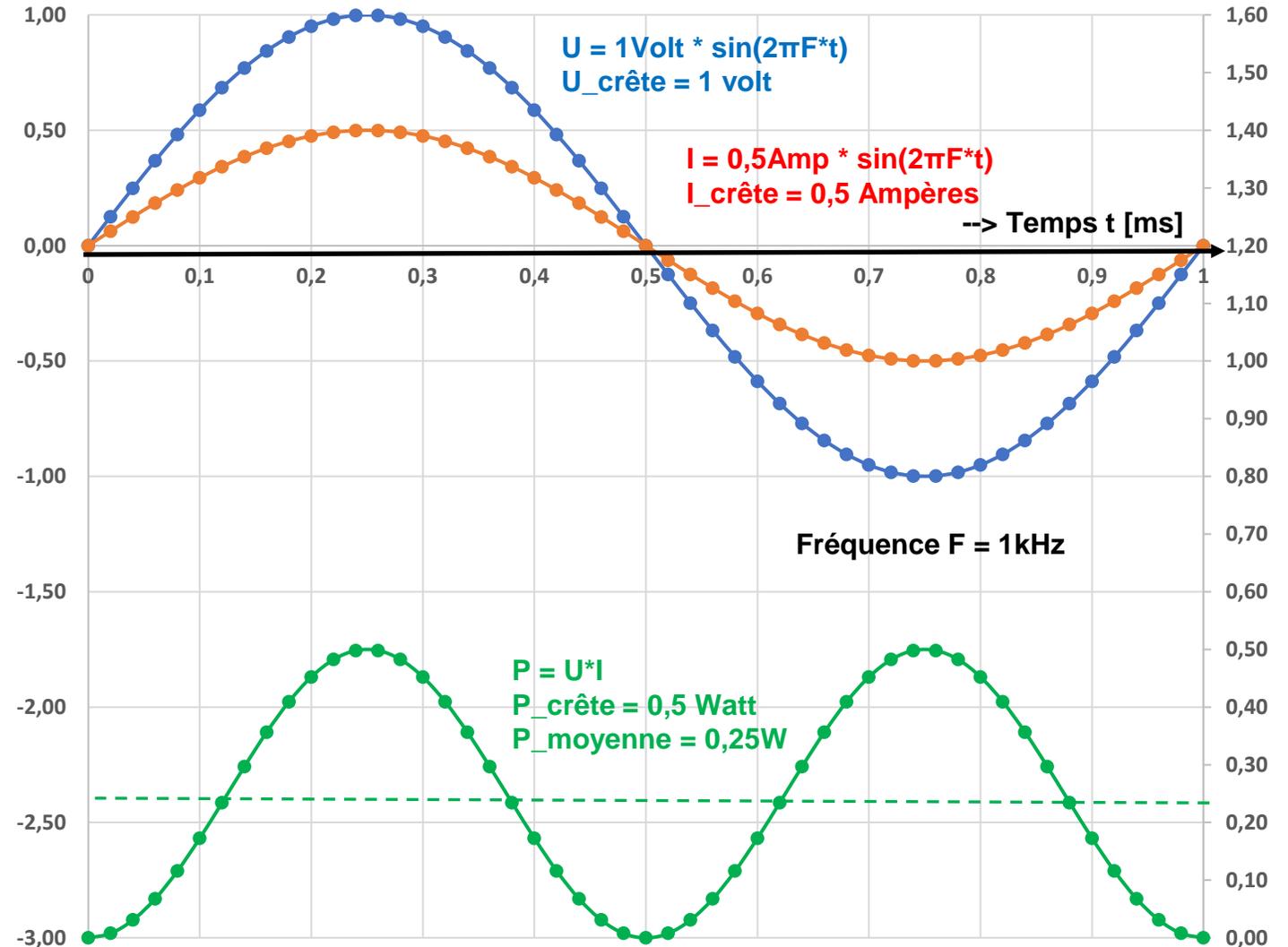
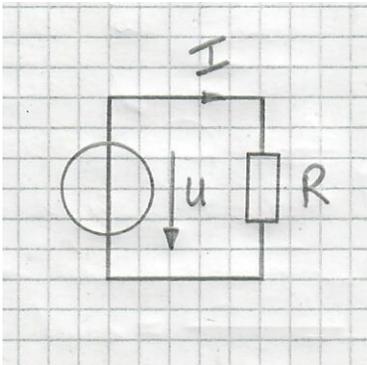
- Ces considérations sont importantes pour comprendre ce qui se passe en courant alternatif (AC)

Courant alternatif

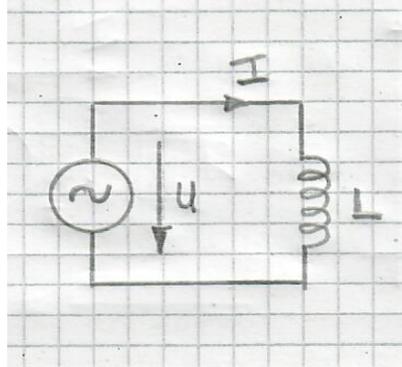
Résistance, puissance active

Le courant dans une résistance est en phase avec la tension.

Exemple avec une tension sinus d'amplitude 1 Volt à une fréquence de 1kHz, à travers une résistance de 2Ω



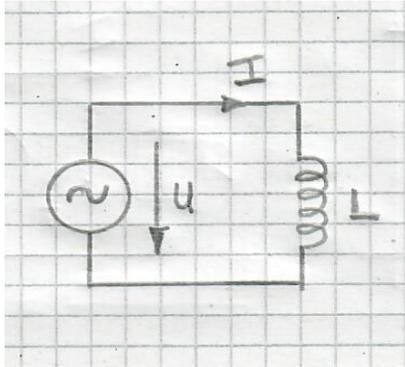
Courant alternatif. Inductance (self) Impédance inductive



- Soit f = fréquence, alors $\omega = 2\pi f$ est la pulsation
- L'impédance d'une self vaut: $X_L = \omega * L = 2\pi f L$
- Exemple: $f = 1kHz \rightarrow \omega = 2\pi f = 6283$ [radians/sec]
- Soit $L = 0,32mH$, alors $X_L = \omega * L = 2,01$ [Ω]

Courant alternatif. Inductance

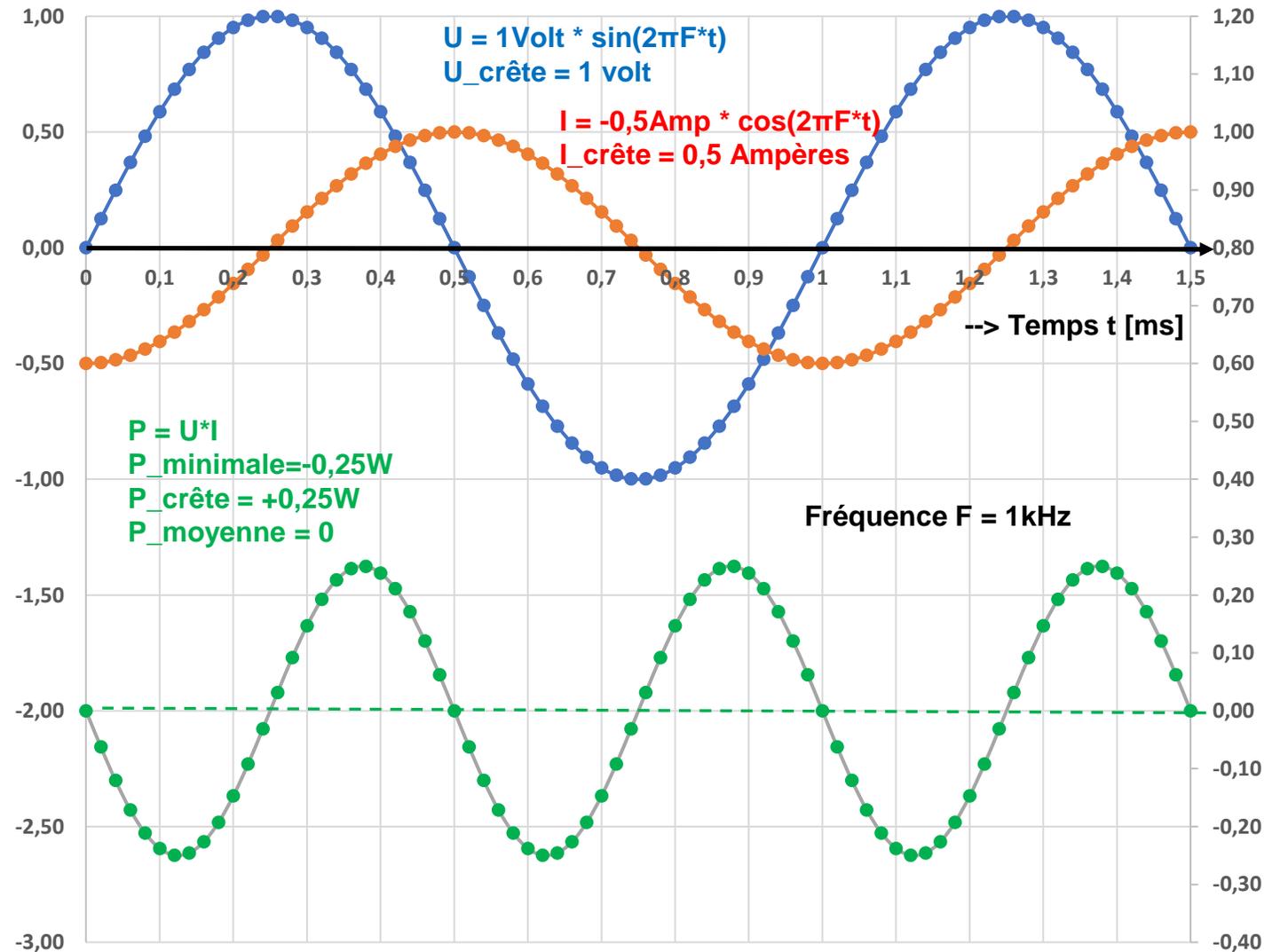
Déphasage, puissance réactive



Dans une inductance, le courant est en retard sur la tension (déphasage de -90°)

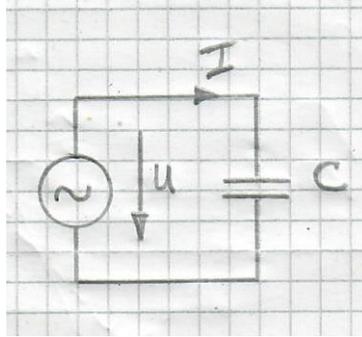
Dans cet exemple, la puissance réactive vaut 0,25W.

La puissance active est 0 (il n'y a pas de dissipation de puissance, car à chaque cycle, l'inductance accumule et restitue la même puissance)



Courant alternatif. Condensateur

Impédance capacitive

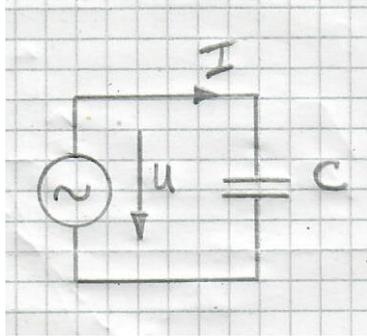


- Soit f = fréquence, alors $\omega = 2\pi f$ est la pulsation
- L'admittance (conductance) d'un condensateur vaut: $G_C = \omega * C = 2\pi f C$
- L'impédance est l'inverse de l'admittance $X_C = \frac{1}{G_C} = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi f C}$

- Exemple: $f = 1kHz \rightarrow \omega = 2\pi f = 6283$ [radians/sec]
- Soit $C = 80\mu F$, alors $X_C = \frac{1}{\omega C} = 1,99$ [Ω]

Courant alternatif. Condensateur

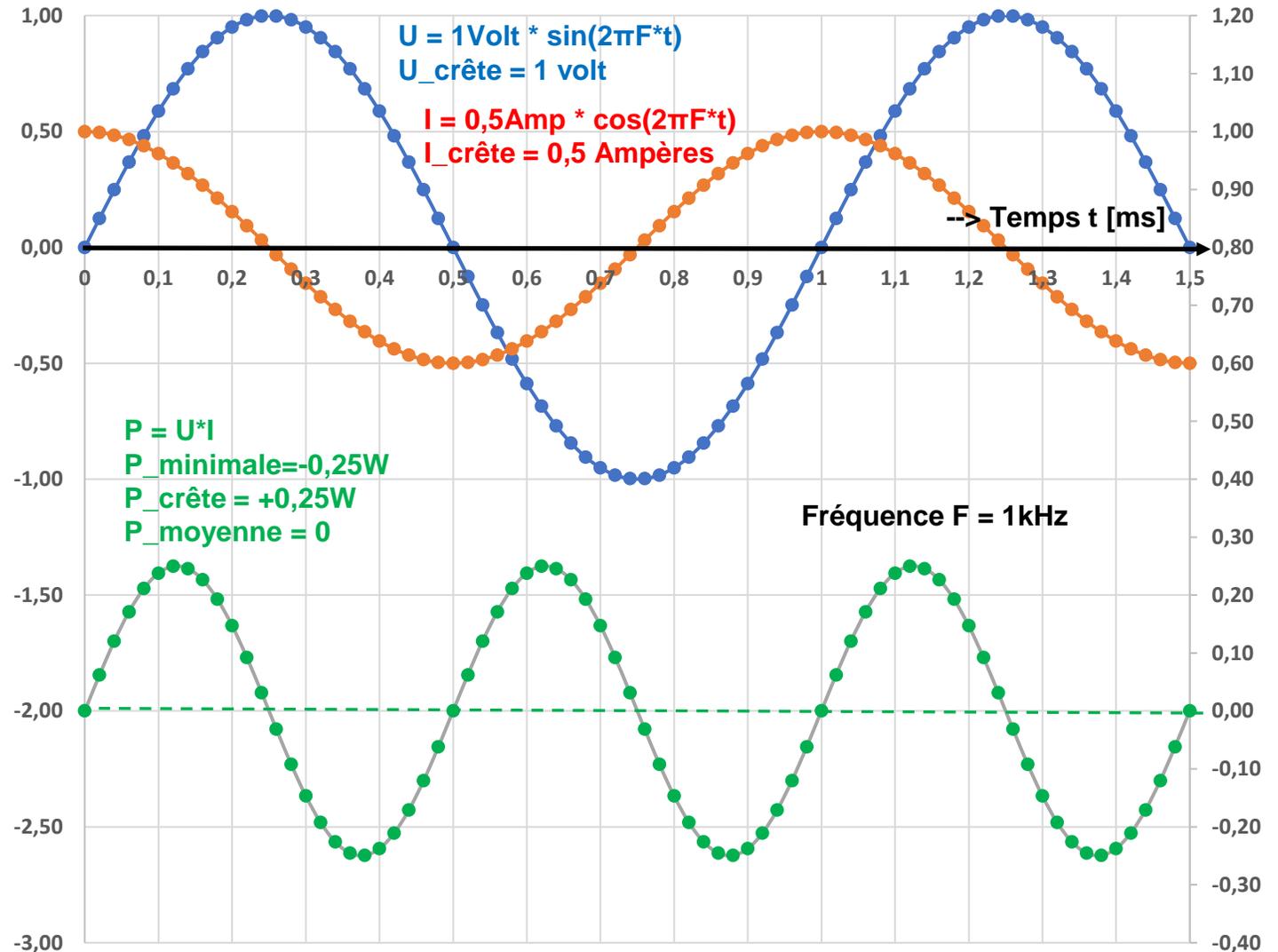
Déphasage, puissance réactive



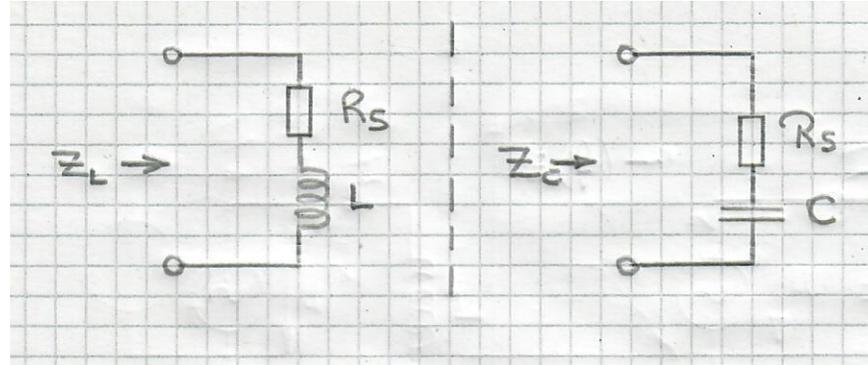
Dans un condensateur, le courant est en avance sur la tension (déphasage de $+90^\circ$)

Dans cet exemple, la puissance réactive vaut 0,25W.

La puissance active est 0 (il n'y a pas de dissipation de puissance, car à chaque cycle, le condensateur accumule et restitue la même puissance)



Les pertes ohmiques



- Les selfs et condensateurs ont toujours des pertes.
- Elles sont symbolisées par une résistance série R_S
- L'impédance d'une self vaut: $Z_L = R_S + j * \omega L$
- Et celle d'un condensateur: $Z_C = R_S + \frac{1}{j * \omega C}$
- Mais, pourquoi ce «j» dans l'équation?

Que vaut «J» ?

- «J» exprime que le courant dans une self ou un condensateur est déphasé de -90° respectivement $+90^\circ$ par rapport au courant dans une résistance
- «J» est un nombre «imaginaire» appelé aussi nombre «complexe»
- Sa valeur vaut: $j = \sqrt{-1} \quad \rightarrow \quad j^2 = -1$
- $j = \sqrt{-1}$ n'est pas un nombre réel, mais $j^2 = -1$ est un nombre réel

Nombres positifs et négatifs, rappel

$$(+1) * (+1) = +1$$

$$(+1) * (-1) = -1$$

$$(-1) * (+1) = -1$$

$$(-1) * (-1) = +1$$

Il y a alors 2 solutions pour $\sqrt{+1}$

$$\sqrt{1} = +1 \text{ et}$$

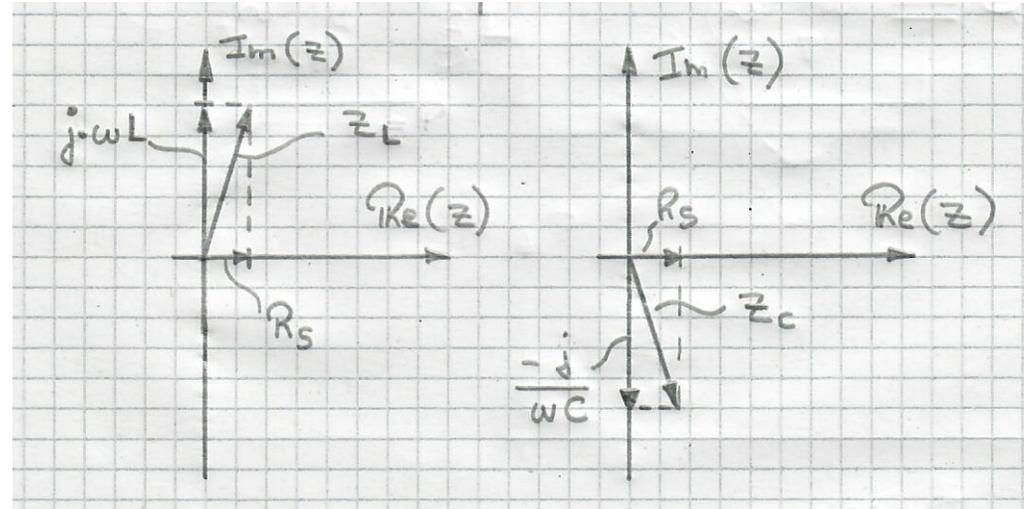
$$\sqrt{1} = -1$$

Par contre il n'y a pas de solution dans le domaine des nombres réels pour $\sqrt{-1}$

Impédance totale d'une self ou d'un condensateur avec les pertes

Pour calculer la valeur totale de l'impédance, on utilise «Pythagore»

(Merci à lui)



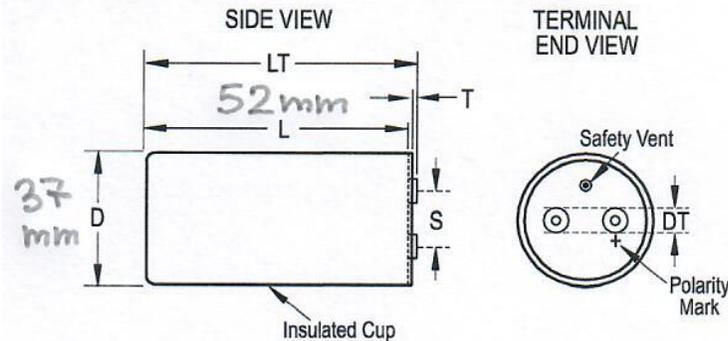
$Z_L = R_S + j * \omega L$
L'impédance totale de
l'inductance avec ses pertes vaut

$$|Z_L| = \sqrt{R_S^2 + (\omega L)^2}$$

$Z_C = R_S + \frac{1}{j * \omega C} = R_S - \frac{j}{\omega C}$
L'impédance totale du
condensateur avec ses pertes vaut

$$|Z_C| = \sqrt{R_S^2 + \left(\frac{1}{\omega C}\right)^2}$$

Exemple avec un condensateur de forte valeur



General Information	
Supplier:	KEMET
Series:	PEH200
Dielectric:	Aluminum Electrolytic
Description:	Screw Terminal, Aluminum Electrolytic
RoHS:	Yes
Notes:	Dimensions D And L Include Sleeving. M5
Shelf Life:	156 Weeks

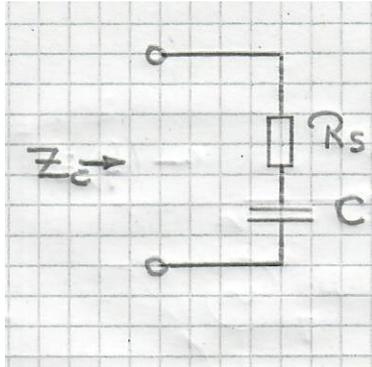
Specifications	
Capacitance:	4,700 uF
Capacitance Tolerance:	20%
Voltage DC:	63 VDC
Temperature Range:	-40/+85°C
Rated Temperature:	85°C
Life:	10000 Hrs (Rated Voltage And Ripple Current At 85C)
Resistance:	32 mOhms (100Hz 20C), 21 mOhms (100kHz 20C)
Ripple Current:	9 Amps (100Hz 85C), 26.8 Amps (10kHz 50C), 18 Amps (10kHz 40C)
Leakage Current:	4888.3 uA (5min 20°C)
Inductance:	12 nH (ESL)

$$R_S = 0,032\Omega \quad C = 4700\mu F$$

J'ai utilisé 3 de ces condensateurs en // pour filtrer une alimentation 50V de PA LDMOS

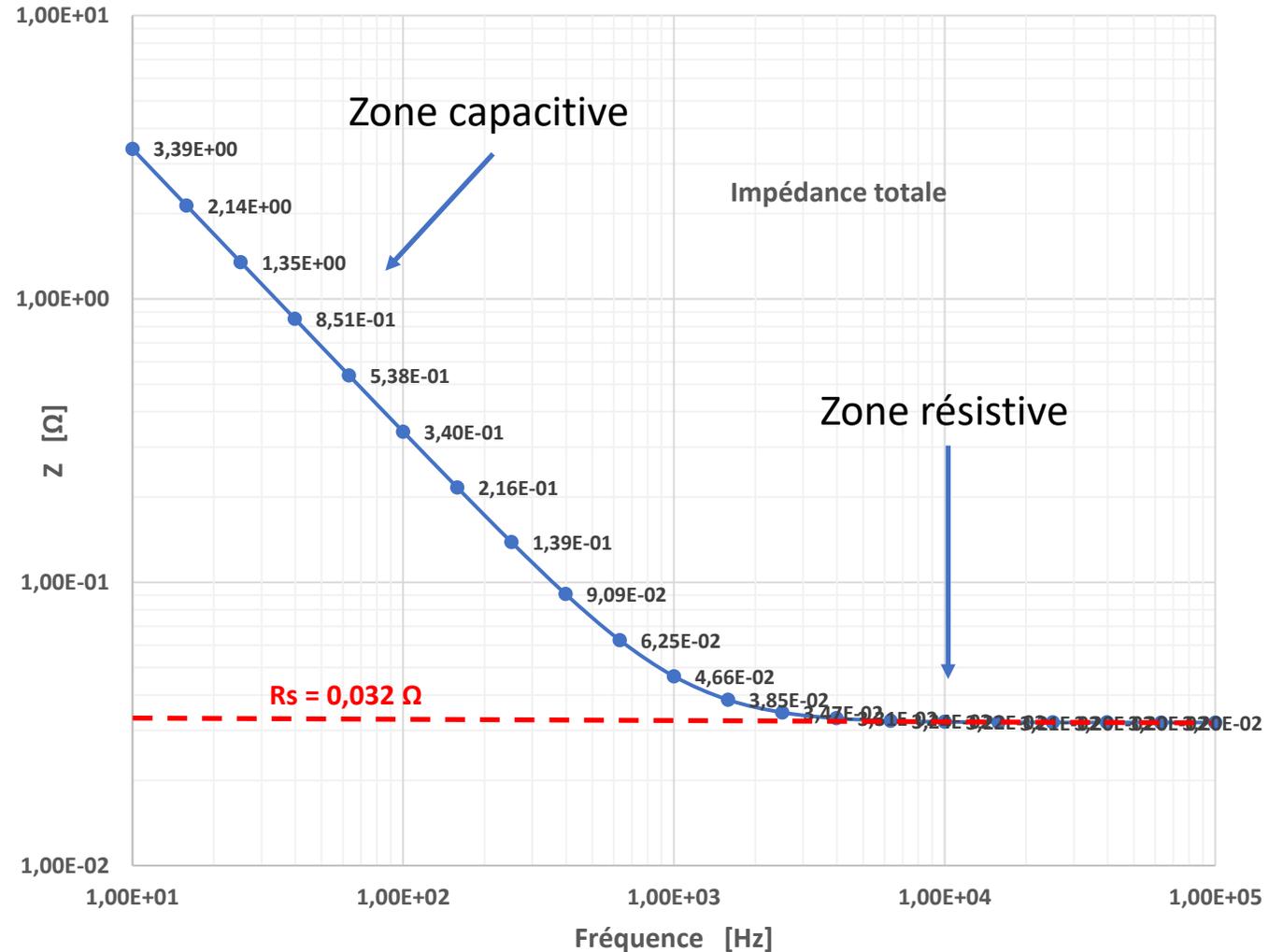
Condensateur de 4700 μ F avec sa résistance de pertes en série

Variation de l'impédance avec la fréquence



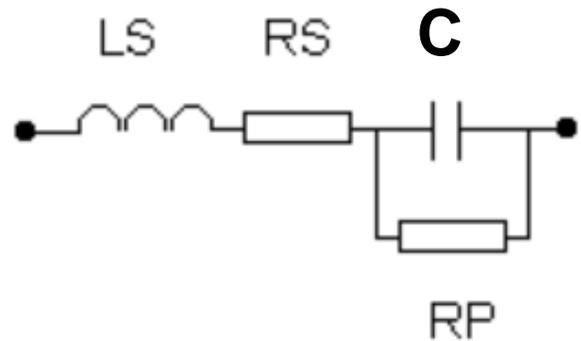
Aux basses fréquences, l'impédance capacitive domine. Elle décroît avec la fréquence.

A partir de 1kHz et plus haut, c'est la résistance série qui domine et l'impédance ne diminue plus



Modèle plus élaboré pour un condensateur

le condensateur réel



Si on néglige R_P , l'impédance vaut:

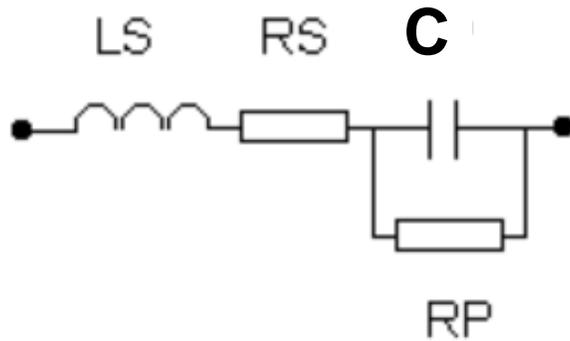
$$Z_C = R_S + j * \left(\omega L_S - \frac{1}{\omega C} \right)$$

En plus de la résistance série, on ajoute les éléments parasites suivants:

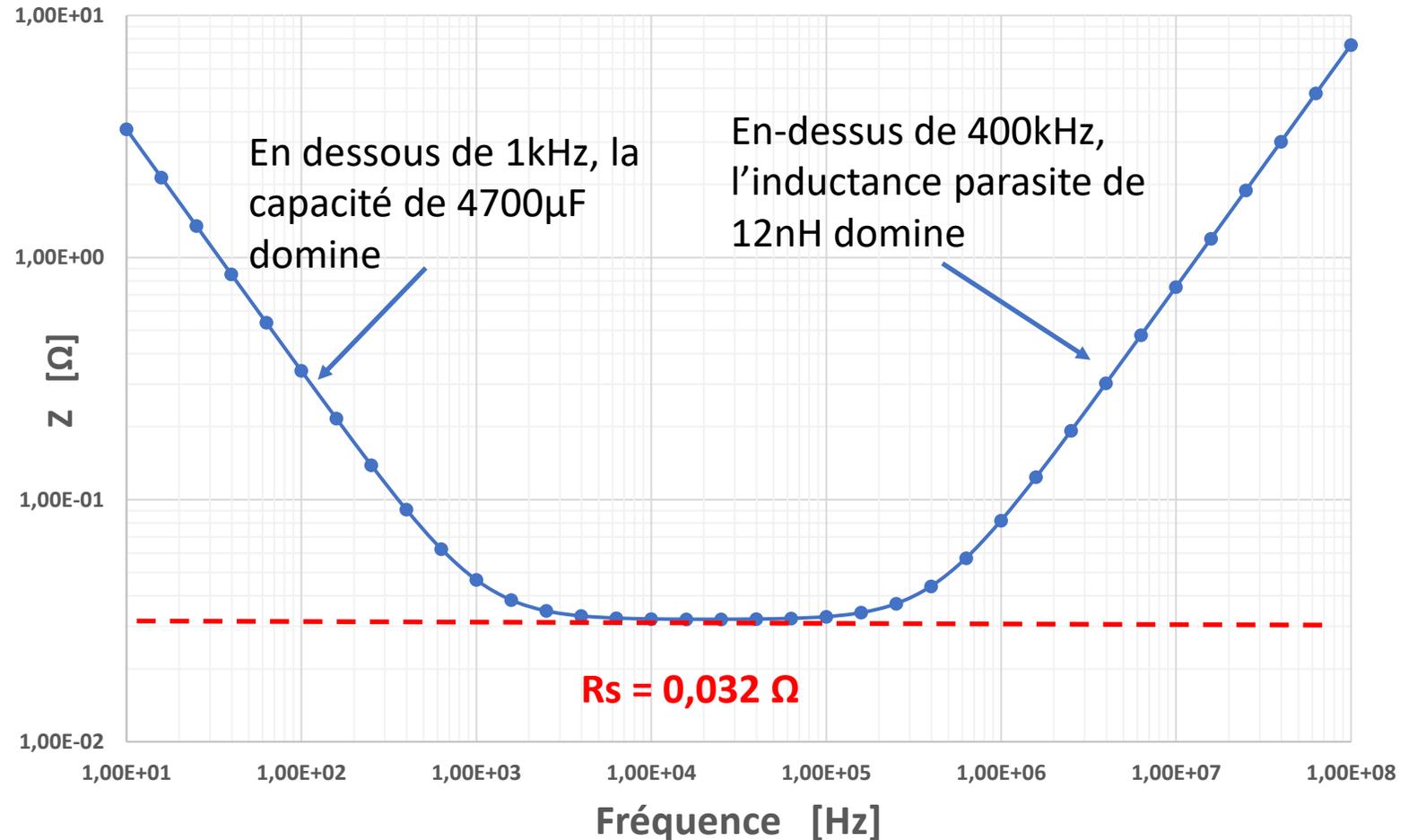
- Une inductance parasite série L_S . Elle est causée par la longueur des conducteurs à l'intérieur du condensateur.
- Une résistance de fuite en parallèle R_P , Cependant, en haute fréquence, celle-ci ne joue pas de rôle

Condensateur de 4700 μ F. Modèle complet

Variation de l'impédance avec la fréquence



- $C = 4700\mu F$
- $R_S = 0,032\Omega$
- $L_S = 12nH$

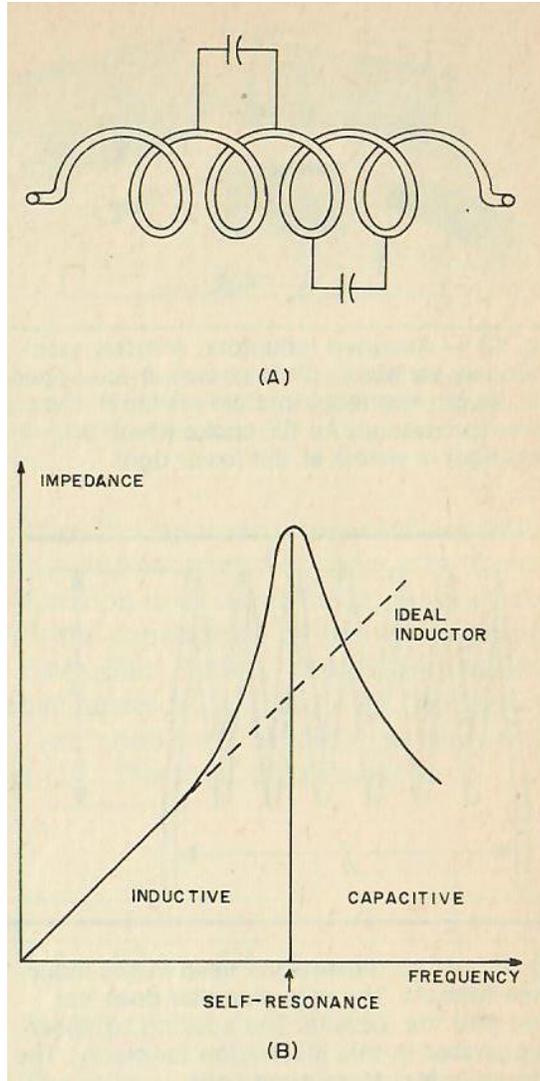


Inductances (selfs)

Il existe 3 types d'inductances:

- Selfs à faibles pertes avec facteur de qualité élevé. Elles sont utilisées dans des filtres ou des circuits d'adaptation d'impédance résonnants
- Selfs d'arrêt (choques, selfs de choc). Elles sont utilisées pour conduire le courant continu et empêcher les signaux à haute fréquence de se propager le long des fils d'alimentation
- Transformateurs d'impédances dits «apériodiques». Selfs à multi-enroulements pour adapter une impédance de façon constante sur une large gamme de fréquences

Selfs. Modèle avec éléments parasites



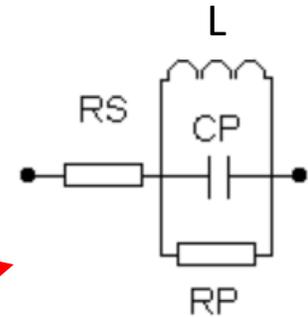
Dans une self, la proximité des spires forme une capacité parasite parallèle (A). Cette capacité distribuée provoque une élévation de l'impédance puis une auto résonance de la bobine (B).

En-dessous de la fréquence d'auto résonance, l'impédance est inductive. En-dessus, elle est capacitive.

Un modèle électrique pour la self est donné ici

- L est la valeur inductive de la self
- C_p est sa capacité parasite parallèle
- R_p est la résistance de pertes parallèle de la self à la fréquence de résonance
- R_s est la résistance série (elle varie avec la fréquence...)

L'inductance réelle

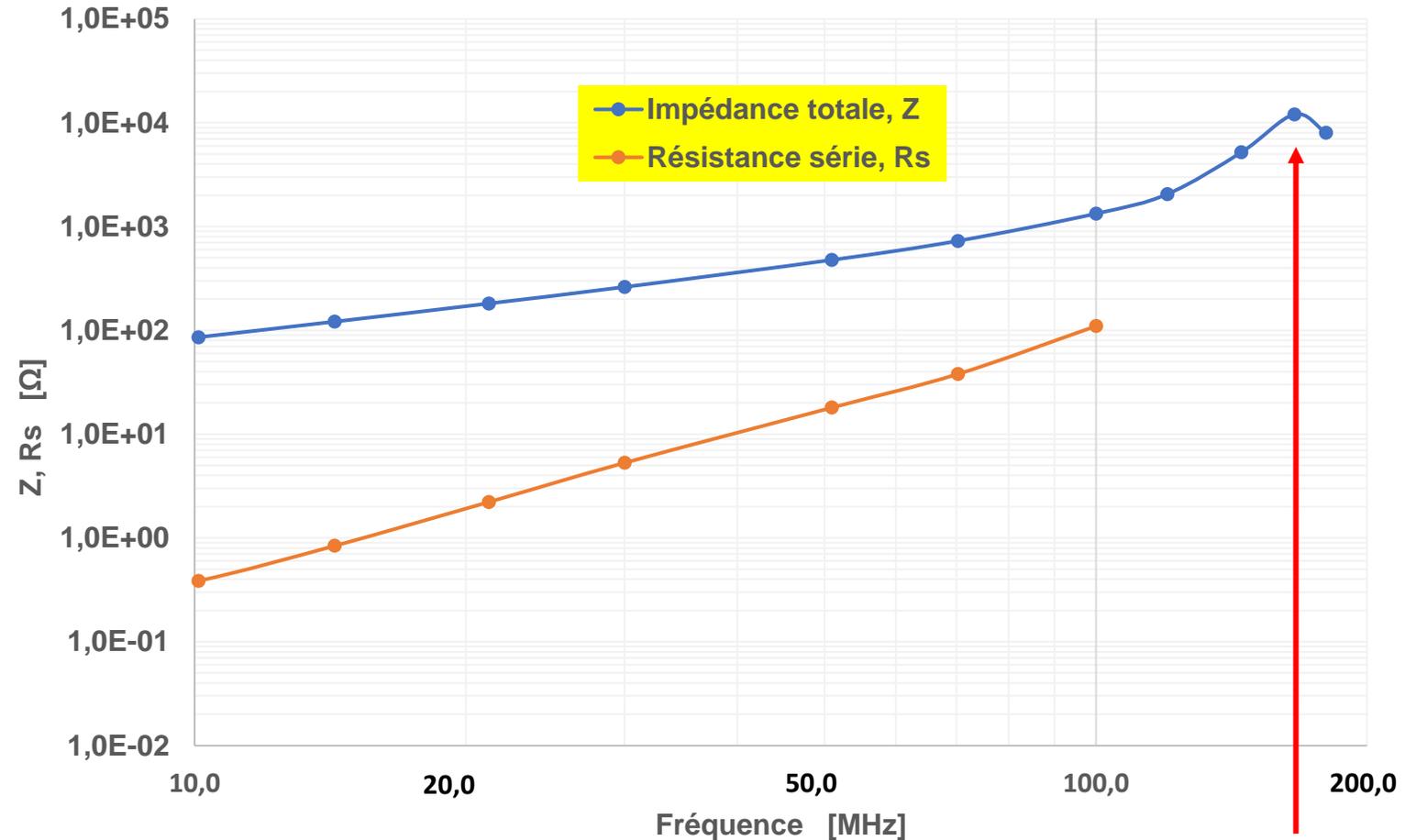


Exemple avec une self pour les ondes courtes



Sur l'image ci-dessus, la self est soudée sur le posage de test pour la mesure.

- 15 spires sur noyau toroïdal T50-2 de diamètre 25mm (noyau en poudre de fer agglomérée de chez «Amidon Associates»)



$$L = 1,35\mu H$$

Résonance parallèle: $F_p = 166\text{MHz}$
A cette fréquence, $R_p = 12\text{k}\Omega$

Self ondes courtes sur T50-2. Paramètres

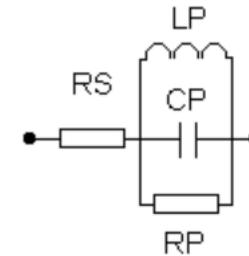
A partir de la résonance parallèle, on peut calculer la valeur de C_p

- A la résonance, $\omega L = \frac{1}{\omega C_p} \rightarrow$
- $\omega^2 = \frac{1}{L * C_p} \rightarrow \omega = \frac{1}{\sqrt{L * C_p}}$
- Et comme $\omega = 2\pi f \rightarrow$

$$f_p = \frac{1}{2\pi\sqrt{L * C_p}}$$

Cette équation est dite «formule de Thomson» (merci à lui)

L'inductance réelle



$$L = 1,35\mu H$$
$$f_p = 166MHz$$

$$\rightarrow C_p = \frac{1}{L * (2\pi f_p)^2} = 0,68pF$$

Self ondes courtes sur T50-2. Paramètres

- Le facteur de qualité Q est le rapport entre l'impédance inductive et la résistance série

- $$Q = \frac{\omega L}{R_S}$$

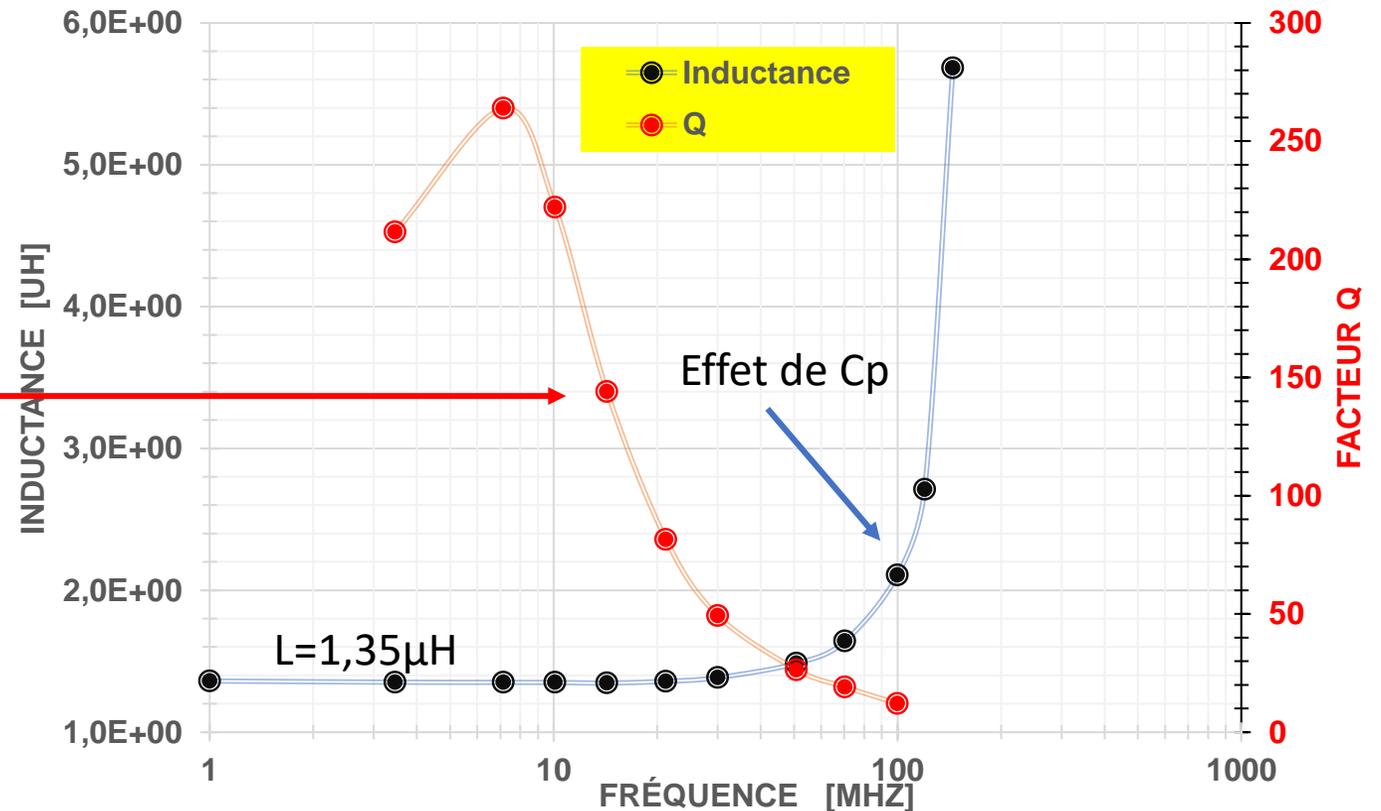
- Q=144 à f=14,3MHz

- Le facteur de qualité dépend surtout du matériau magnétique du noyau:

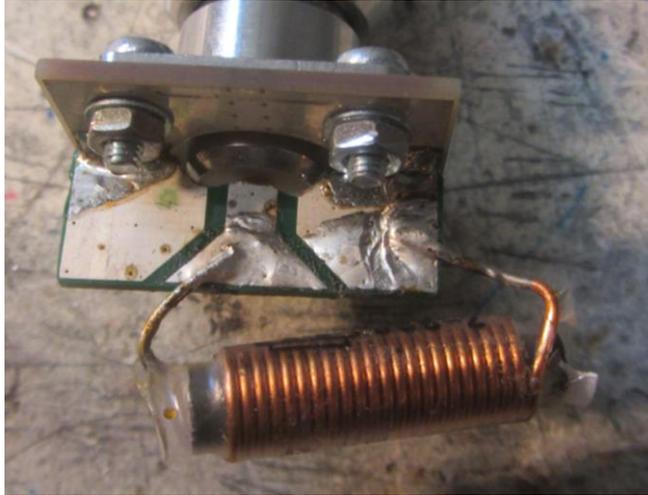
- Mix 2 (rouge): 1 – 30MHz

- Mix 6 (jaune): 2 – 50MHz

- Catalogue sur: www.amidon.de

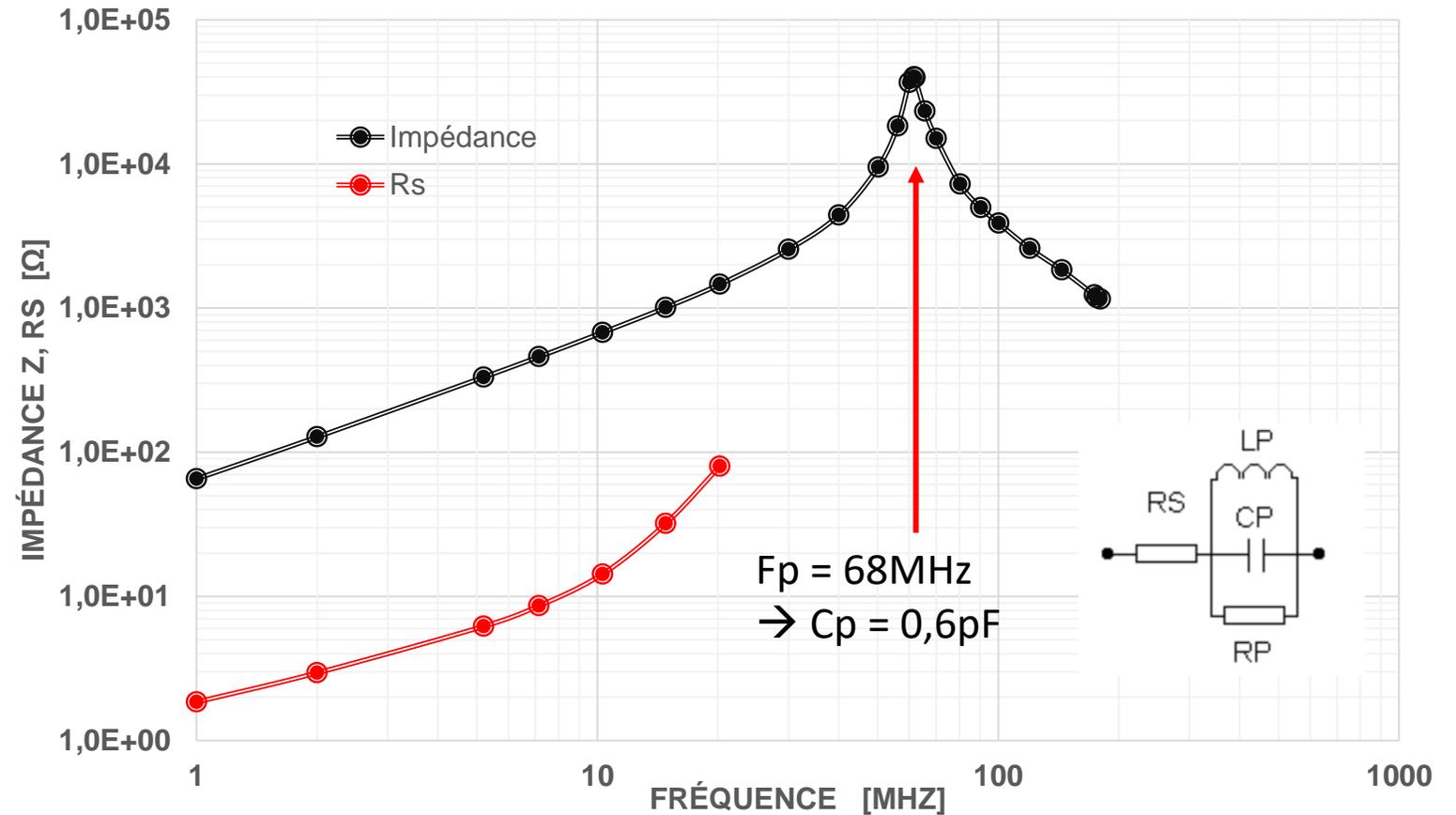


Self d'arrêt sur noyau tubulaire



Self de Siemens /Epcos:

- $L = 9\mu\text{H} / 6\text{A}$
- Environ 20 spires sur noyau ferrite $\varnothing=6\text{mm}$
- $|Z| > 1\text{k}\Omega$ entre 14MHz et 180MHz



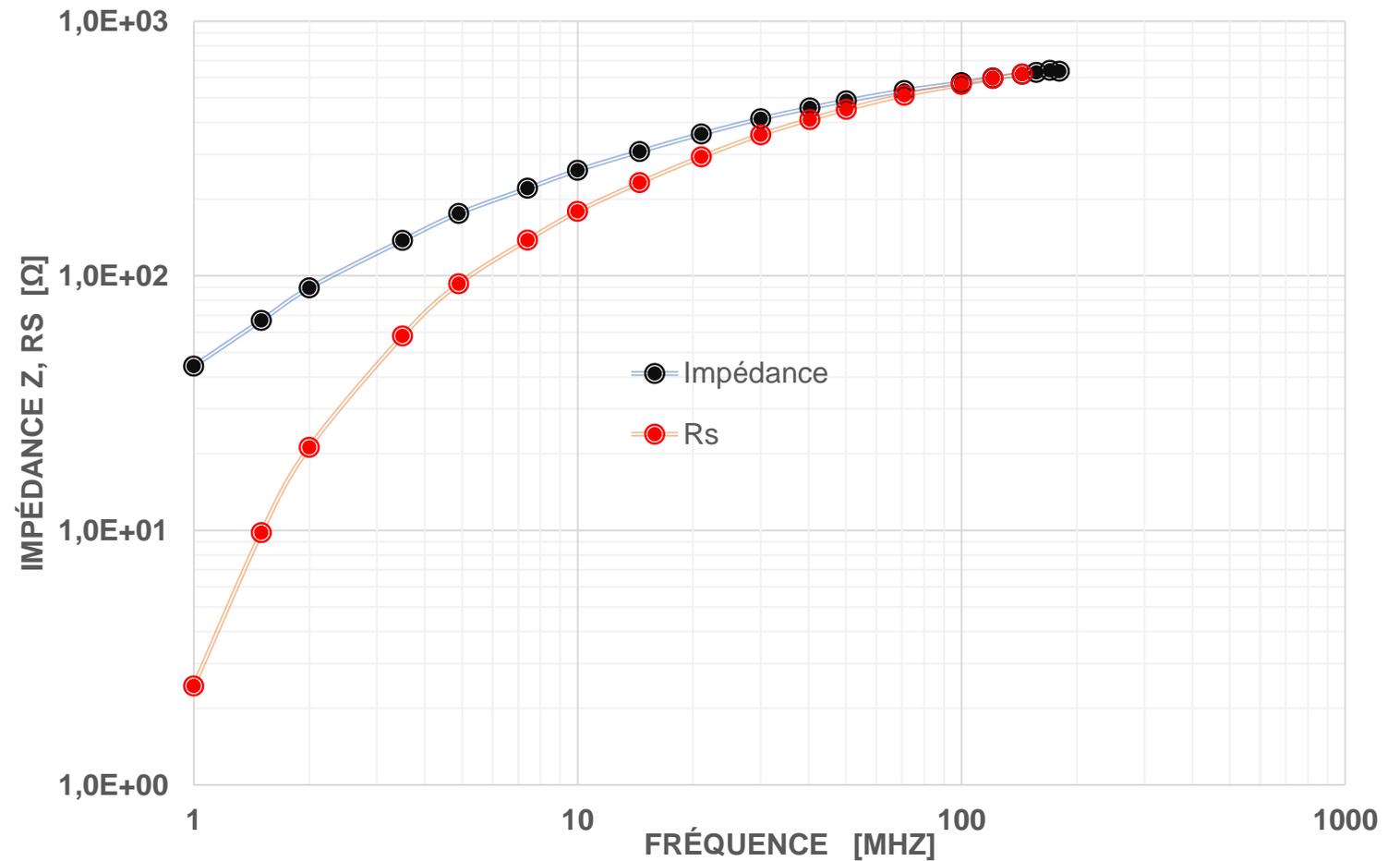
Cette self supporte un courant élevé sans saturation du noyau magnétique

Self d'arrêt à 2 spires dans de la ferrite



Cette self ne supporte pas des courants élevés.

Par contre son facteur Q est faible dans le domaine des ondes courtes. A partir de 3,5MHz le terme résistif domine



$$L = 7\mu H$$

$$Q=4 \text{ à } 2\text{MHz}$$

$$Q \approx 1 \text{ à } f > 10\text{MHz}$$

Conclusions

- Les selfs et condensateurs sont des composants essentiels des circuit radio.
- Ce sont des éléments réactifs; ils ne consomment pas d'énergie vu qu'ils en accumulent puis en restituent la même quantité à chaque cycle
- Un condensateur a comme éléments parasites une résistance de perte ainsi qu'une inductance en série.
- Une inductance à une capacité parallèle parasite ainsi qu'une résistance parasite série dont la valeur varie avec la fréquence
- Des exemples ont été donnés pour les ondes courtes et en VHF

Références

- ARRL: Radioamateur Handbook
- Traité d'électricité et d'électronique pour le radioamateur
<https://f6crp.pagesperso-orange.fr/elec/index.htm>

Sujet pour un futur stamm technique ?

- Abaque de Smith
 - Explications du diagramme
 - Calculs à l'aide du programme « Smith V4.1 » de l'université de Berne, Exemples (circuits d'adaptation d'impédance L-C)
- Analyseur de réseau « NanoVNA V2 » de chez NanoRFE
 - Procédure de calibration
 - Mesure de quelques capacités céramiques
- Inductances RF
 - Inductance d'un fil rectiligne
 - Effet pelliculaire
 - Mesure d'une self RF