

Ferromagnétisme et Nano-électronique : Exploration des Systèmes de Mémoire.

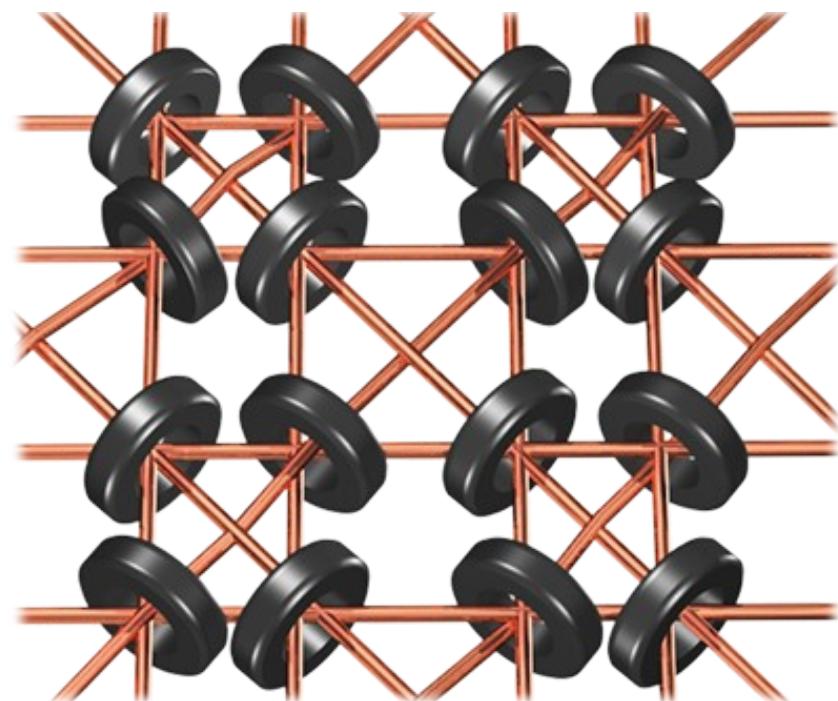
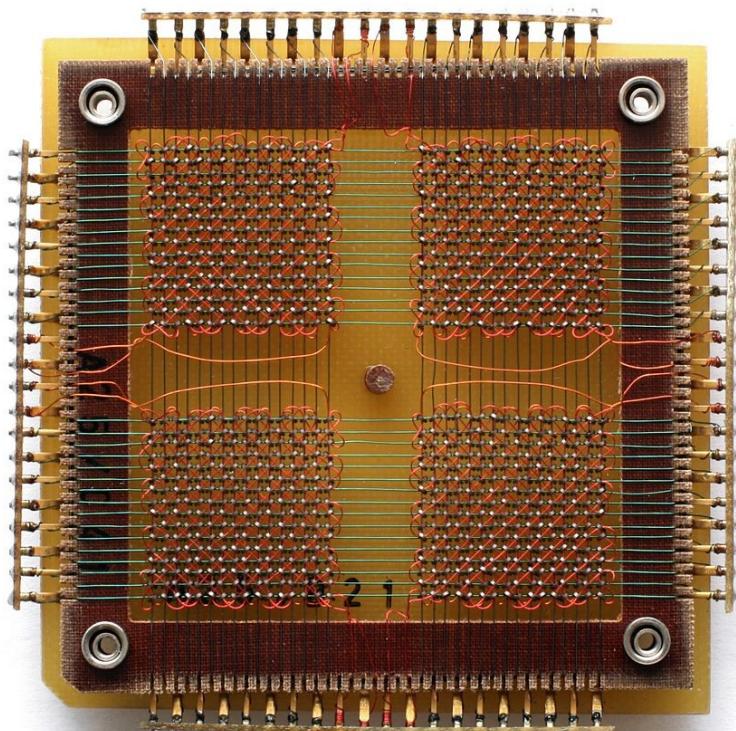
34653 LAVERGNE Pierre

Binôme : CHAMPMARTIN Erwan

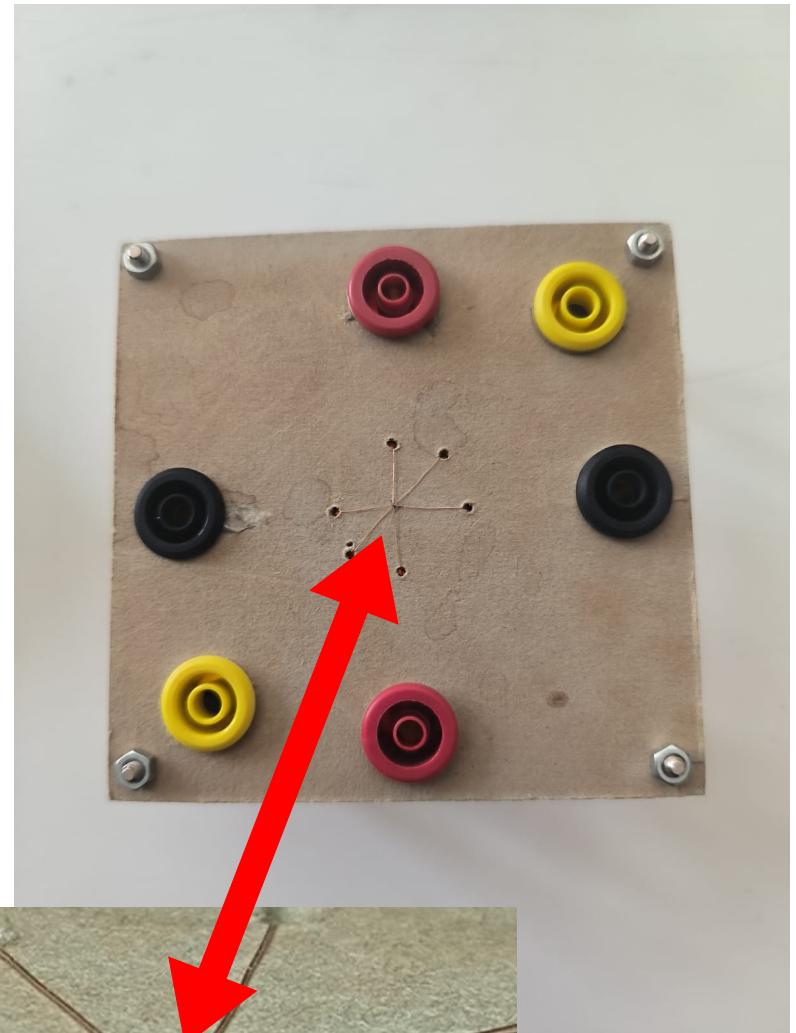
Problématique

- Comment les principes physiques fondamentaux des mémoires à tores magnétiques, et de la RRAM contribuent-ils à optimiser les mémoires ?
- Liens au thème :
 - Transformation de l'information
 - Transition des méthodes de stockage

Mémoire à tores ferromagnétiques



Maquette

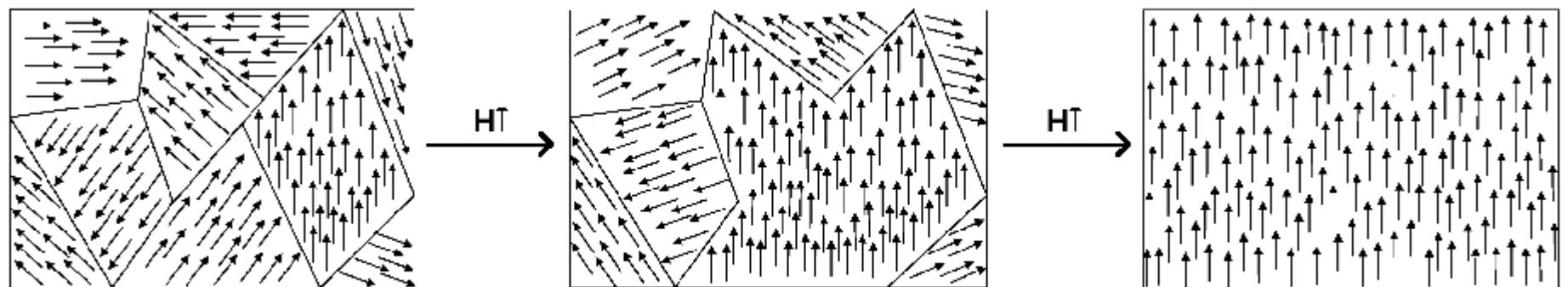


Tore = Bit

- **Hystérésis magnétique :**

Le matériau crée un champ magnétique qui dépend des champs auxquels il a été soumis.

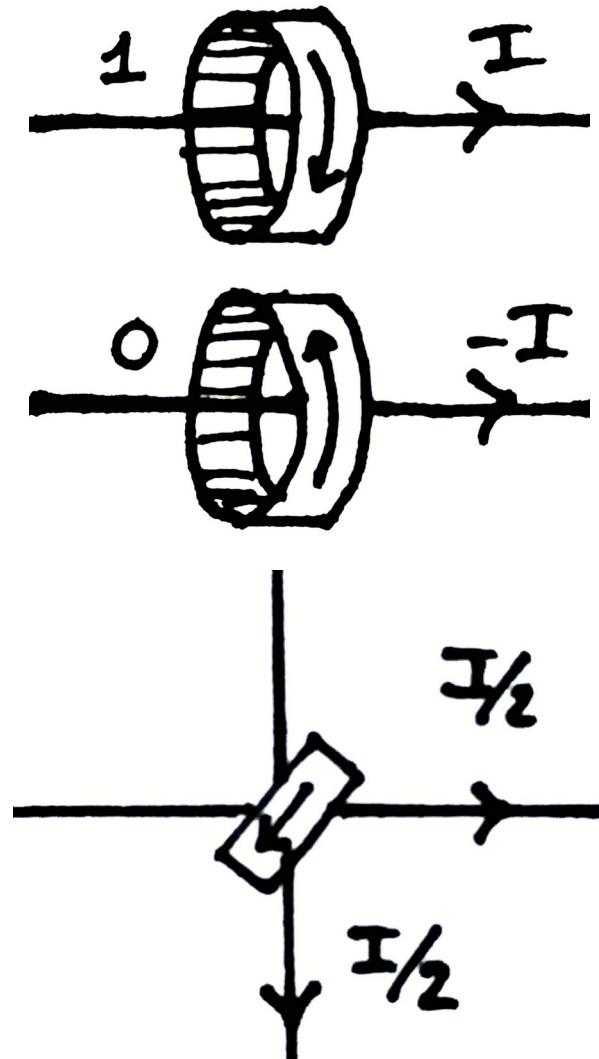
- Domaines de Weiss :



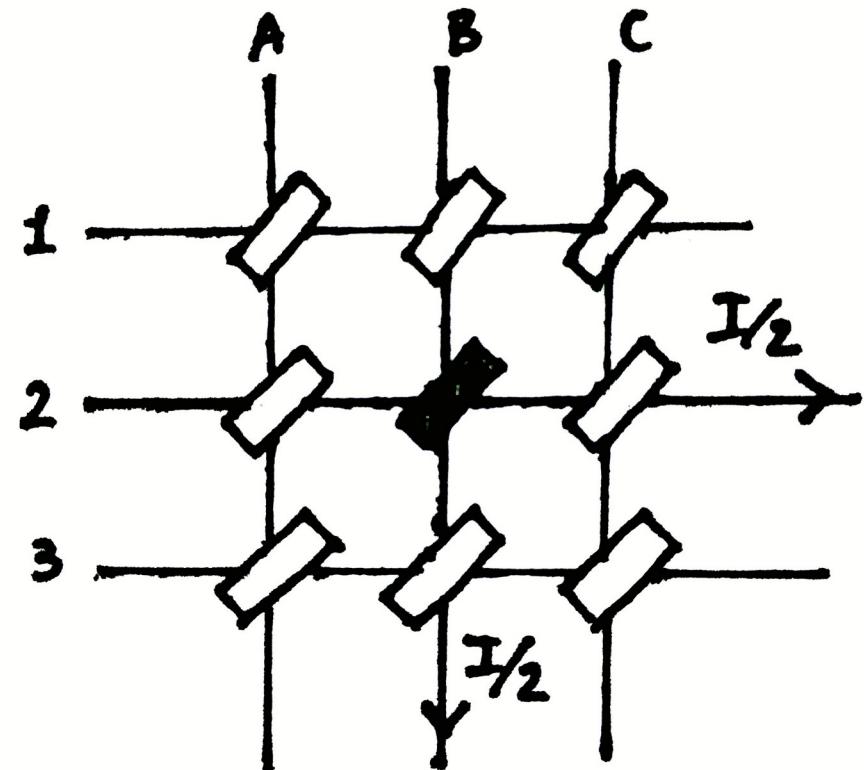
https://fr.wikipedia.org/wiki/Domaine_de_Weiss

Écriture d'un bit

- À l'aide d'un ou deux fils :



- Sélection du tore :

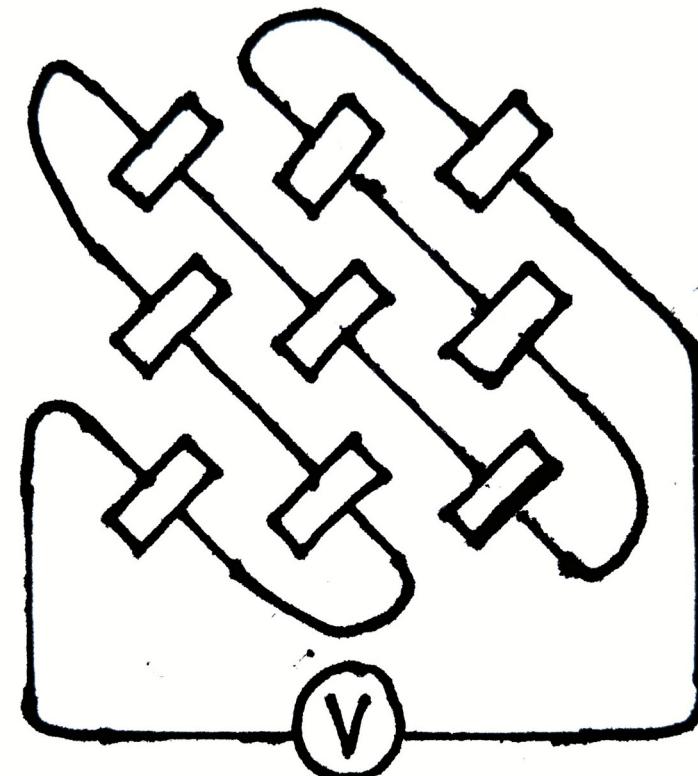
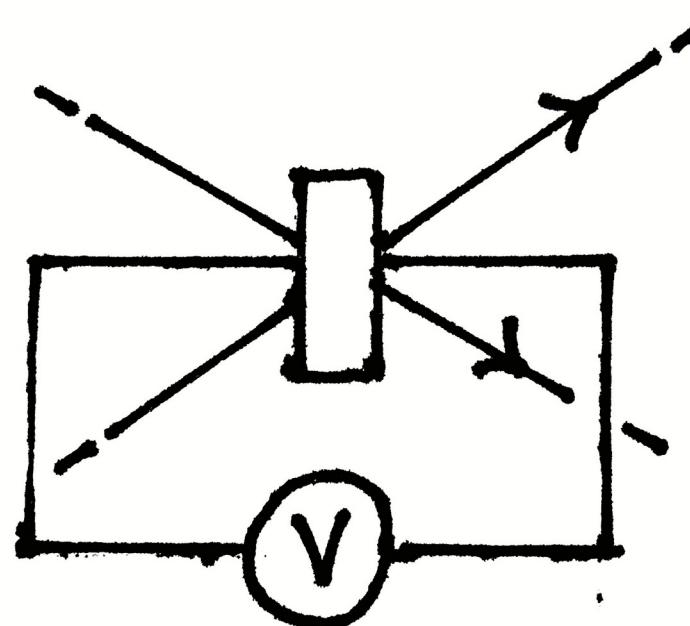


Lecture d'un bit

- Tension induite

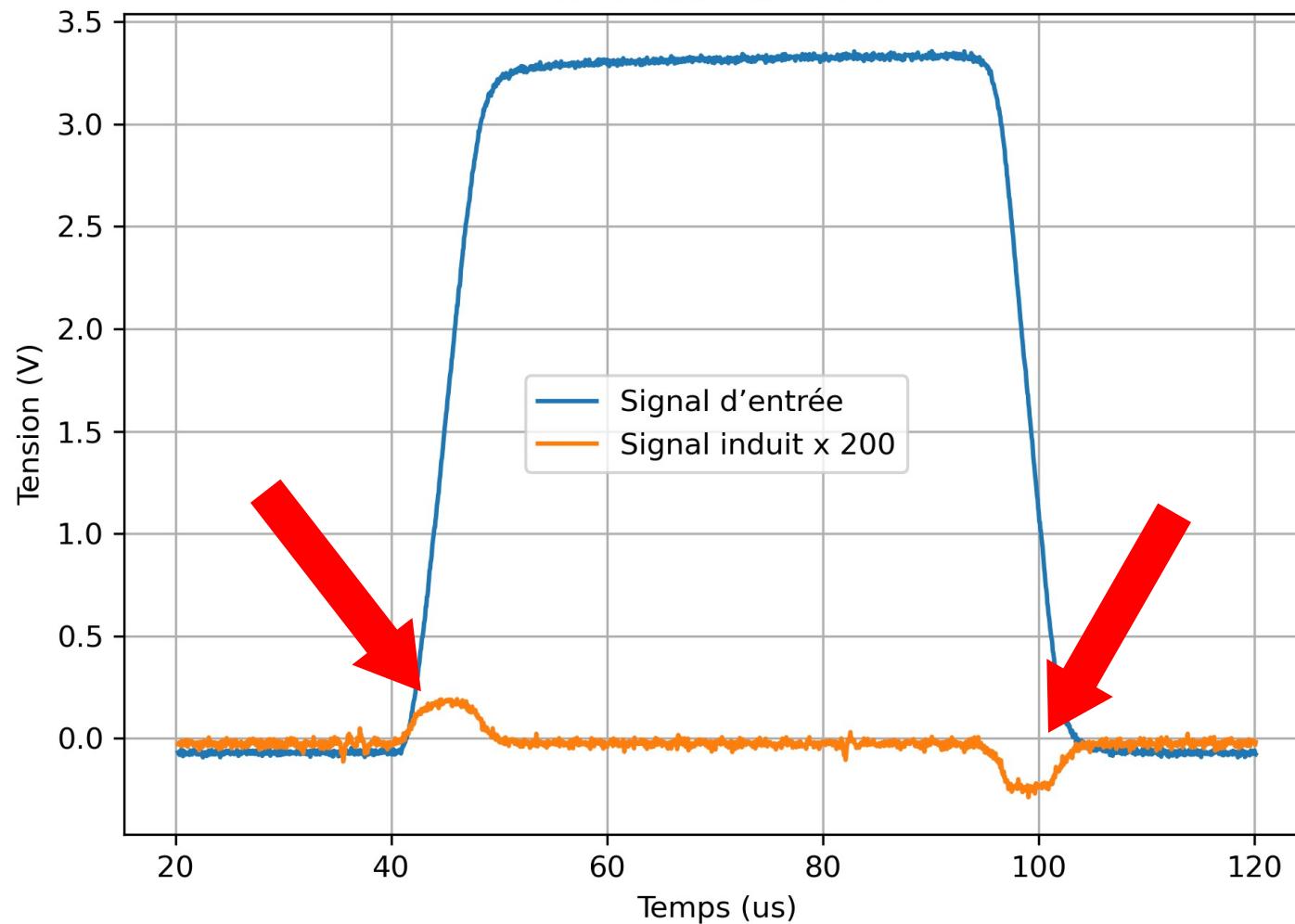
- Loi de Faraday : $|e| = \left| \frac{d\phi}{dt} \right|$

- Fil de lecture :

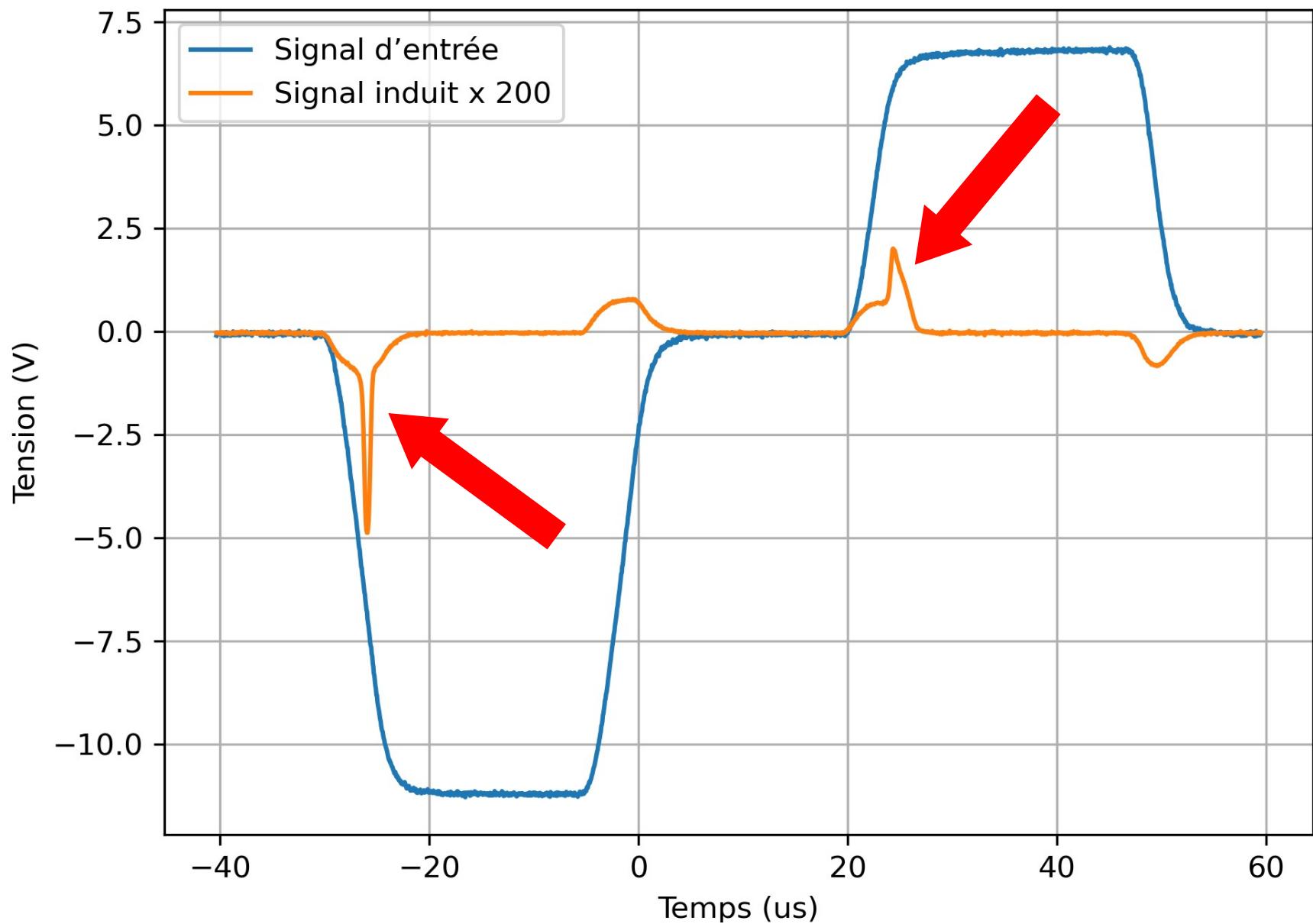


Lecture d'un bit

- Deux cas possibles :
 1. Cas du **non retournement** :



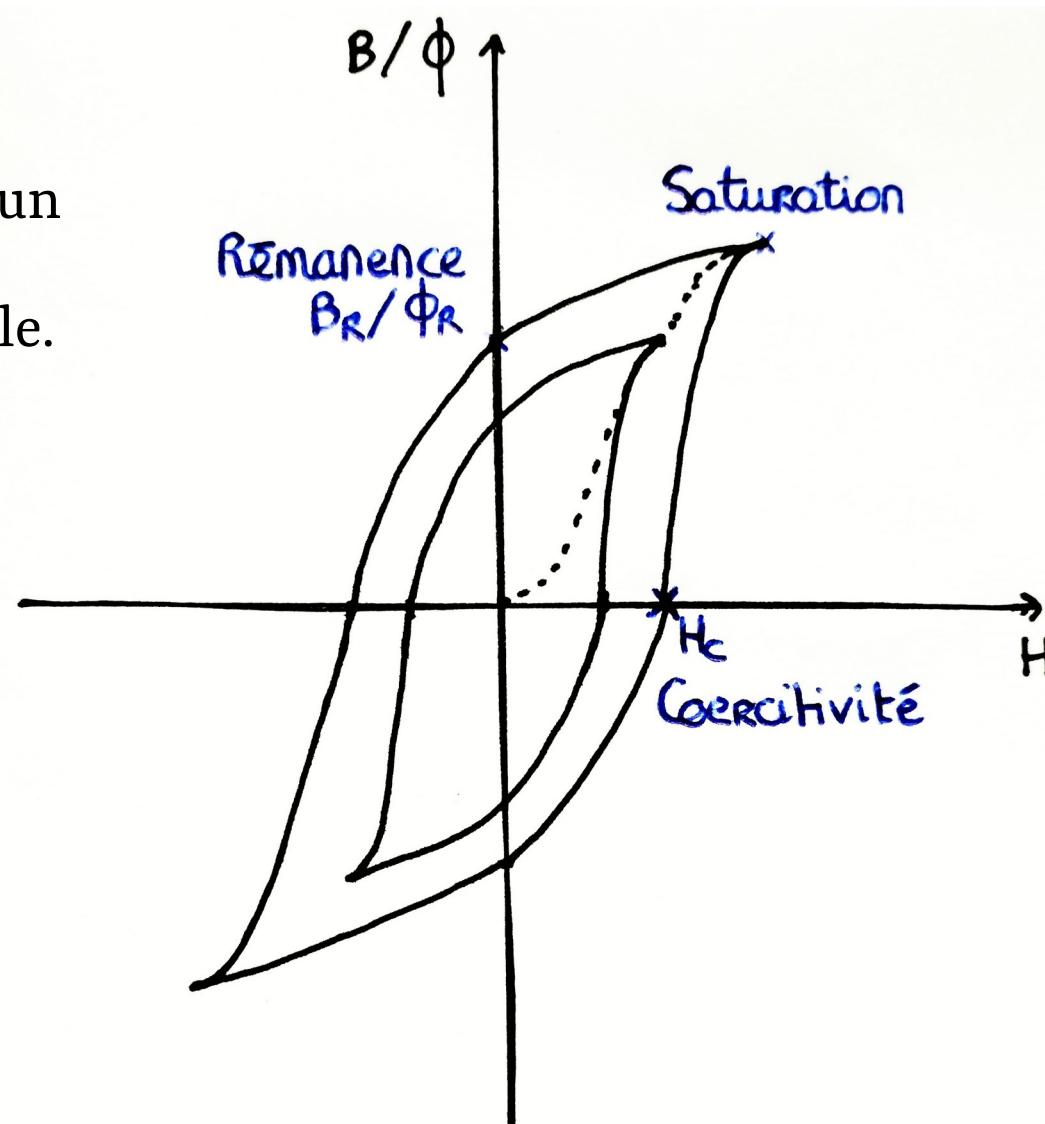
2. Cas du retournement :



La boucle d'hystérésis

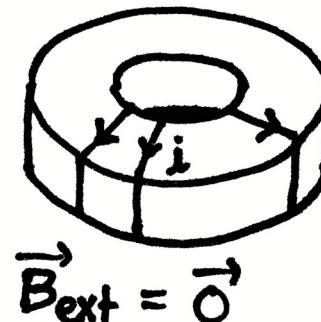
- **Ferromagnétique :**

Capable de produire un champ magnétique élevé, à excitation nulle.

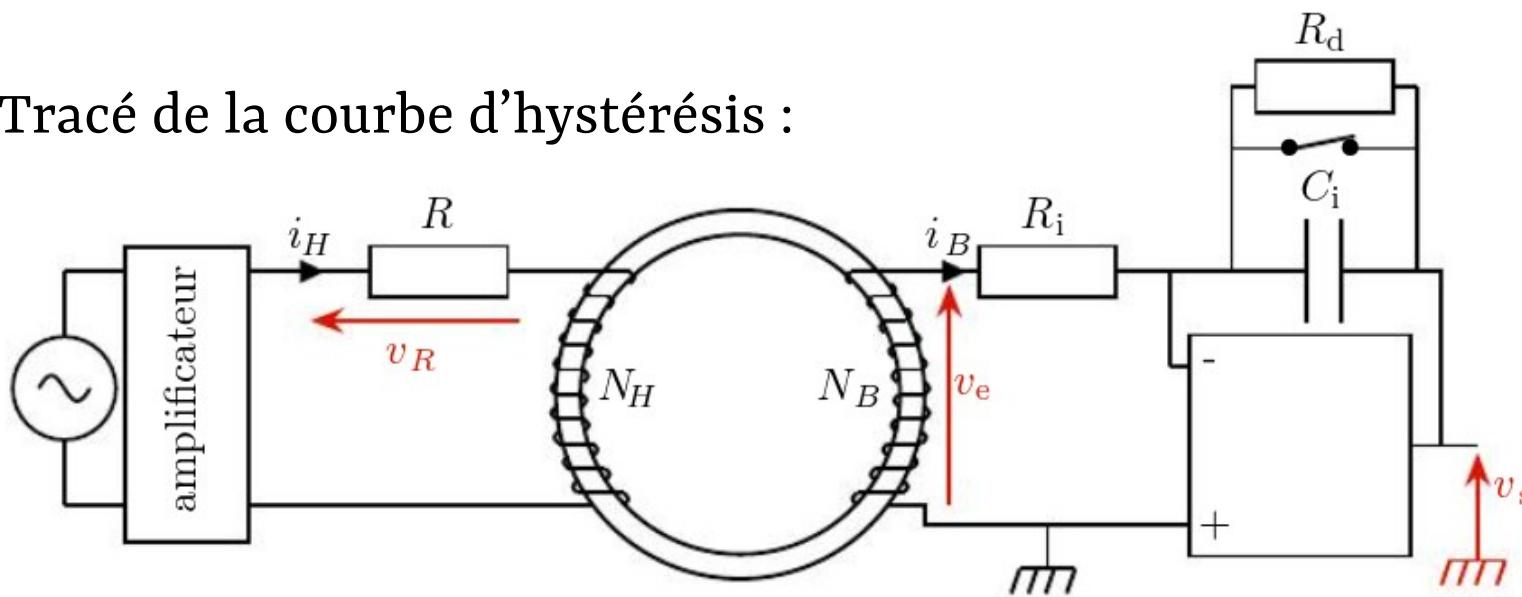


Essais de calcul du champ magnétique du tore

- Par une spire de courant ?
- Modélisation par un solénoïde fermé en spirale :

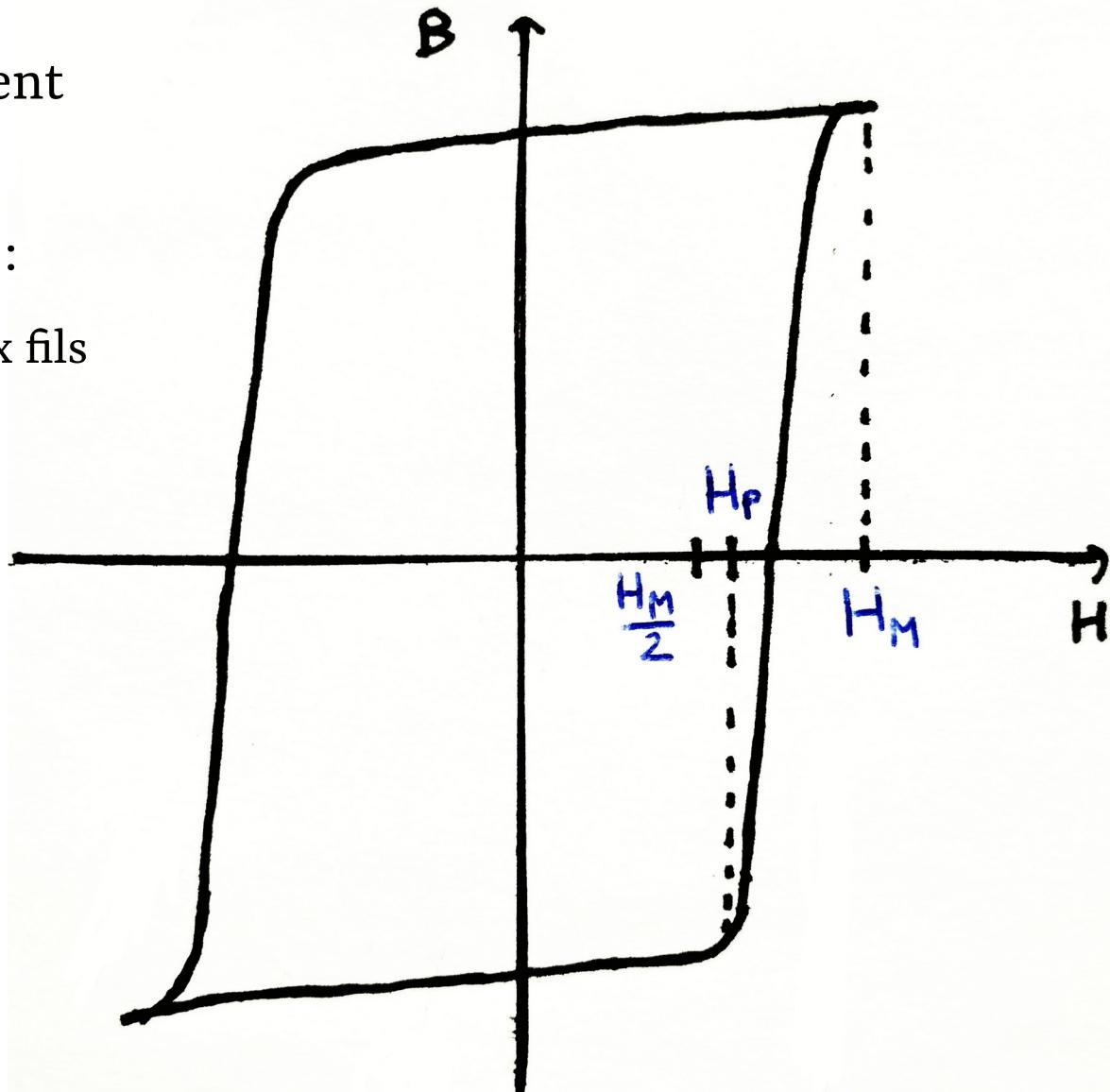


- Tracé de la courbe d'hystérésis :



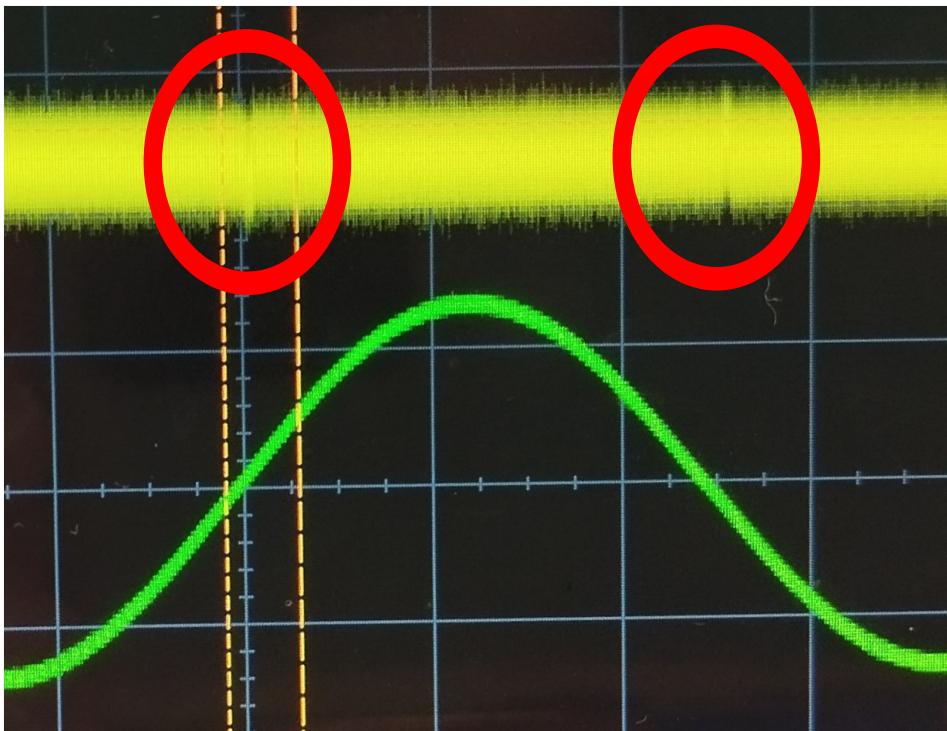
Choix du matériau

- Durée du retournement
- Boucle rectangulaire :
 - Condition pour deux fils
 - Robustesse
 - Coût énergétique

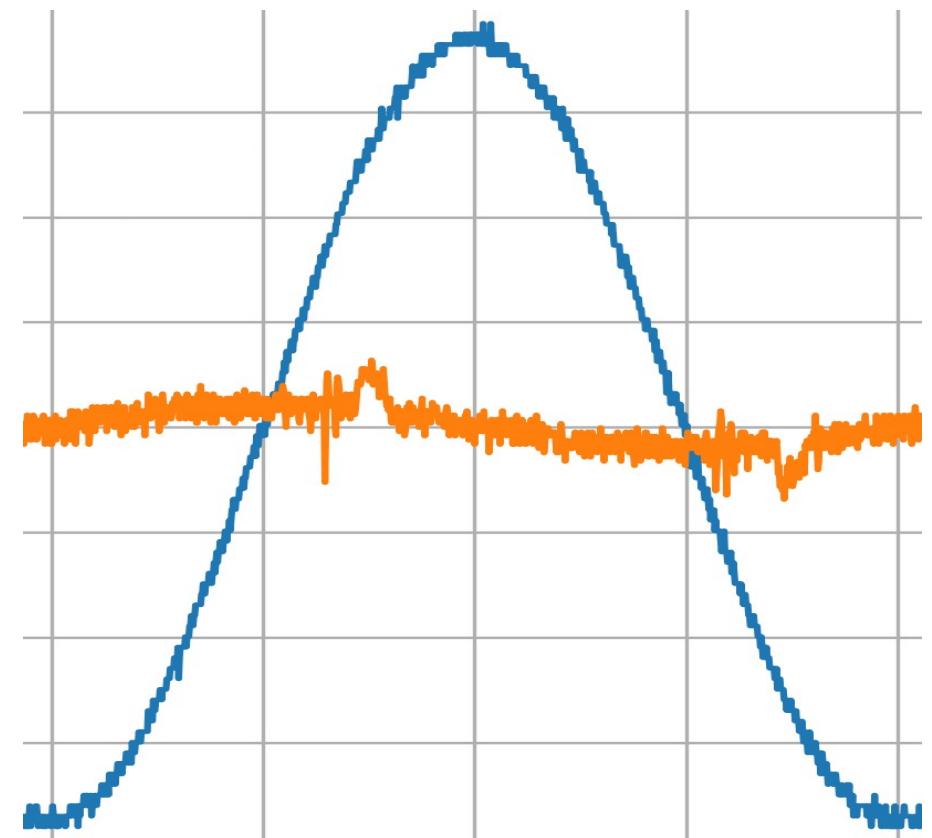


Problème du bruit

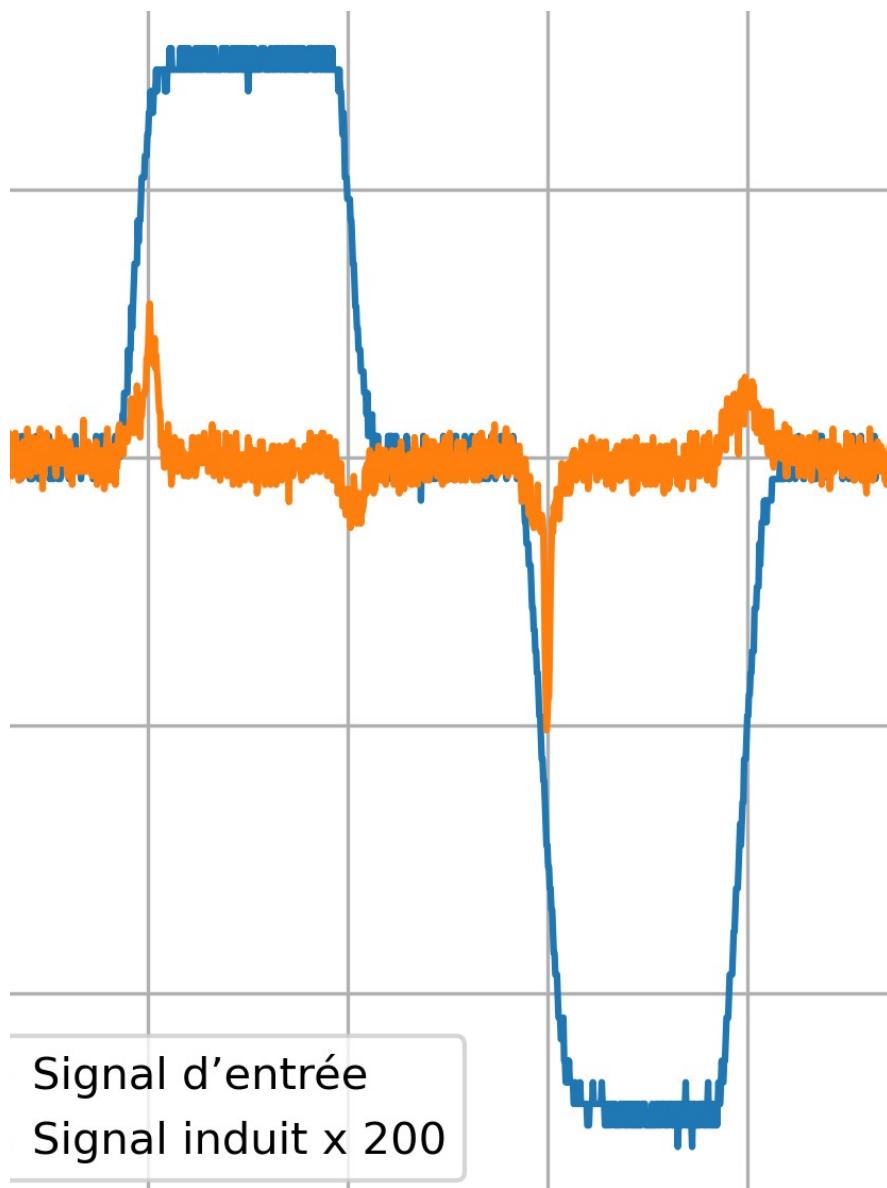
Premiers résultats



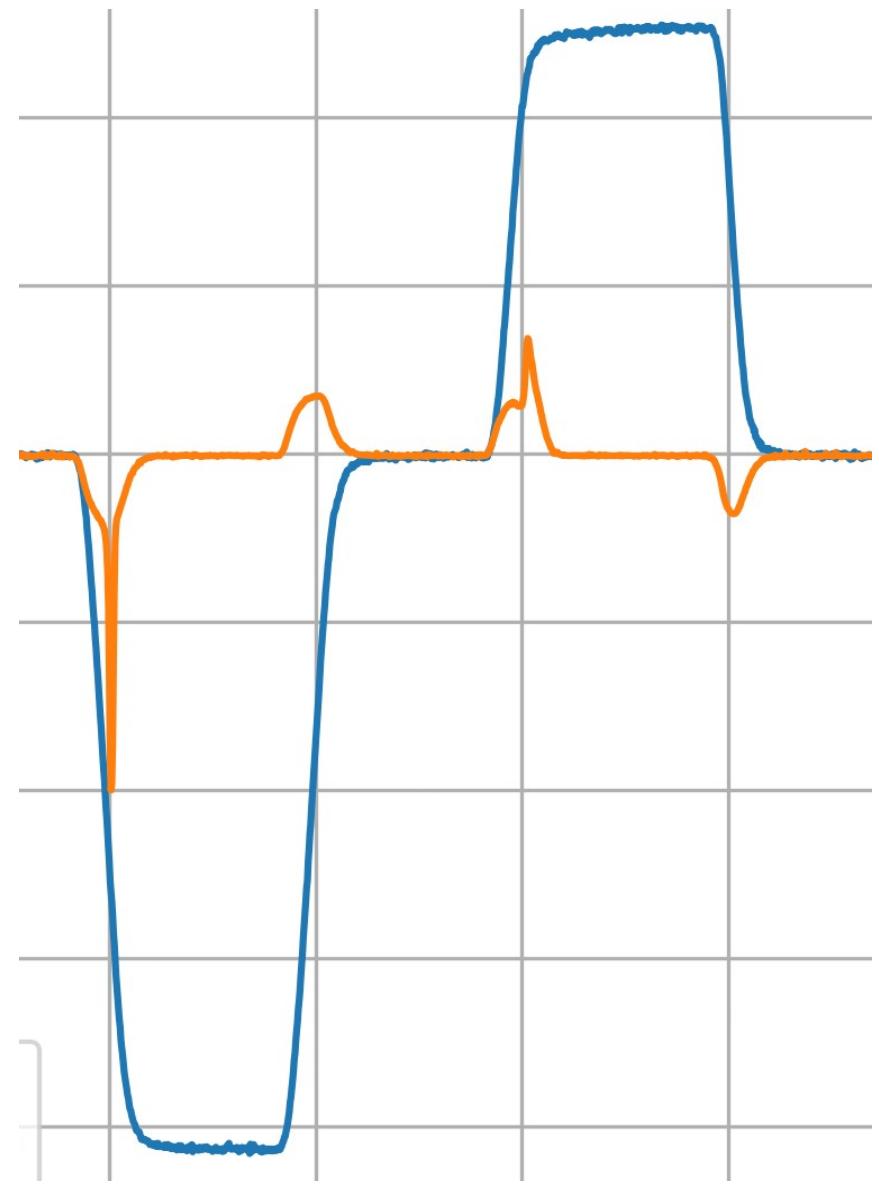
Avec maquette



Signal d'entrée adapté

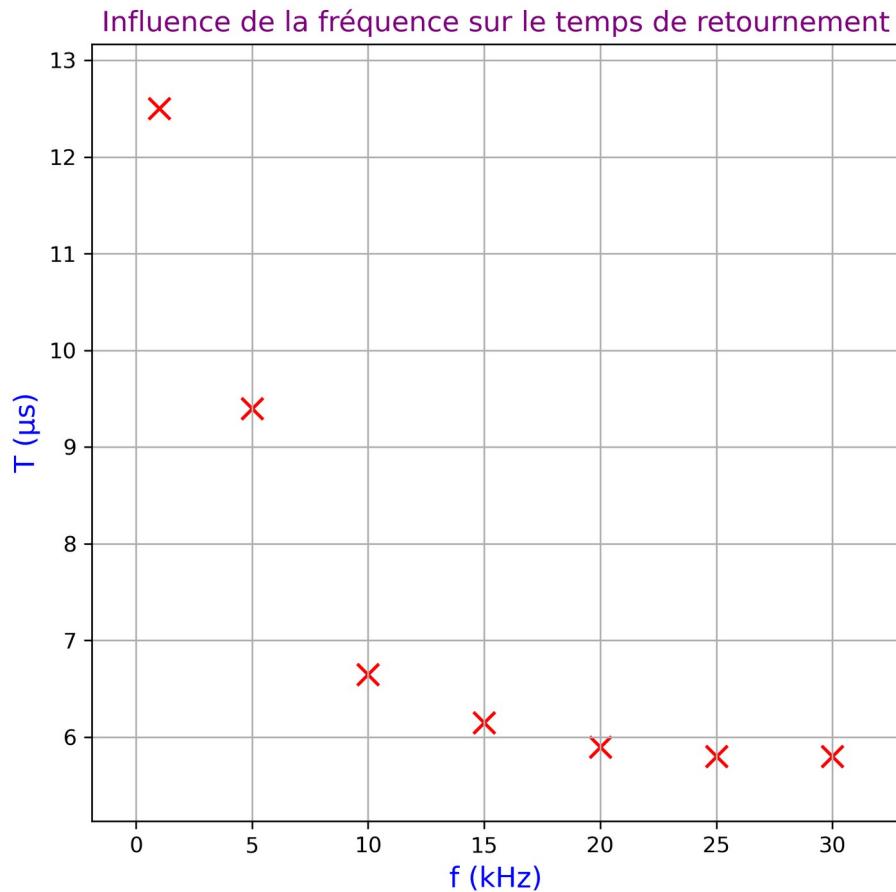


Moyennage

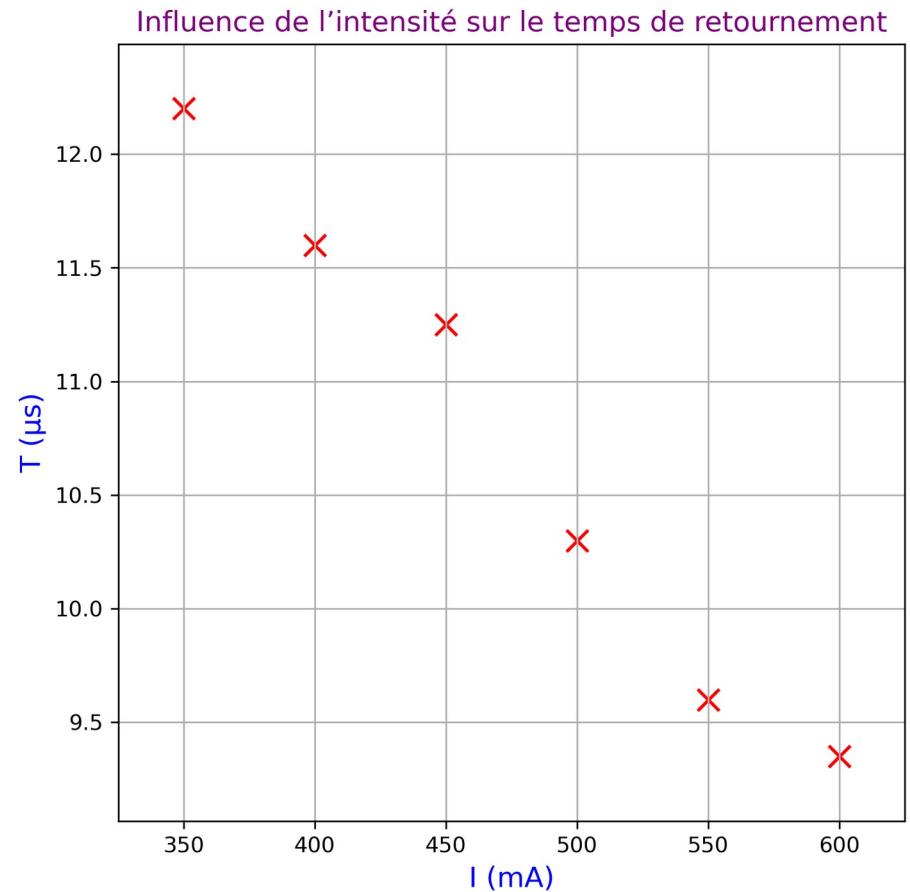


Vitesse des opérations :

- Durée du retournement à $I = 550 \text{ mA}$

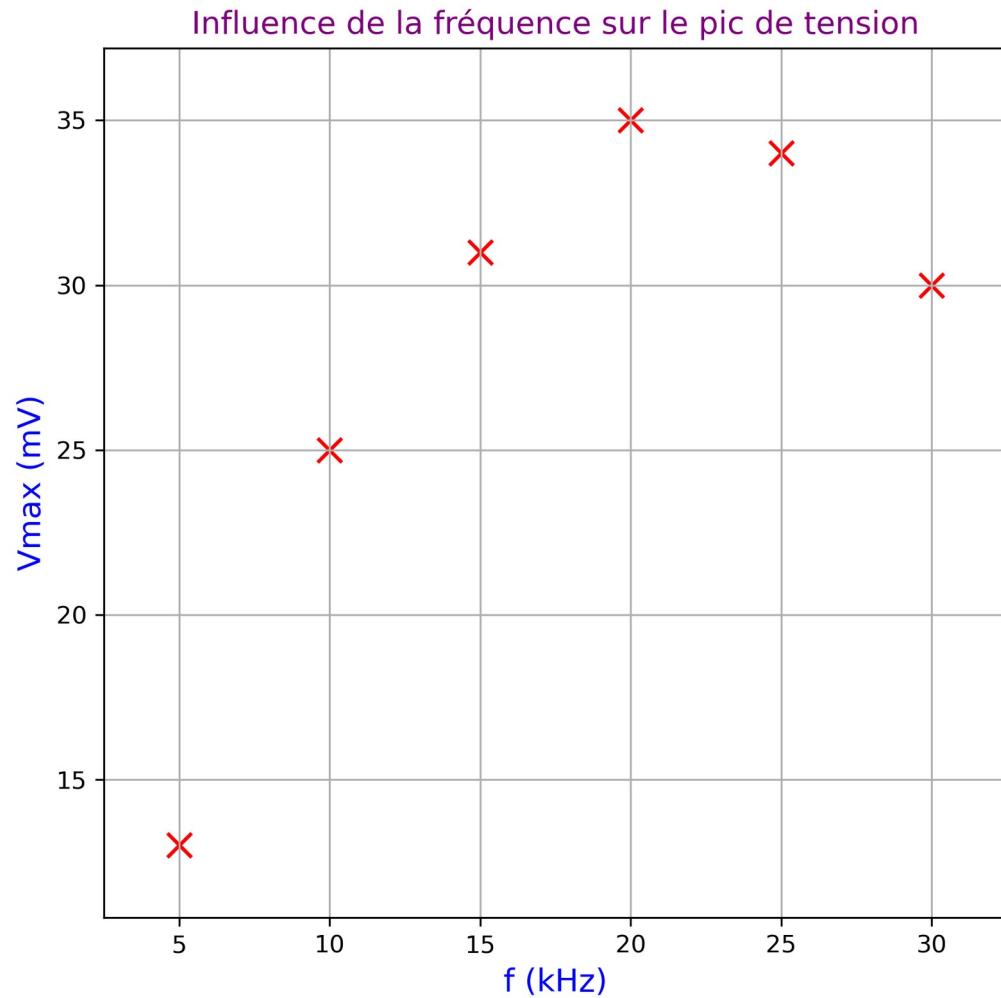


- Durée du retournement à $f = 5\text{kHz}$



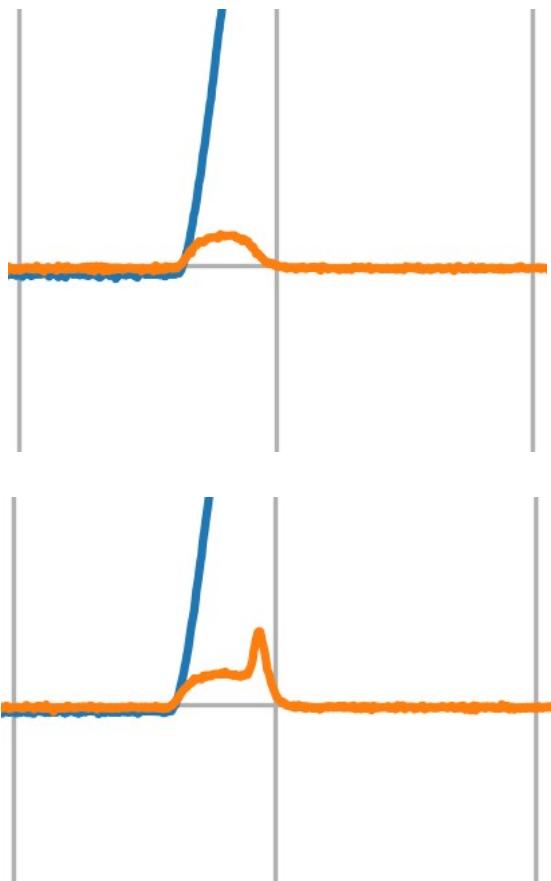
Signal induit

- Paramètre **fréquence** :
 - Temps minimal de **1µs** :
250 kHz
 - Mesures du pic de tension à **I = 550 mA** :

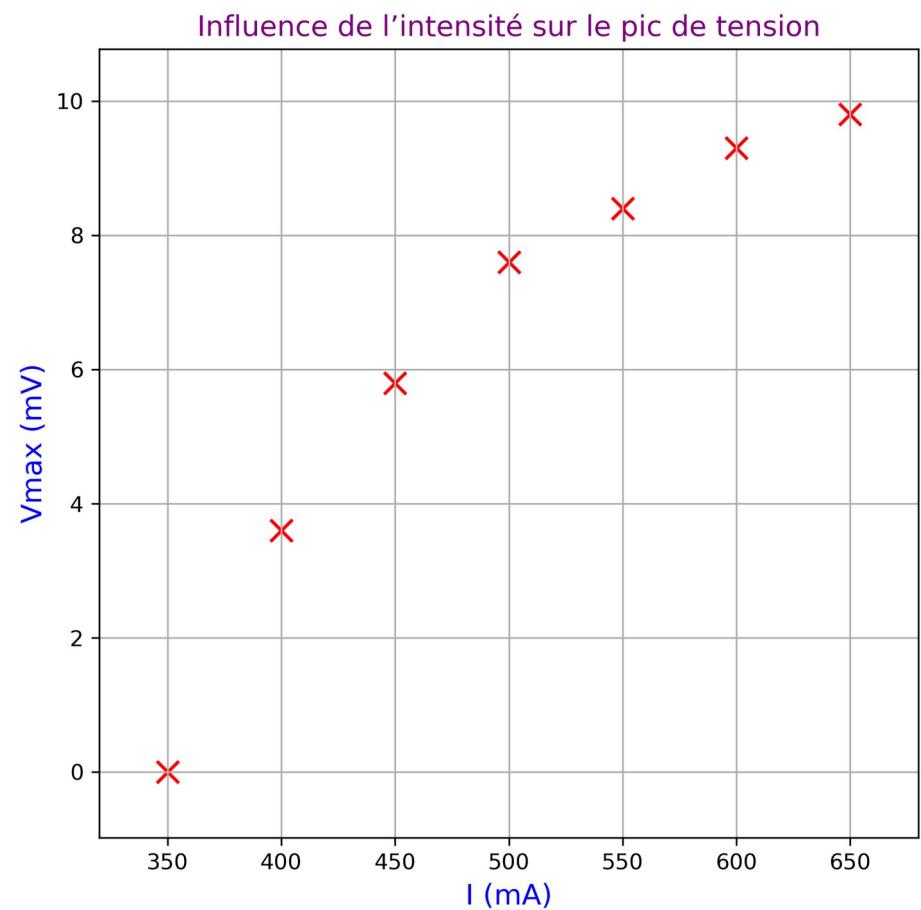


- Paramètre **Intensité**

- Seuil

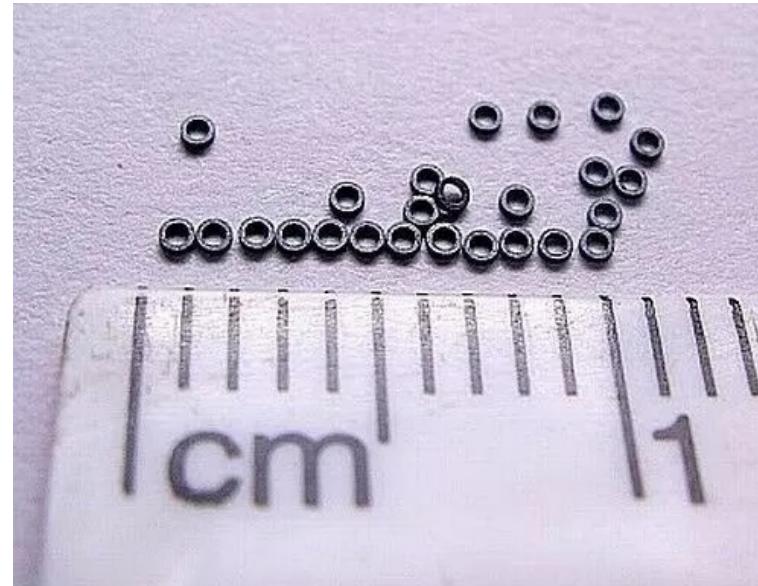
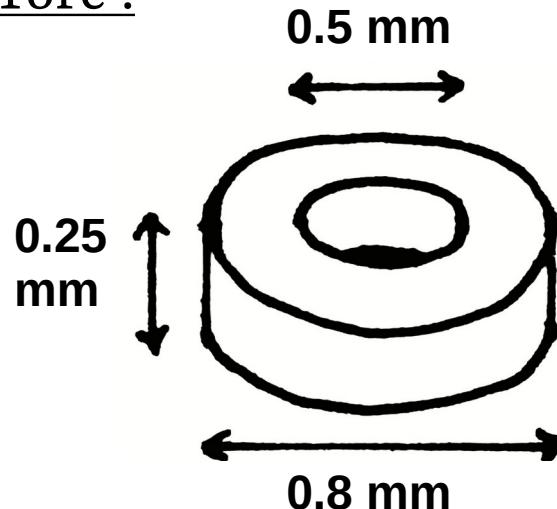


- Mesures du pic de tension induite à $f = 5 \text{ kHz}$



Valeurs utilisées

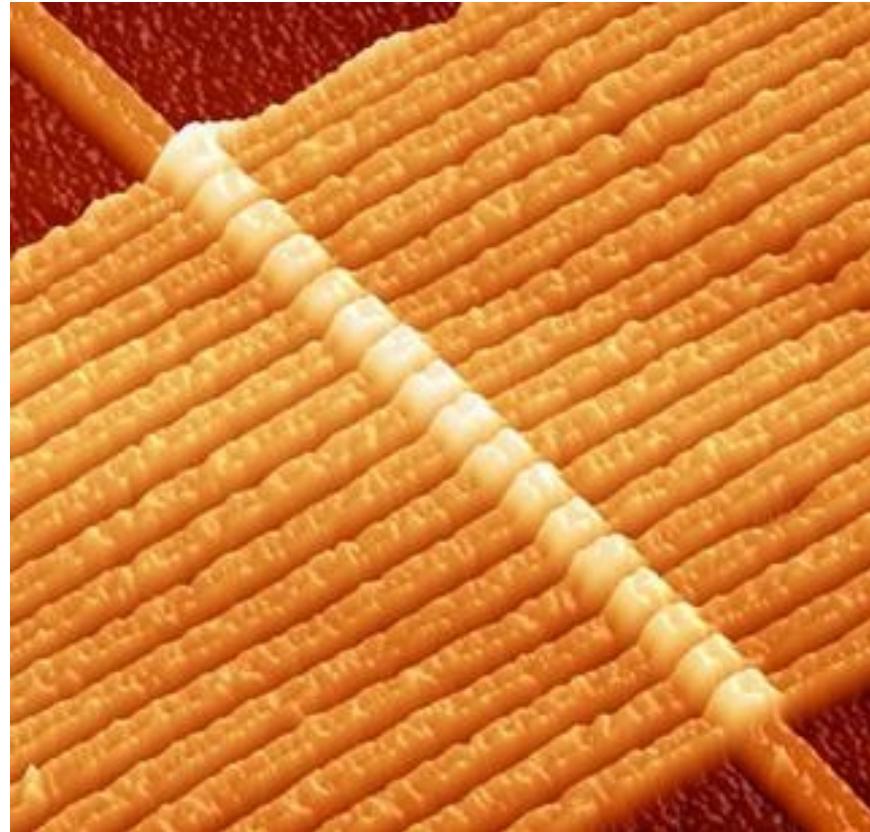
- Fil de diamètre $d = 0.1 \text{ mm}$
- Tore :



<https://www.ebay.fr/str/orpheus2005>

- $I/2 = 250 \text{ mA}$
- $T = 30 \mu\text{s}$
- Densité de stockage : 125 Ko/L ? **0.9 Ko/L**
- Opérations par secondes : **20 kHz**

Memristors



Ligne de 17 memristors, fils de 50nm de diamètre

<https://en.wikipedia.org/wiki/Memristor>

Le 4ème composant fondamental

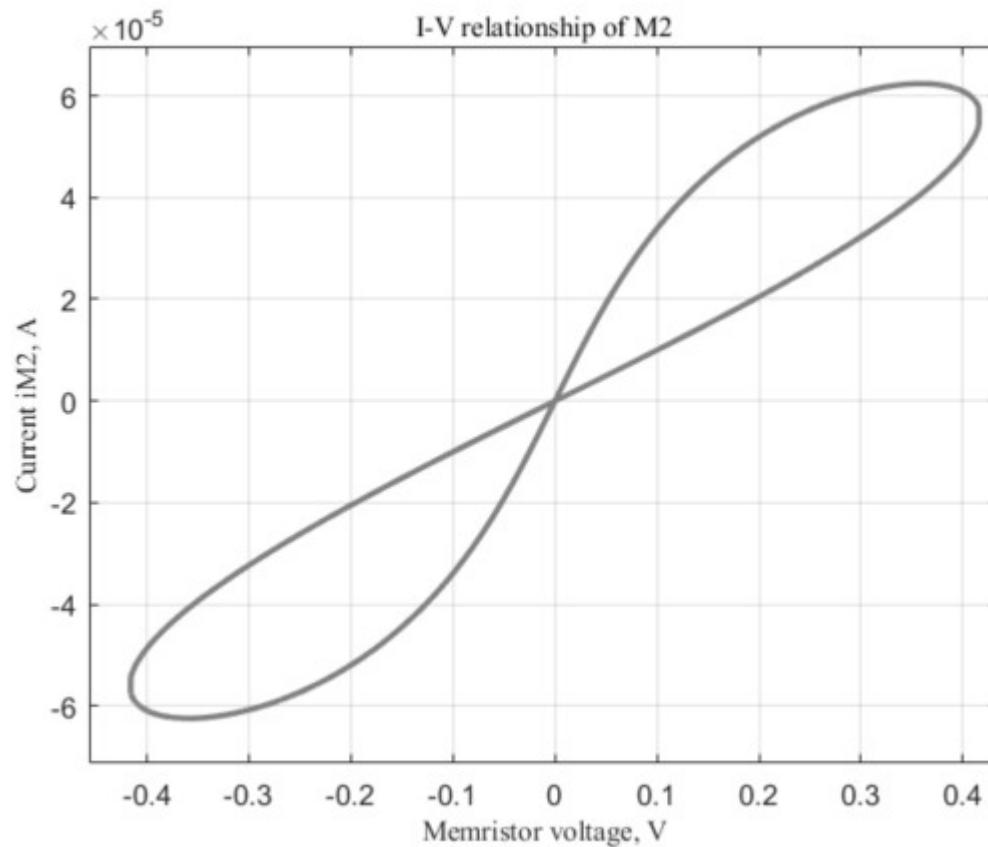
- **Memristor :**



Résistance M dépendant de l'historique de charge.

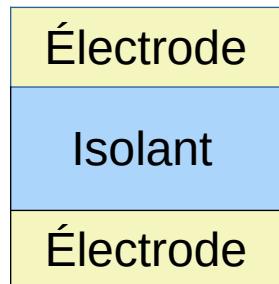
$$d\Phi = M \cdot dq$$

- Modèle théorique :

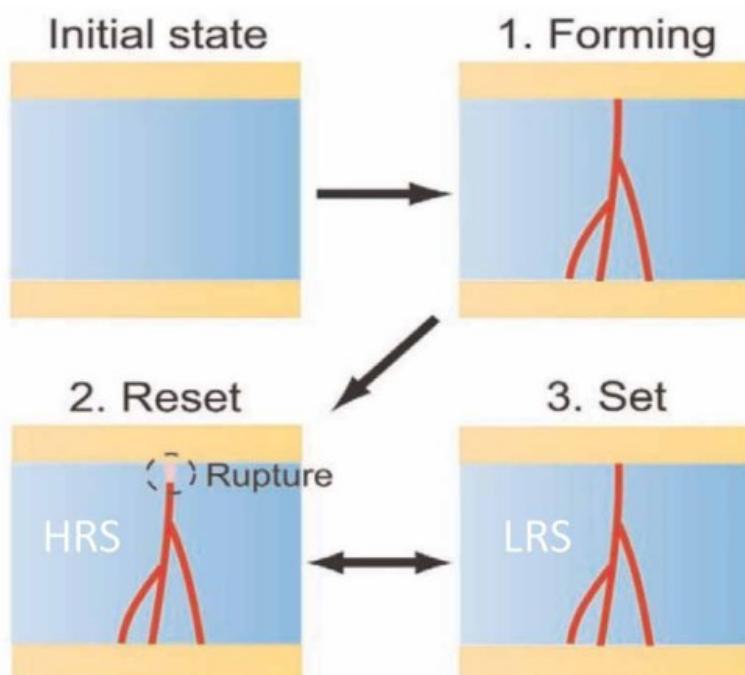


Fonctionnement

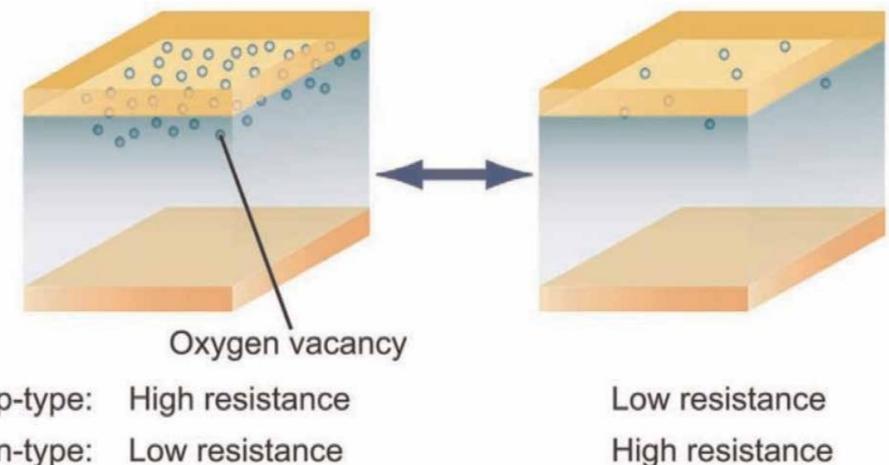
- Structure :



- Filament conducteur :



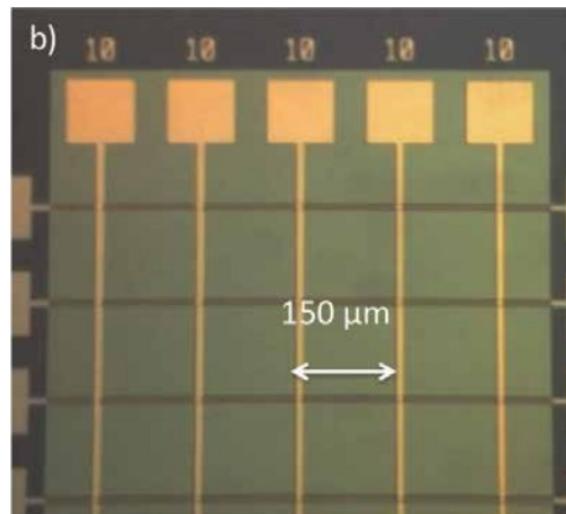
- Interface conductrice :



[10] Chapitre 7, Figures 14, 15

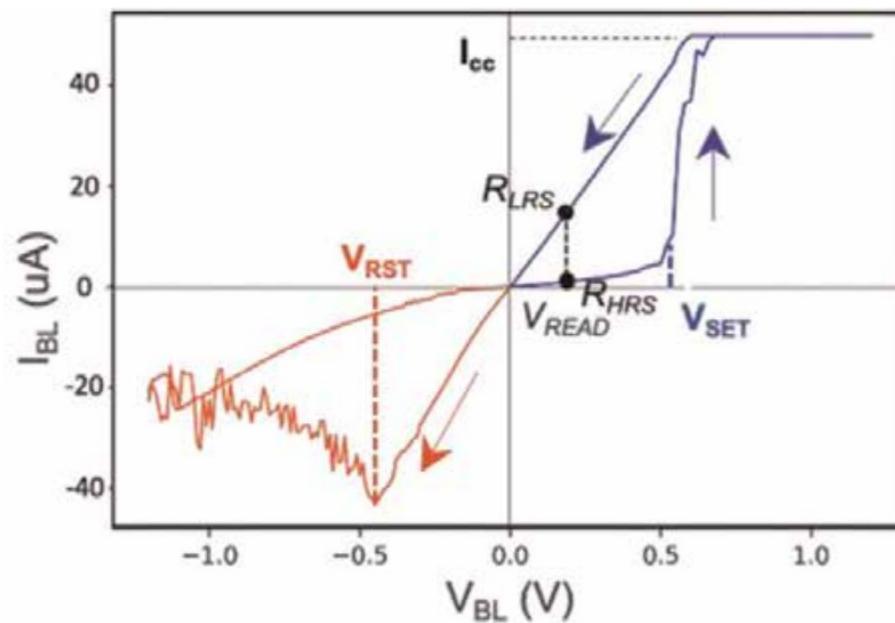
La RRAM

- Matrice :



[10] Chapitre 5, Figure 1

- Hystérésis :



[10] Chapitre 3, Figure 1

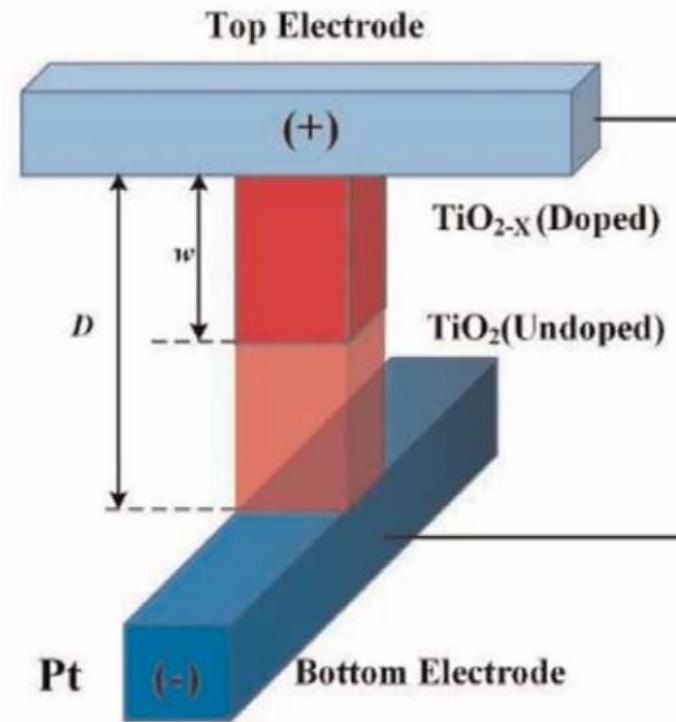
Modélisation basique

- État du memristor : $x = \frac{w}{D}$

- HRS : $x = 1$
 - LRS : $x = 0$

- Résistance équivalente :

$$R(x) = R_{\text{LRS}} \cdot x + R_{\text{HRS}} \cdot (1 - x)$$

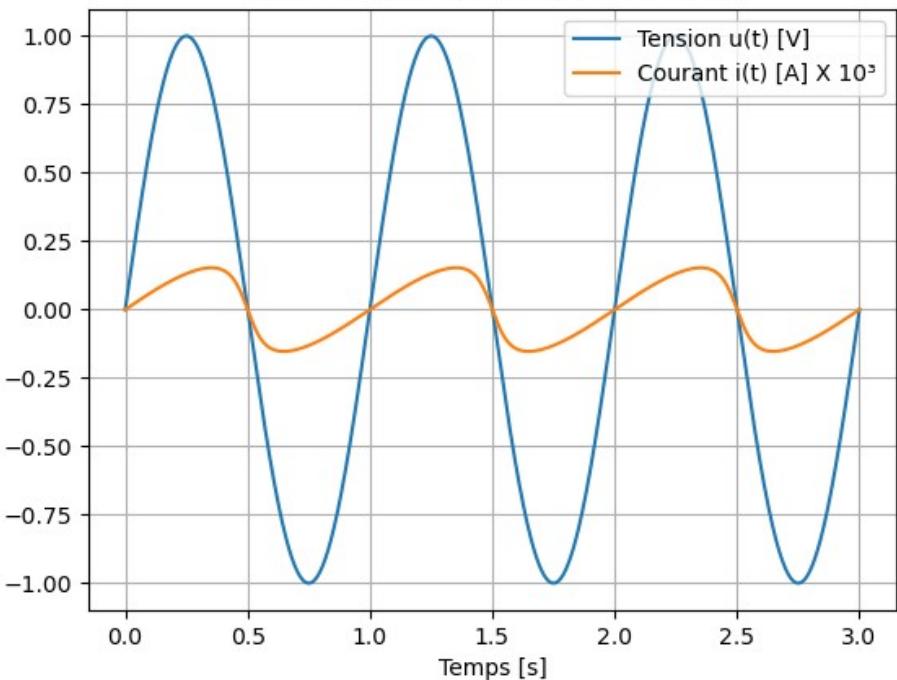


[9], Chapitre 6, Figure 10

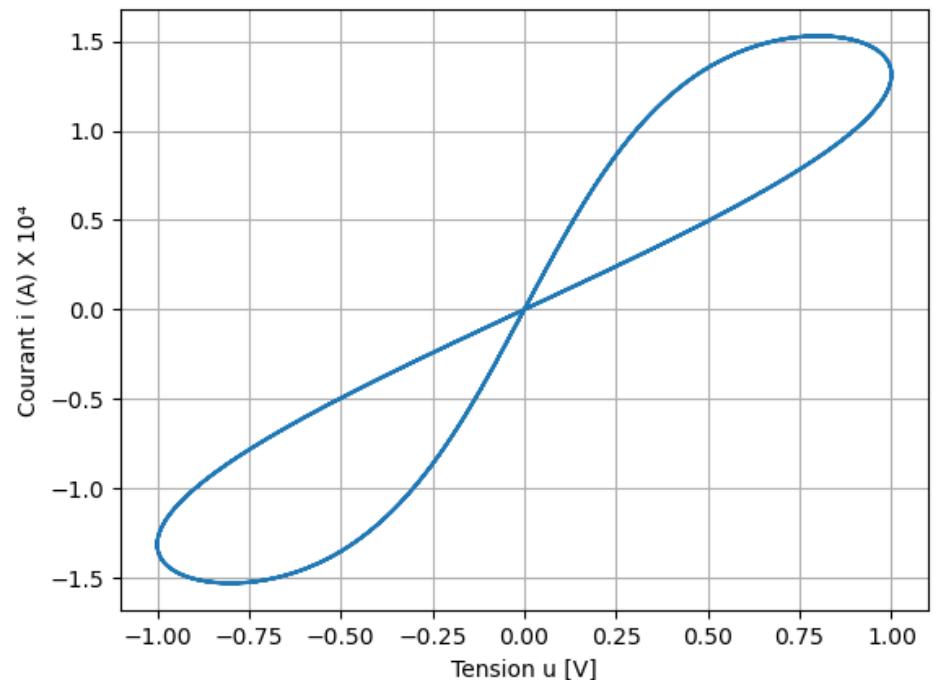
- Sous conditions :

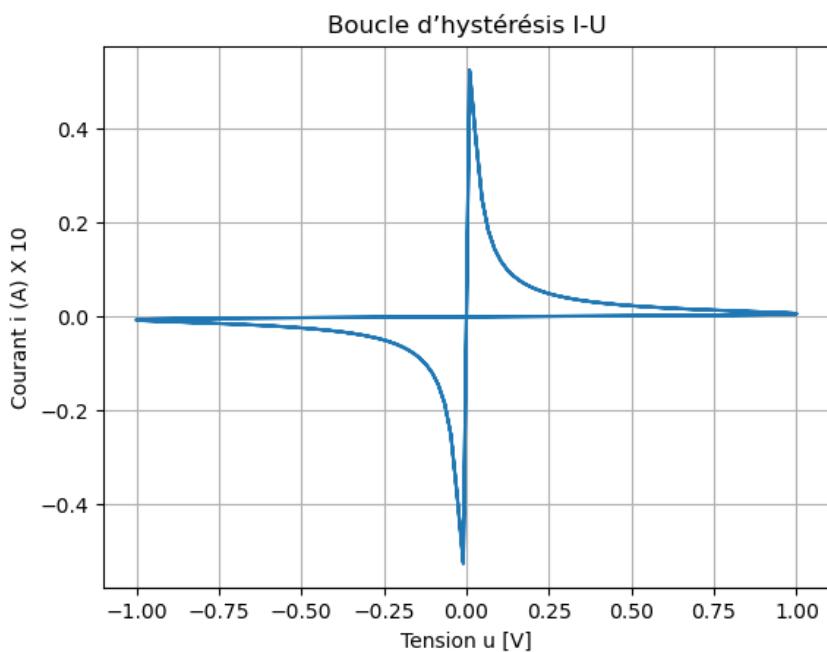
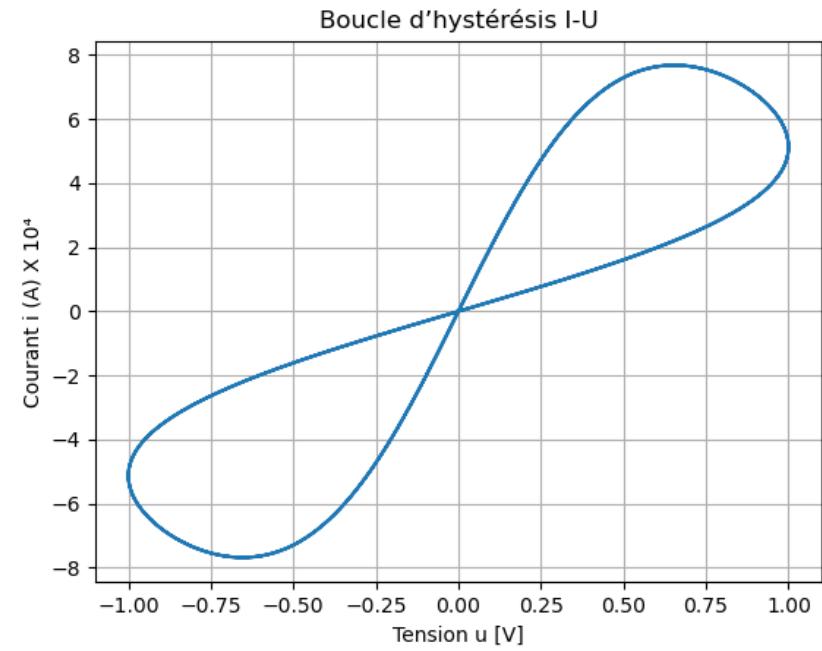
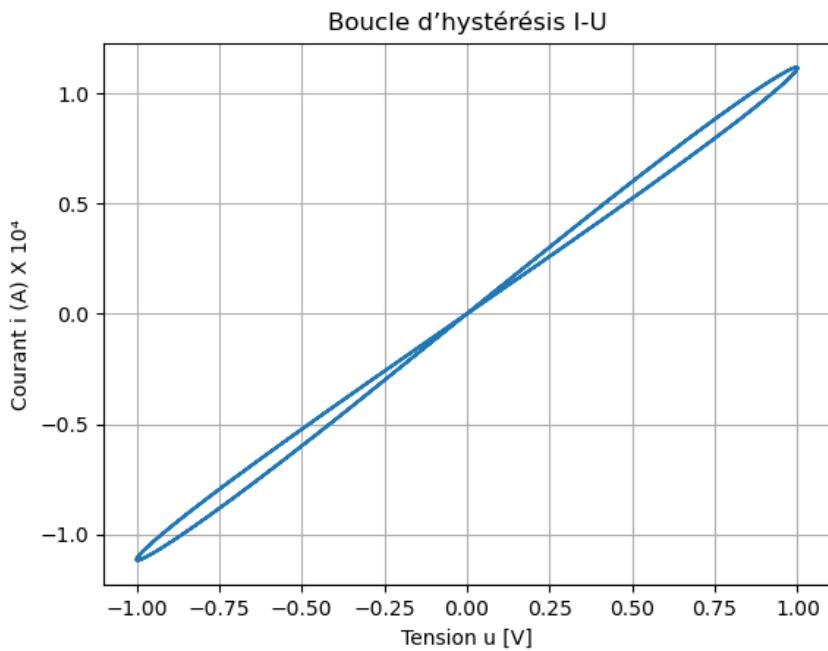
$$x \approx 1 - \sqrt{1 - \frac{2k}{R_{\text{HRS}}} \Phi + x_0^2 - 2x_0}$$

Tension et courant dans le memristor



Boucle d'hystérésis I-U





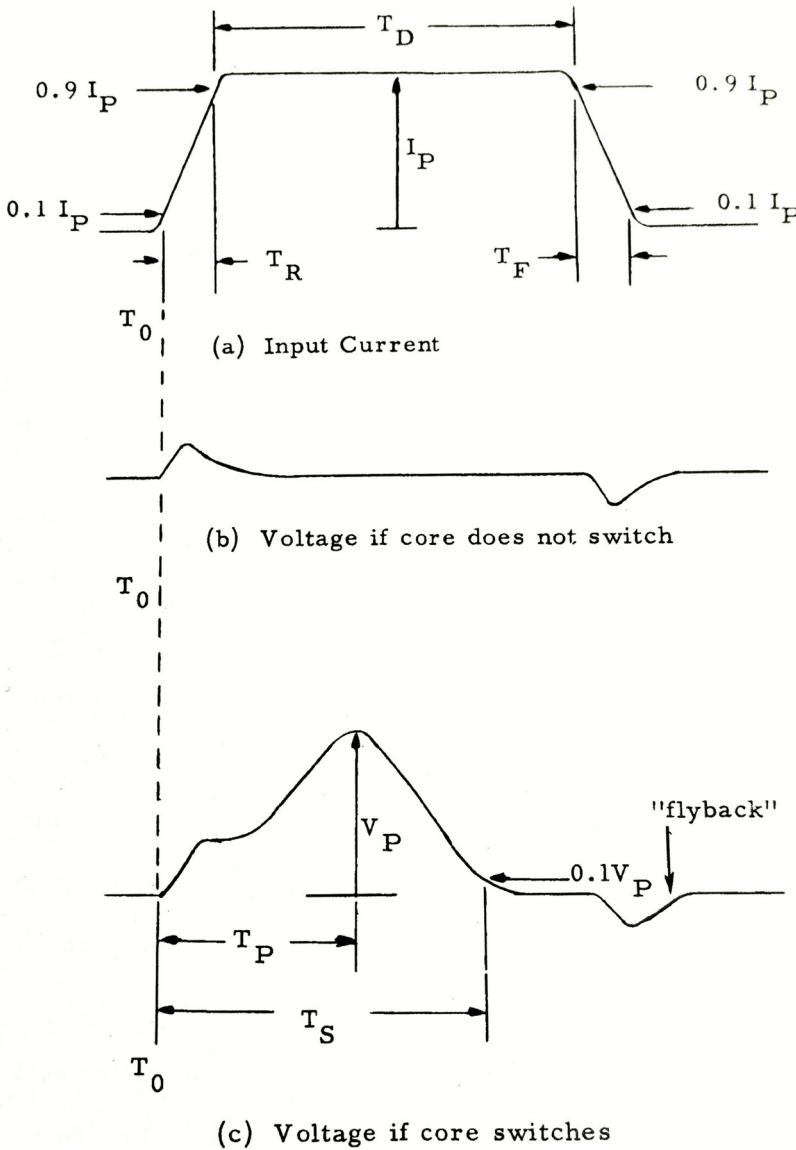
Conclusion

	Tores Ferro-magnétiques	Flash	RRAM	Holographique
Densité	0.9 Ko/L	4 F ²	1 F ²	1 To/cm ³
Vitesse de lecture	1 µs	75 µs	< 30 ns	~ 100 ns
Vitesse d'écriture	1 µs	500 µs	< 30 ns	~ µs
Énergie	1 µJ	1 nJ	0.064 nJ	10 nJ
Endurance (Cycles)	> 1 Md	100 k	1 M – 1 Md	> 1 Md
Température	10 ans à 125°C	1 an < 55°C < 85°C	10 ans à 125°C	Faible

Références bibliographiques

- [1] ARNAUD COURTI : Électricité et magnétisme
- [2] ETIENNE DU TRÉMOLET DE LACHEISSERIE ET AL. : Magnétisme I - Fondements
- [3] ETIENNE DU TRÉMOLET DE LACHEISSERIE ET AL. : Magnétisme II - Matériaux et applications
- [4] STUART F. DANIELS : Theory and design techniques for magnetic-core memories - Volume I
- [9] VALERI MLADENOV : Advanced Memristor Modeling
- [10] YAO-FENG CHANG : Memristors - The Fourth Fundamental Circuit Element - Theory, Device, and Applications : IntechOpen, 2024, ISBN 978-0-85466-167-1

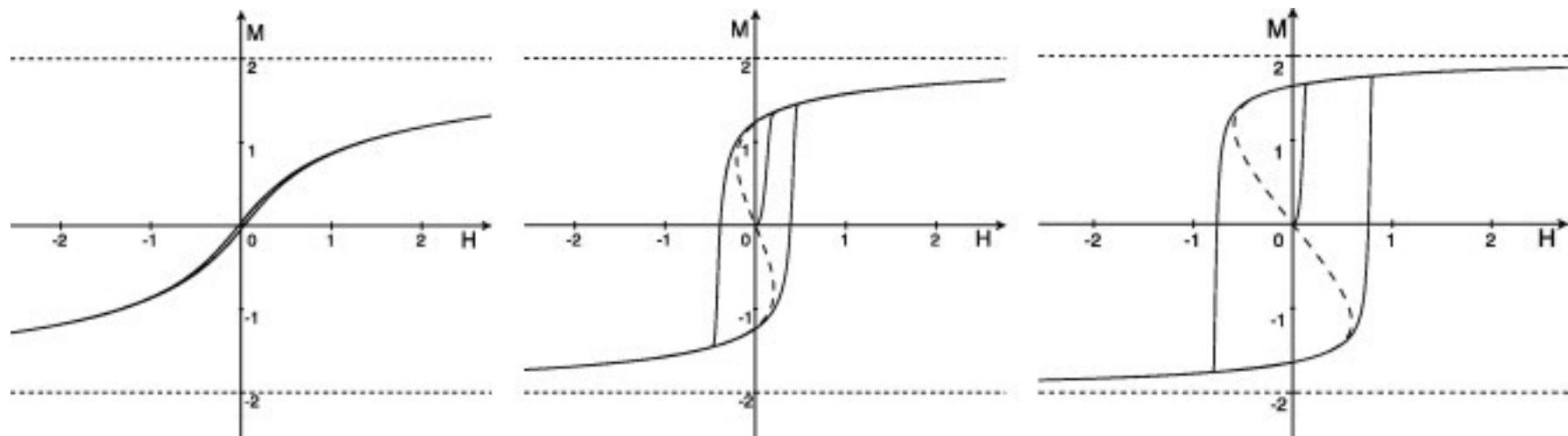
Annexe 1 : Signaux entrée et sortie



[4], Figure 4-3

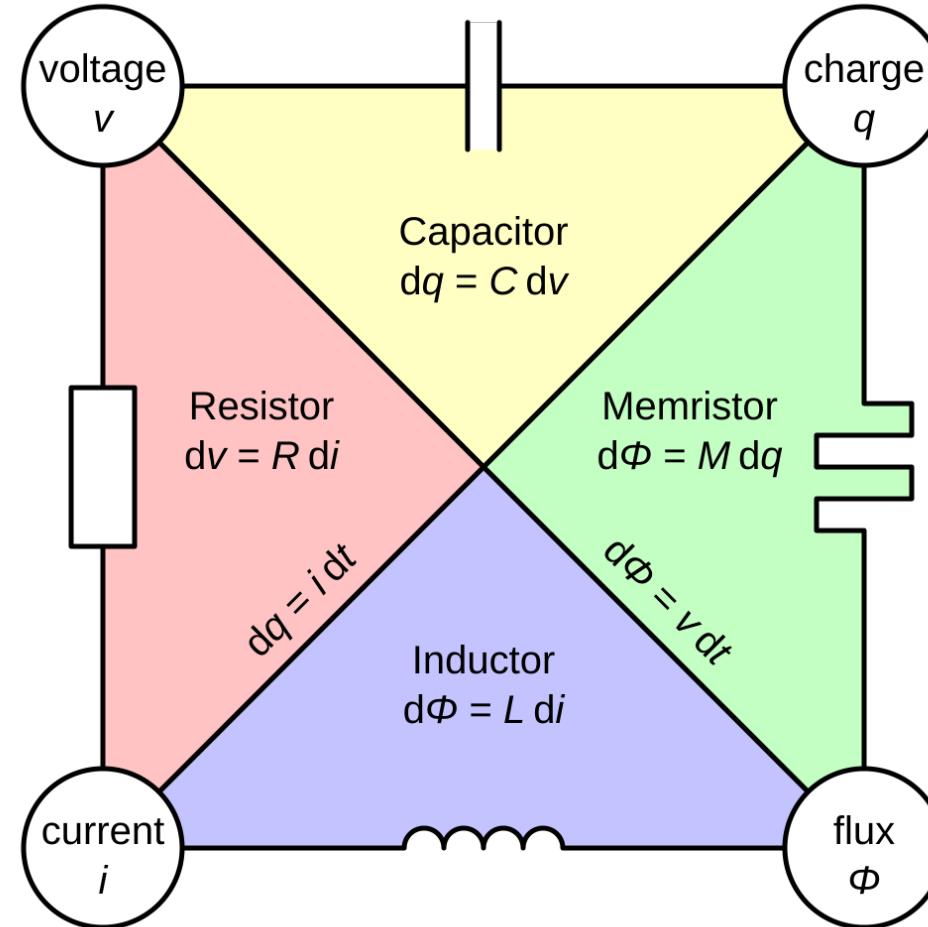
Annexe 2 : Effets de la température sur les tores

- Température de Curie
- Déformation du cycle d'hystérésis :



<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0307904X14003473#f0045>

Annexe 3 : La memristance



<https://en.wikipedia.org/wiki/Memristor>

Annexe 4 : Modélisation basique

État du memristor (proportion de la zone de dopage) : $x = \frac{w}{D}$

Résistance équivalente : $R(x) = R_{\text{LRS}} \cdot x + R_{\text{HRS}} \cdot (1 - x)$

Vitesse du front de dopage : $\frac{\partial w}{\partial t} = D \cdot \frac{\partial x}{\partial t}$

Égale à la vitesse des ions : $\frac{\partial w}{\partial t} = \mu \cdot E_w$

avec $E_w = \frac{u_w}{w} = \frac{R_{\text{LRS}} \cdot i}{D}$ la norme du champ électrique

On obtient l'équation : $\frac{\partial x}{\partial t} = \mu \cdot \frac{R_{\text{LRS}}}{D^2} \cdot i = k \cdot i$

où $k = \mu \cdot \frac{R_{\text{LRS}}}{D^2}$

Ainsi d'après la loi d'Ohm : $[(R_{\text{LRS}} - R_{\text{HRS}})x + R_{\text{HRS}}] dx = k \cdot u dt$

On intègre depuis l'état initial : $\frac{R_{\text{LRS}} - R_{\text{HRS}}}{2} (x^2 - x_0^2) + R_{\text{HRS}}(x - x_0) = k \cdot \Phi$

avec $\Phi = \int_0^t u(\tau) d\tau$

On obtient une équation polynomiale de discriminant :

$$\Delta = R_{\text{HRS}}^2 + 2(R_{\text{LRS}} - R_{\text{HRS}}) \left[k\Phi + \frac{R_{\text{LRS}} - R_{\text{HRS}}}{2} x_0^2 + R_{\text{HRS}} x_0 \right]$$

La racine inférieure à 1 est : $x = \frac{-R_{\text{HRS}} + \sqrt{\Delta}}{R_{\text{LRS}} - R_{\text{HRS}}}$

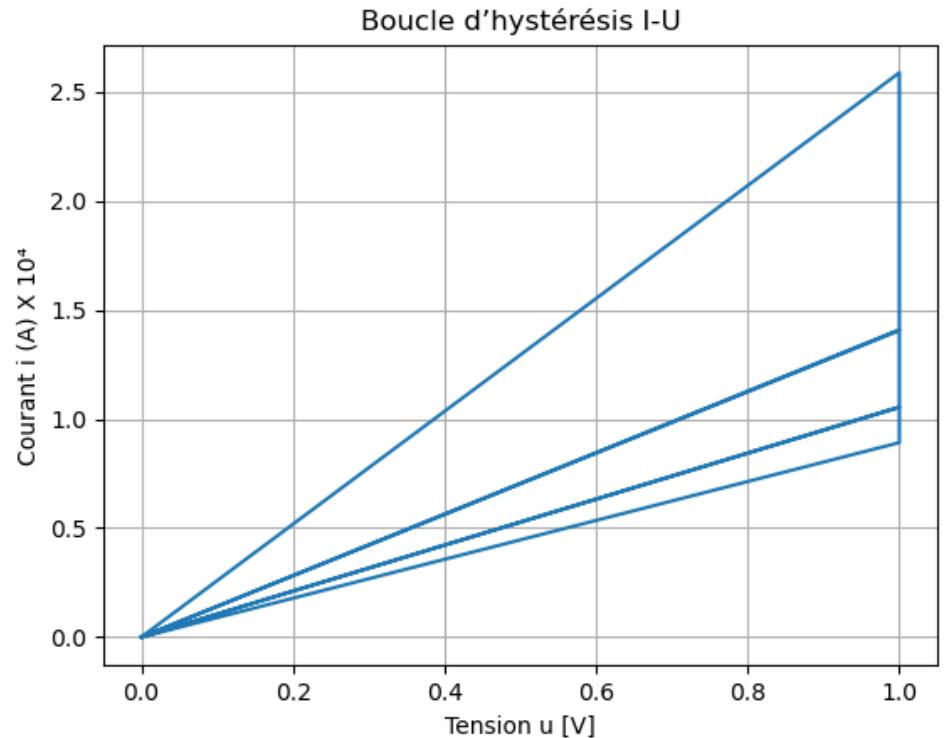
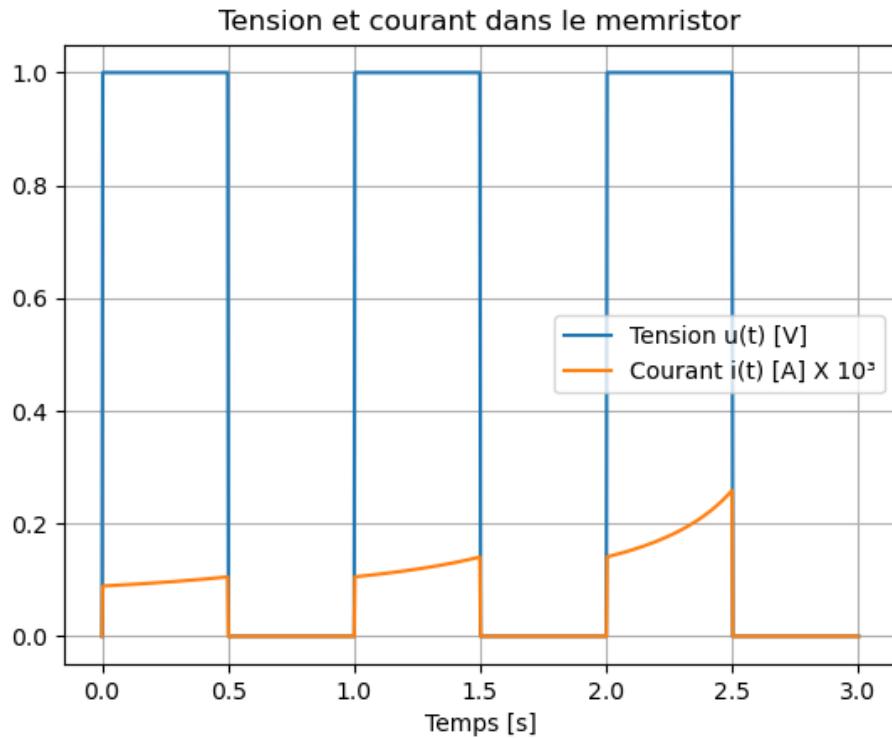
Or par hypothèse $R_{\text{HRS}} \gg R_{\text{LRS}}$ donc : $x \approx 1 - \sqrt{1 - \frac{2k}{R_{\text{HRS}}} \Phi + x_0^2 - 2x_0}$

Annexe 5 : Modélisation python

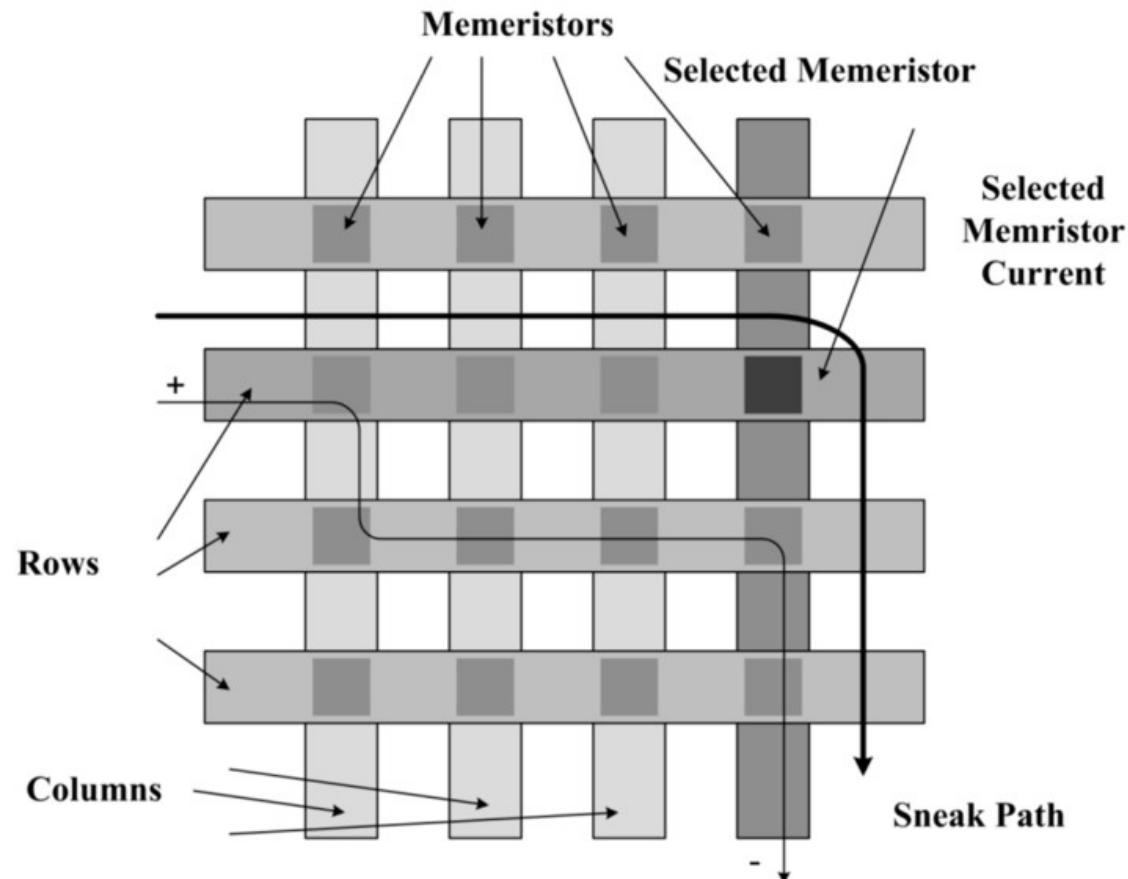
```
1 import numpy as np
2 import matplotlib.pyplot as plt
3 from scipy.integrate import cumtrapz
4
5 ### PARAMÈTRES ###
6
7     # Memristor
8 mu = 1e-14 # m²/V/s
9 D = 10e-9 # m
10 R_lrs = 100 # Ω
11 R_hrs = 16000 # Ω
12 k = mu * R_lrs / D**2
13
14     # Signal d'entrée
15 T = 1e0 # s
16 f = 1/T # Hz
17 t = np.linspace(0, 3*T, 1000) # s
18 dt = t[1] - t[0]
19
20 u_sin = np.sin(2 * np.pi * f * t) # V
21 u_alt = np.sign(np.sin(2 * np.pi * f * t))
22 u_pos = (u_alt + 1)/2
23 u_pos[0] = 0
24
25 u_carre = np.zeros_like(t)
26 etape = int(1000 / (3 * 4)) # points par section
27 for i in range(0, len(t), etape):
28     j = i // etape
29     if j % 4 == 0: valeur = 1
30     elif j % 4 == 2: valeur = -1
31     else: valeur = 0
32     u_carre[i:i+etape] = valeur
```

```
35 ### RÉSOLUTION ###
36
37 u = u_sin
38 x0 = 0.7
39 phi = cumtrapz(u, t, initial=0) # intégrale de u
40
41     # Modèle simple
42 sous_racine = 1 - 2*k*phi/R_hrs + x0**2 - 2*x0
43 x_s = 1 - np.sqrt( np.maximum(sous_racine,0) )
44
45     # Modèle de Strukov et Williams
46 x_sw = x0 * np.exp(k * phi / R_hrs)
47
48 x = x_s
49 R = R_lrs * x + R_hrs * (1 - x)
50 i = u/R
51
52 ### TRACÉS ###
53
54 plt.figure(1)
55 plt.plot(t, u, label='Tension u(t) [V]')
56 plt.plot(t, i * 1e3, label='Courant i(t) [A] X 10³')
57 plt.title("Tension et courant dans le memristor")
58 plt.xlabel("Temps [s]")
59 plt.legend()
60 plt.grid()
61
62 plt.figure(2)
63 plt.plot(u, i* 1e4)
64 plt.title("Boucle d'hystéresis I-U")
65 plt.xlabel("Tension u [V]")
66 plt.ylabel("Courant i (A) X 10⁴")
67 plt.grid()
68
69 plt.show()
```

Annexe 6 : Mémoire du memristor

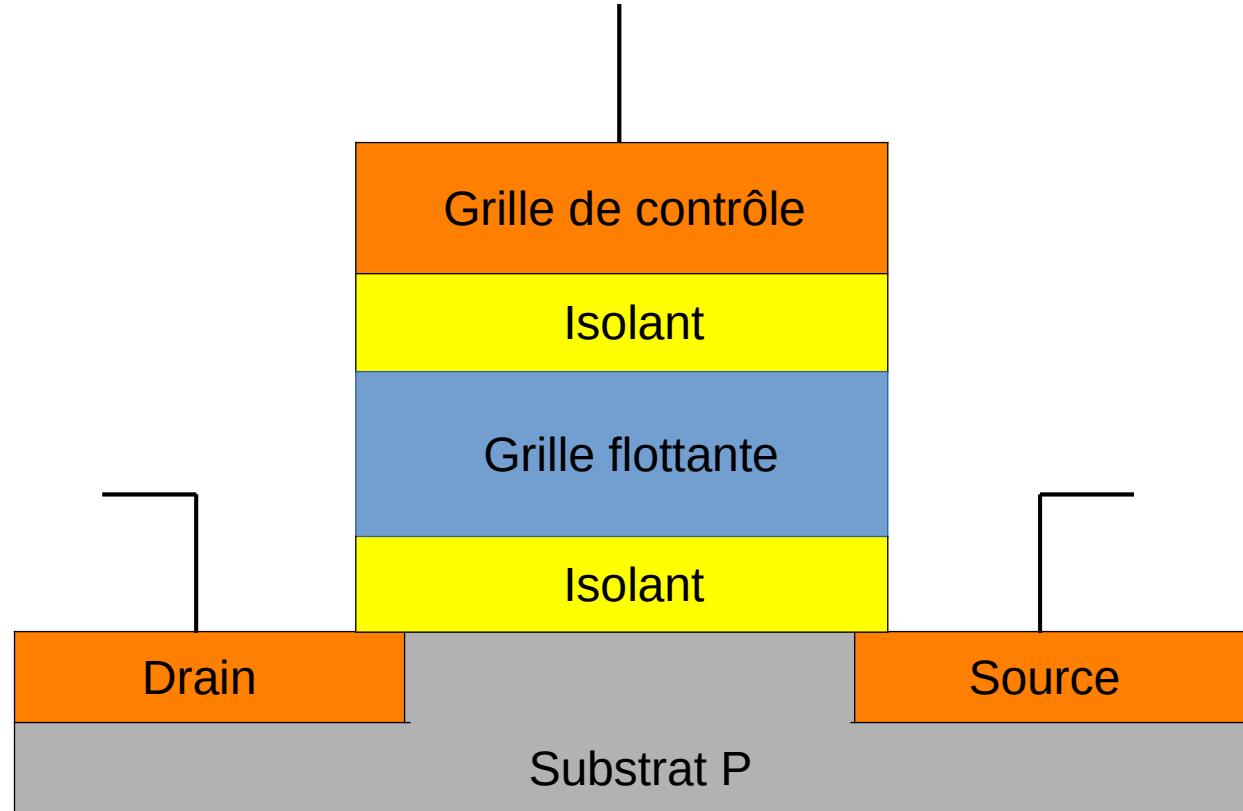


Annexe 7 : Problème sur la RRAM



[9], Chapitre 4, Figure 123

Annexe 8 : Mémoire Flash



Annexe 9 : HDD (Disque dur)



[https://www.futura-sciences.com/tech/dossiers/informatique-
stockage-donnees-informatiques-105/page/3/](https://www.futura-sciences.com/tech/dossiers/informatique-stockage-donnees-informatiques-105/page/3/)