

Matériaux magnétiques doux pour la conversion d'énergie

Frédéric MAZALEYRAT

SATIE UMR 8029 CNRS, ENS Paris-Saclay



- **Introduction**
- **Ferrites pour l'électronique de puissance**
- **Technologie LTCC développée par THALES R&T**
- **Technologie SPS développée par SATIE**
- **Alliages métalliques nanocristallins**
- **Poudres métalliques liées**



- Transformateur SMPS
- Transformateur d'impulsion (GTO)
- Transformateur de commande (IGBT)
- Inductance couplée
- Inductance de lissage
- Spike killer
- Filtre mode différentiel
- Filtre mode commun
- Ampli magnétique
- Transformateur de courant
- Noyau pour sonde de Hall

- Introduction
- **Ferrites pour l'électronique de puissance**
- Technologie LTCC développée par THALES R&T
- Technologie SPS développée par SATIE
- Alliages métalliques nanocristallins
- Poudres métalliques liées

Ferrite spinelle

$M^{2+} Fe_2^{3+} O_4^{2-}$, avec $M^{2+} = Mn (5 \mu_B), Fe (4 \mu_B), Co (3 \mu_B),$

$Ni (2 \mu_B), Cu (1 \mu_B), Zn (0 \mu_B)$

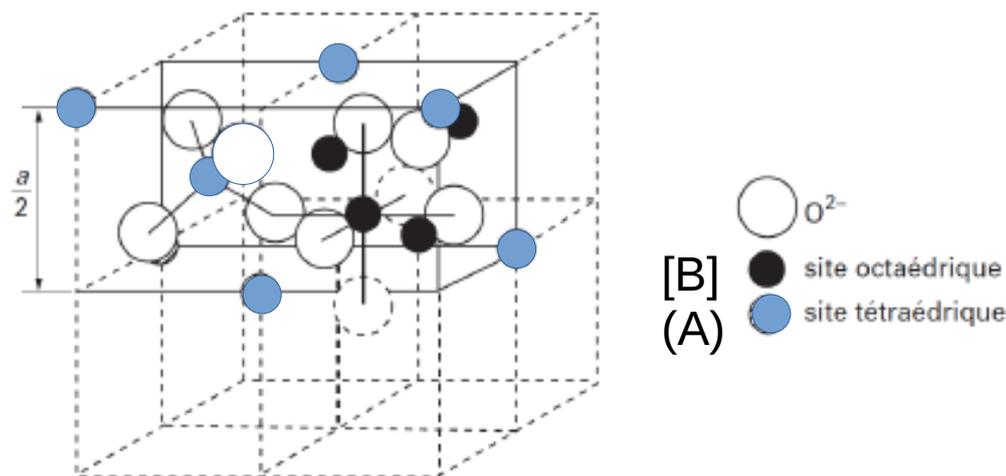
MnZn

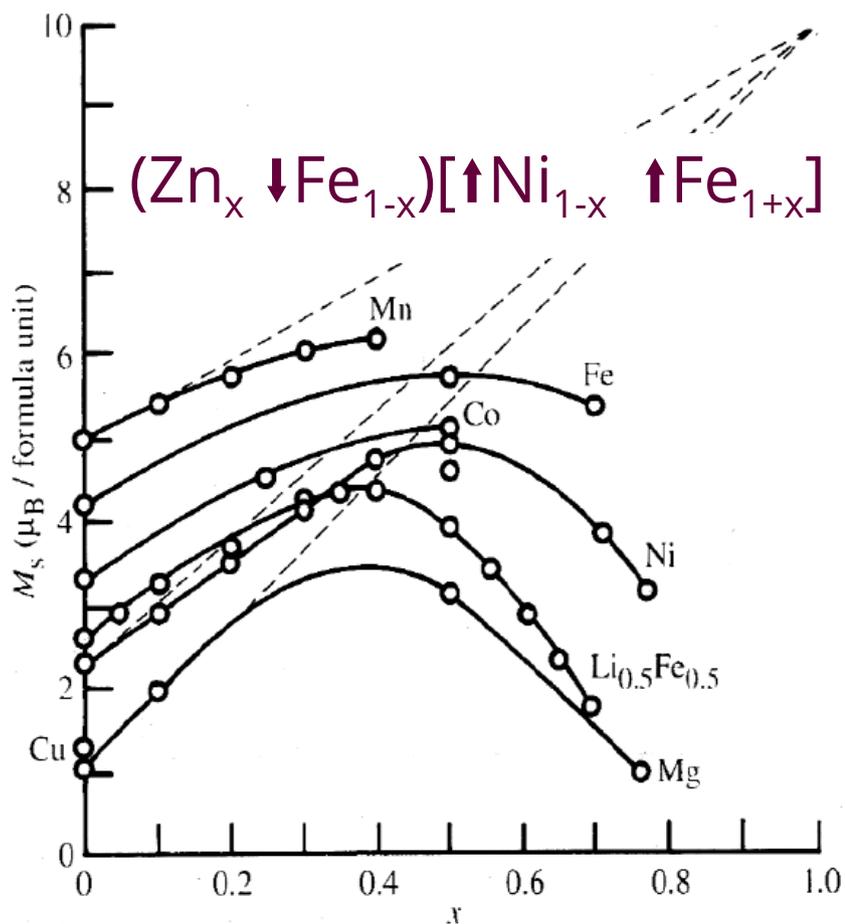
Ferrite mixte, forte aimantation

NiZn

Ferrite mixte, forte résistivité

$(Zn_x \downarrow Fe_{1-x})[\uparrow Ni_{1-x} \uparrow Fe_{1+x}]$





Ni Zn

Possibilités de substitutions

Ni : résistivité

Zn : aimantation

Co : anisotropie

Cu : température de frittage

$(\downarrow Fe) [\uparrow Ni \uparrow Fe]$

$(Zn) [\downarrow Fe \uparrow Fe]$

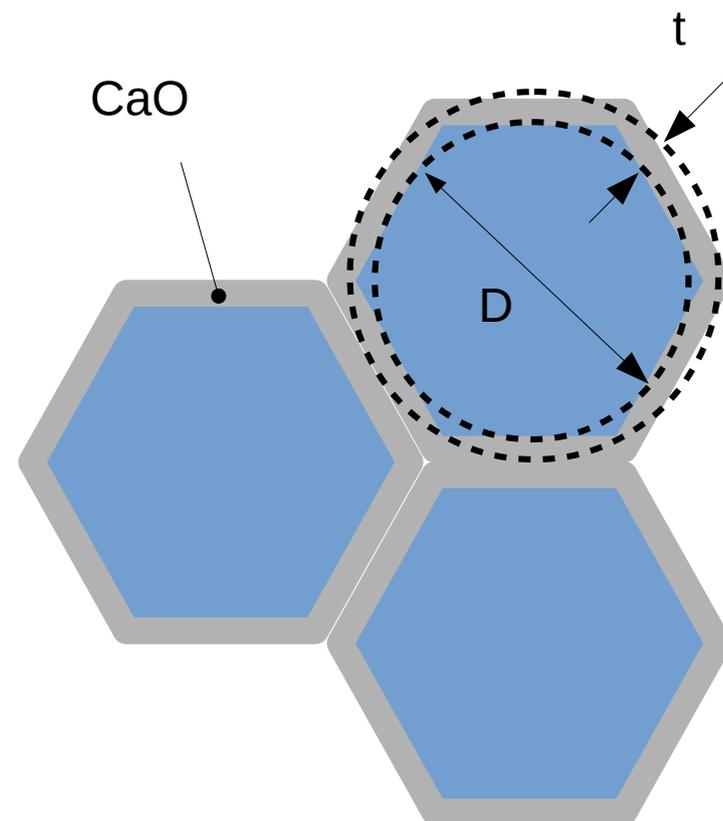
Application	Main parameter	Zn content	T_C (°C)	M_S (T) 0 K	M_S (T) 300 K
Telecom transformers	M_S	0.2	250	0.7	0.54
Power transformers	T_C, M_S	0.3	230	0.78	0.5
Wide-band transformers	μ_R, T_C	0.5	150	0.9	0.4
Signal transformers	μ_R	0.55	130	1	0.39

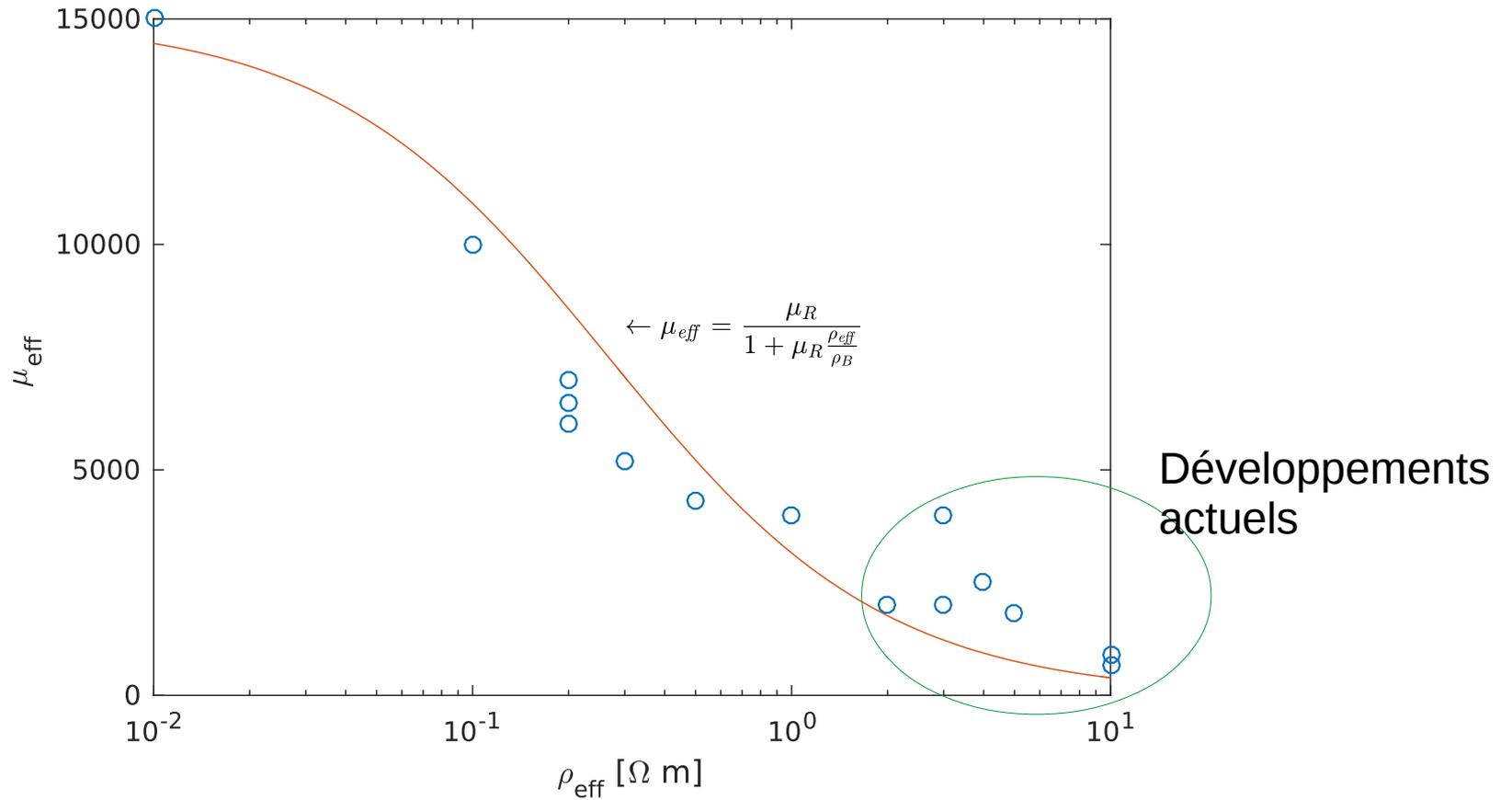
- ✓ aimantation à saturation $0.4 < J_s < 0.55$ T
- ✓ anisotropie magnéto-cristalline $K_1 \sim \text{kJm}^{-3} \Rightarrow 1000 < \mu < 15\ 000$
- ⚠ Résistivité $0.01 < \rho < 20$ Ωm

$$\mu_R \propto \frac{1}{H_C} \propto \frac{J_s D}{\sqrt{K_1}}$$

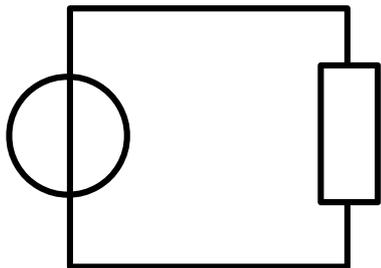
$$\mu_{eff} = \frac{\mu_R}{1 + \mu_R \frac{t}{D}}$$

$$\rho_{eff} \simeq \frac{t}{D} \rho_{CaO}$$

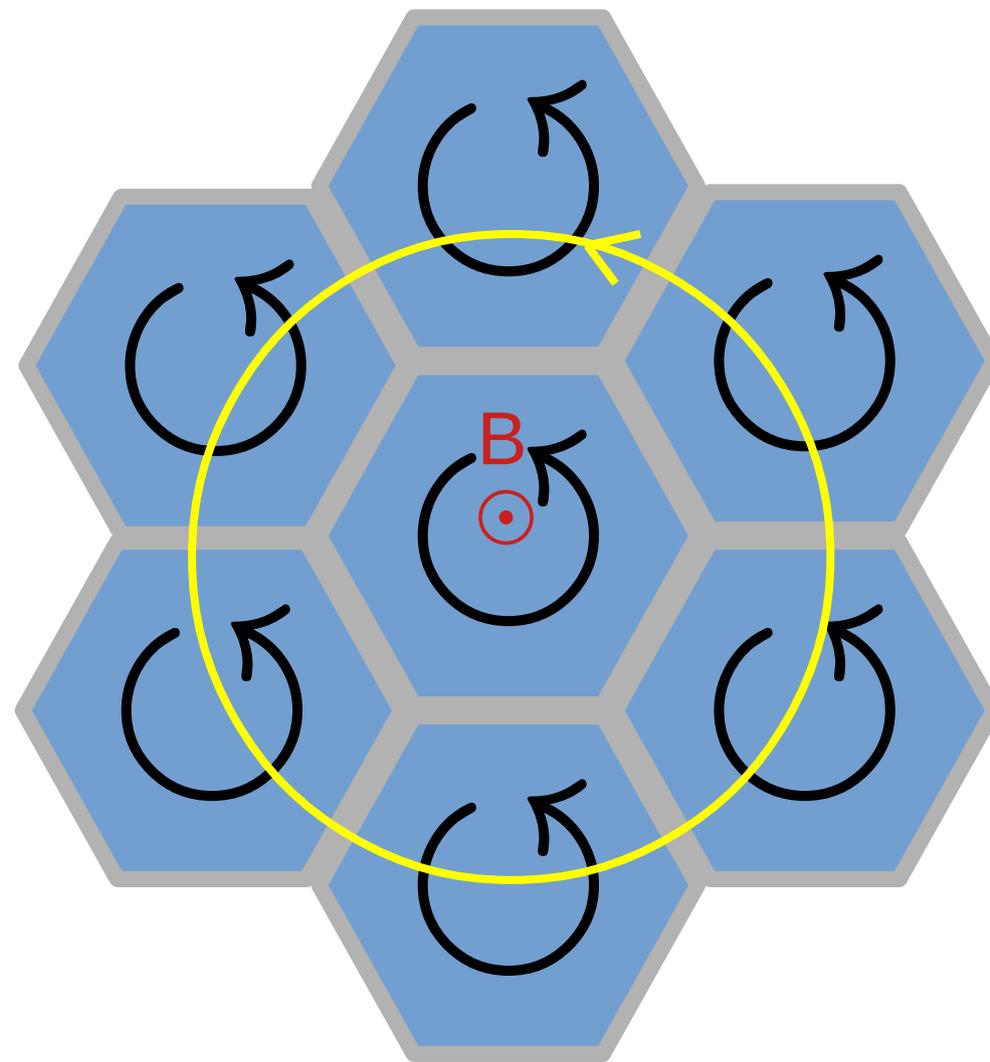
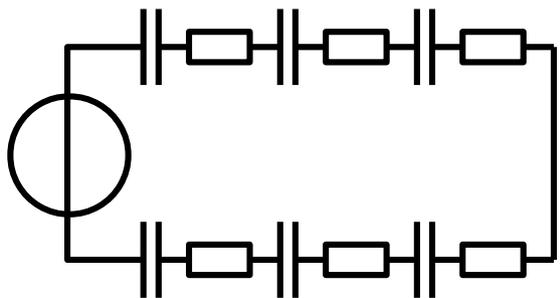




↻ Courants de Foucault
microscopiques : confinés au
grain



↻ Courants de Foucault
macroscopiques : traversent les
joints de grains et/ou courants de
déplacement



⇒ Trouver un compromis
entre perméabilité et bande
passante

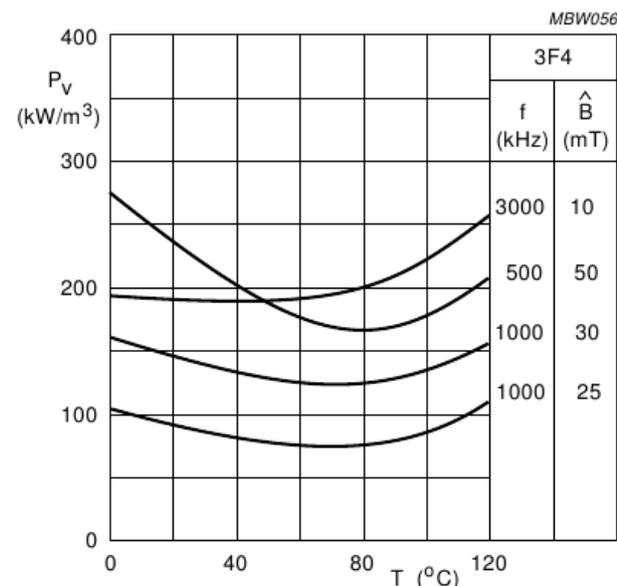
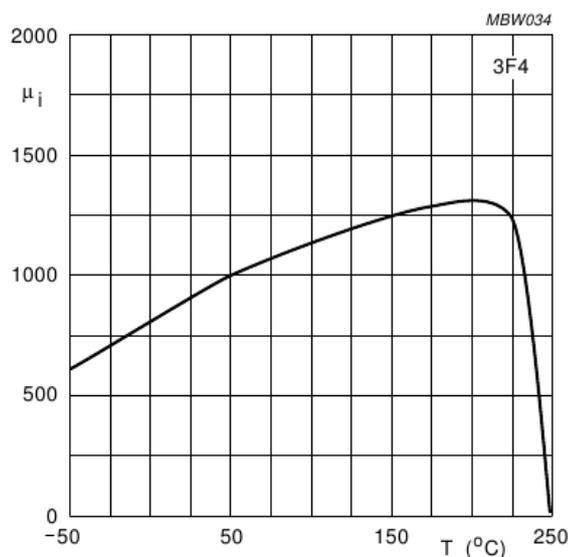
Table 1.12. Main $\text{Mn}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Fe}_2\text{O}_4$ materials used for broadband transformers, pulse transformers, common mode chokes, delay lines. References starting with a letter are from TDK, with a number from Ferroxcube.

ref.	x (approx)	B_{1k} (T) 25°C	B_{1k} (T) 100°C	μ_i $\pm 30\%$	f_R (Hz)	H_C (A/m) 25°C	T_C (°C)	ρ (Ωm)	f_{max} (Hz)
T46	0.55	0.40	0.24	15000	400 k	7	130	0.01	100 k
T38	0.55	0.43	0.26	10000	300 k	8	130	0.1	100 k
T36	0.55	0.40	0.24	7000	300 k	22	130	0.2	100 k
T37	0.55	0.38	0.24	6500	700 k	9	130	0.2	300 k
N30	0.55	0.38	0.24	4300	1 M	12	130	0.5	400 k

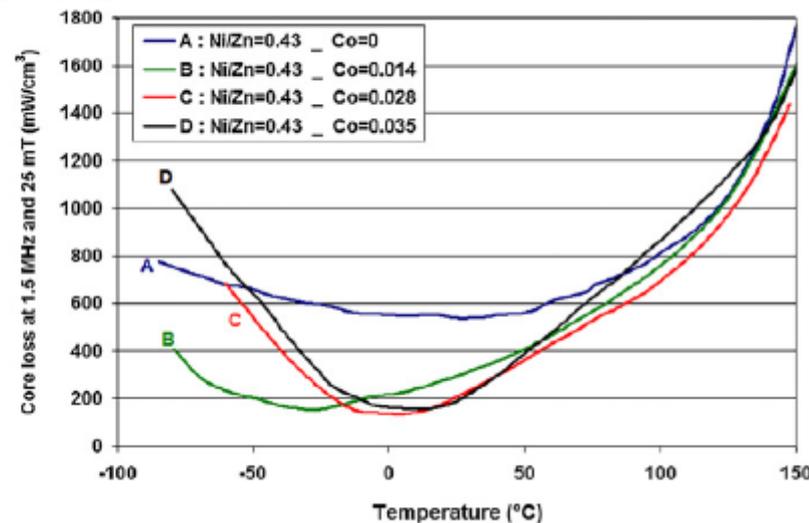
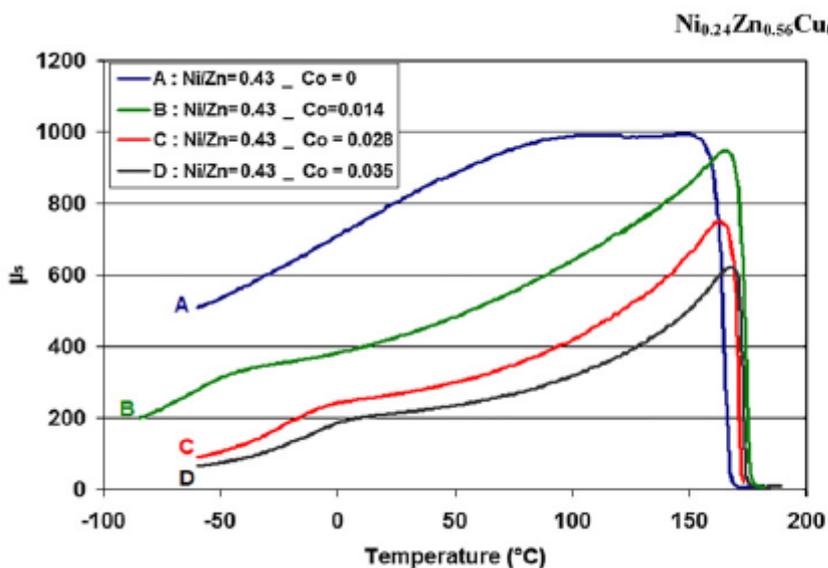
Table 1.13. Main $\text{Mn}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Fe}_2\text{O}_4$ materials used for power transformers and power electronics. References starting with a letter are from TDK, with a number from Ferroxcube. B_{1k} is the induction measured at 1 kAm^{-1}

ref.	x (approx)	B_{1k} (T) 25°C	B_{1k} (T) 100°C	μ_i $\pm 30\%$	f_R (Hz)	H_C (A/m) 25°C	T_C (°C)	ρ (Ωm)	f_{max} (Hz)
N72	0.37	0.48	0.37	2500	20 M	23	210	12	300 k
N27	0.35	0.50	0.41	2000	15 M	33	220	3	150 k
N49	0.3	0.49	0.40	1500	30 M	42	240	17	1 M
3C93	0.3	0.52	0.43	1800	20 M	13	240	5	300 k
3F35	0.3	0.5	0.42	1400	50 M	40	240	10	1 M

MnZn
Non compatible
LTCC



NiZn
Compatible
LTCC

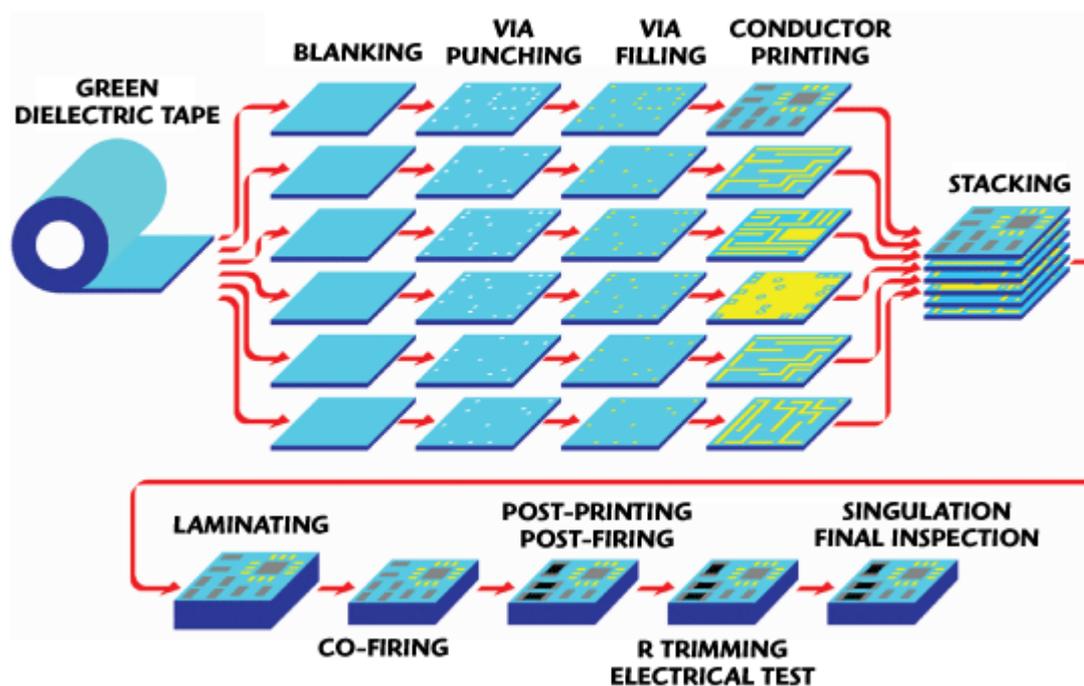


@25 mT - 1,5 MHz

A. Lucas, Thèse de doctorat, ENS Cachan, 2010

- Introduction
- Ferrites pour c
- **Technologie LTCC développée par THALES R&T**
- Technologie SPS développée par SATIE
- Alliages métalliques nanocristallins
- Poudres métalliques liées

Low Temperature Co-fired Ceramics



Problème : rendre compatible les ferrites et le LTCC

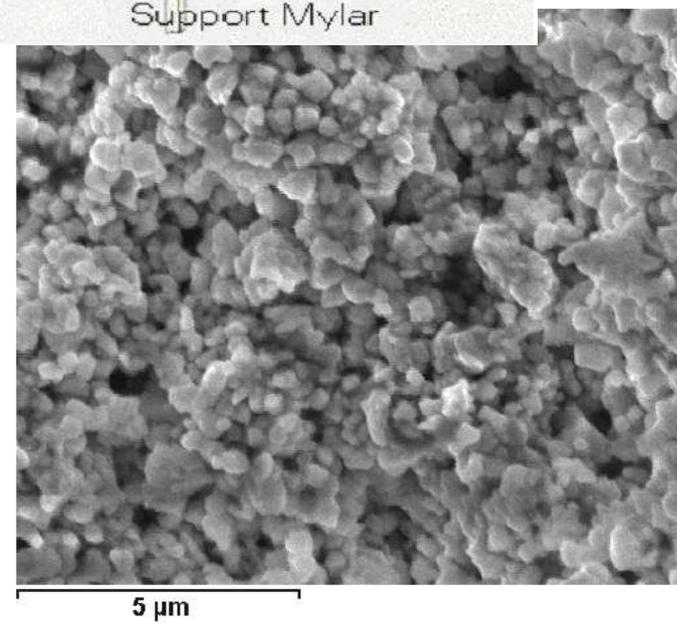
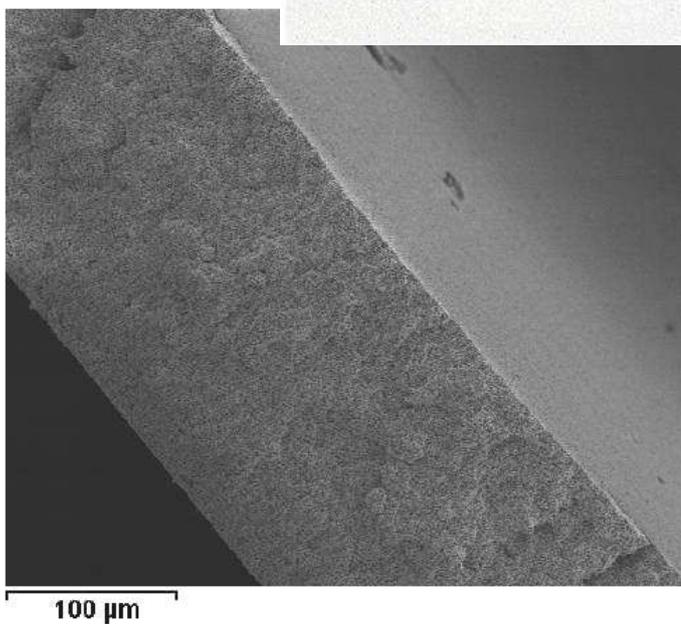
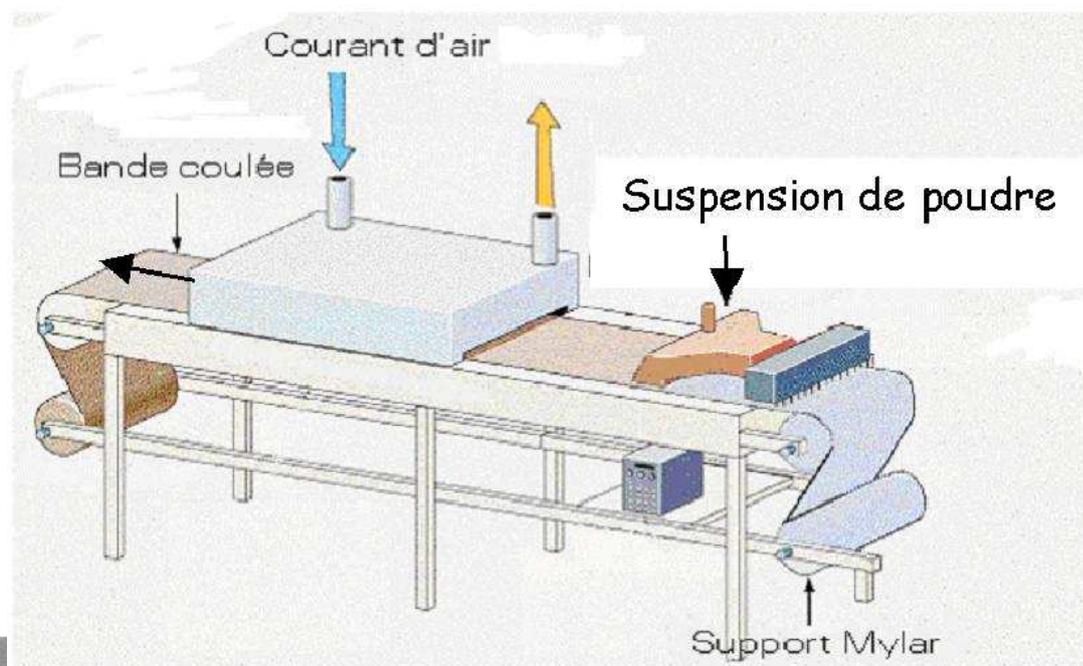
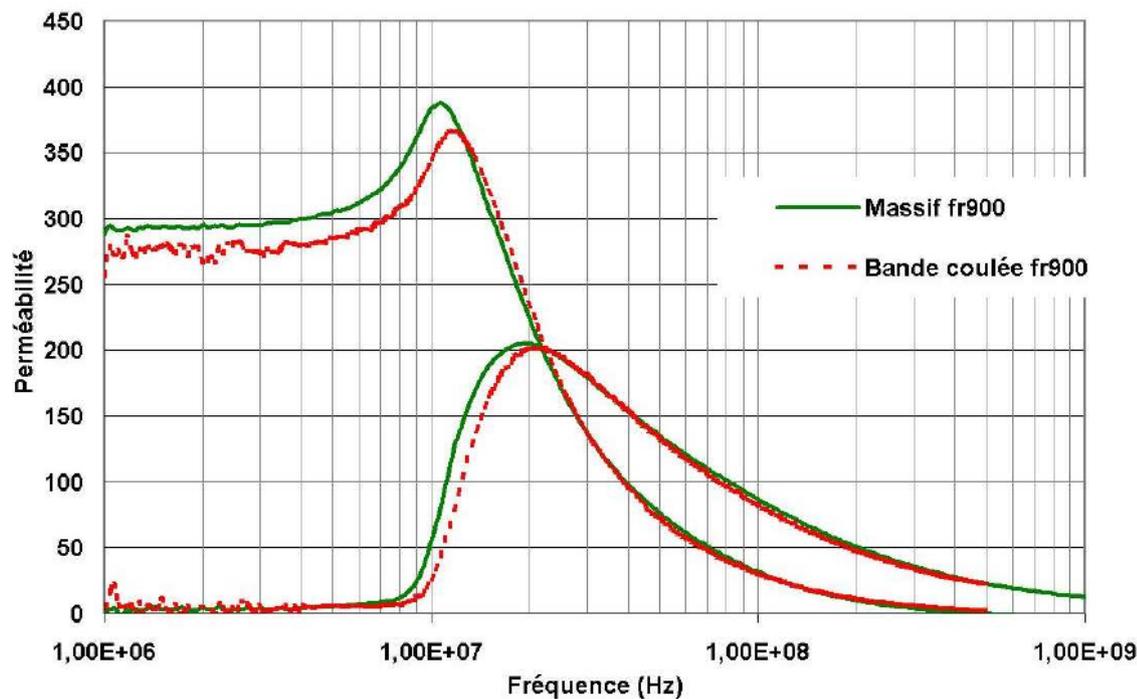
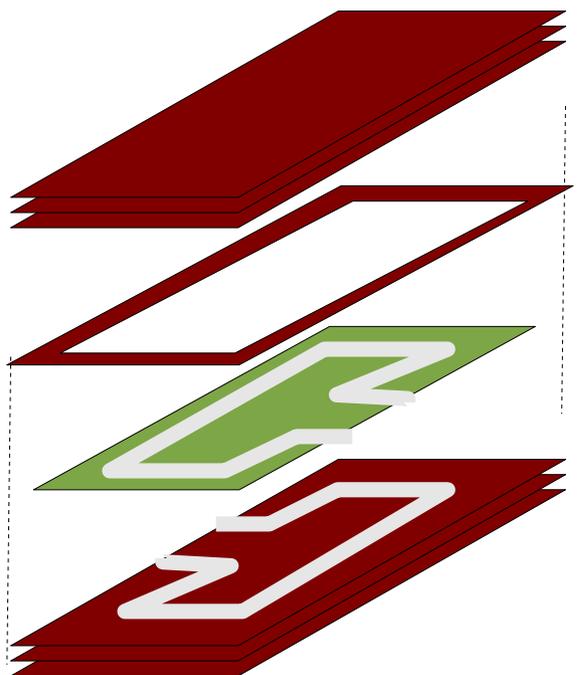


Figure 114 : Micrographies MEB des bandes coulées crues de ferrite Ni-Zn-Cu.



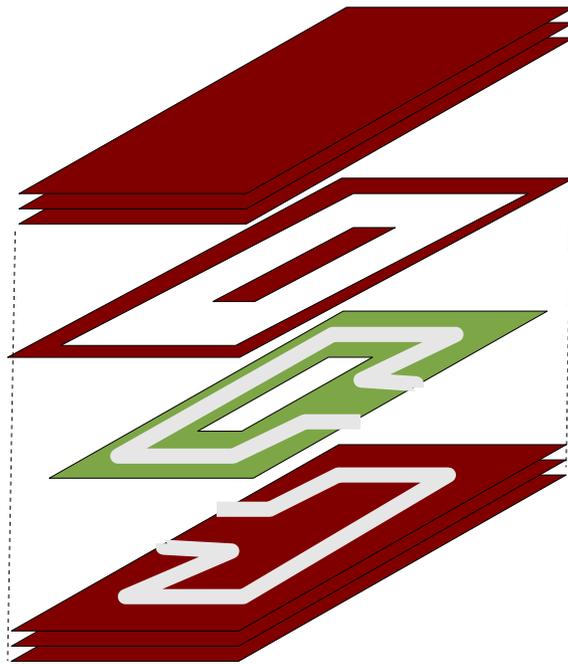
	Massif (frittage 900°C)	Bande coulée (frittage 900°C)
Masse volumique	5,10 g/cm ³	5,00 g/cm ³
Perméabilité initiale statique	290	270
Pertes totales (1,5 MHz et 25 mT)	195 mW/cm ³	215 mW/cm ³



$$L_m = 455 \text{ nH}$$

$$M = 380 \text{ nH}$$

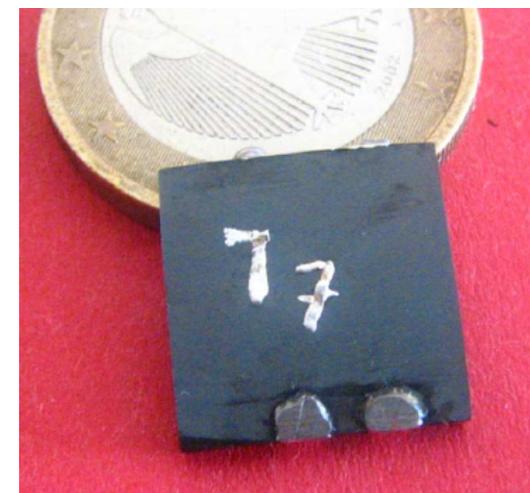
$$K = 83 \%$$



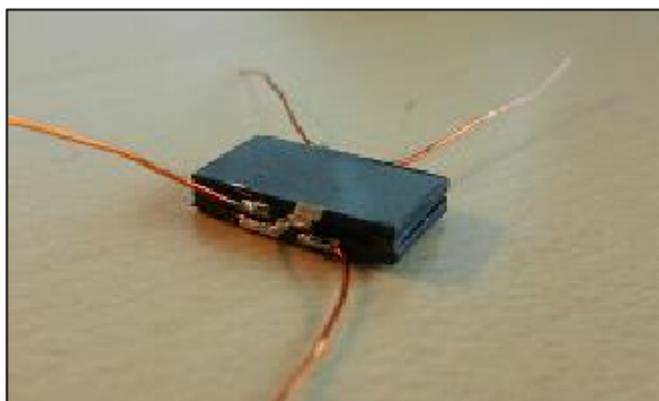
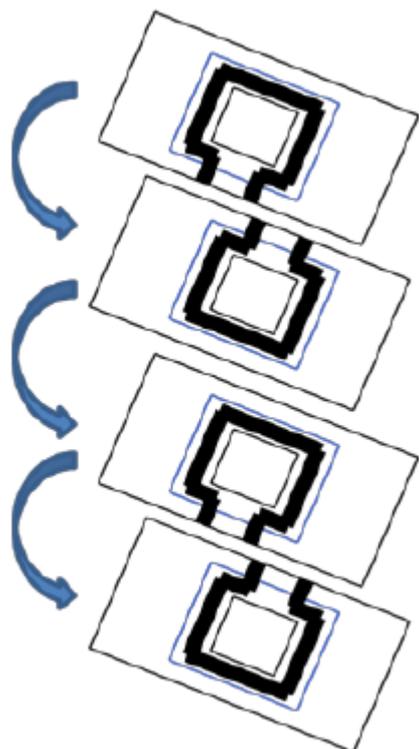
$$L_m = 570 \text{ nH}$$

$$M = 540 \text{ nH}$$

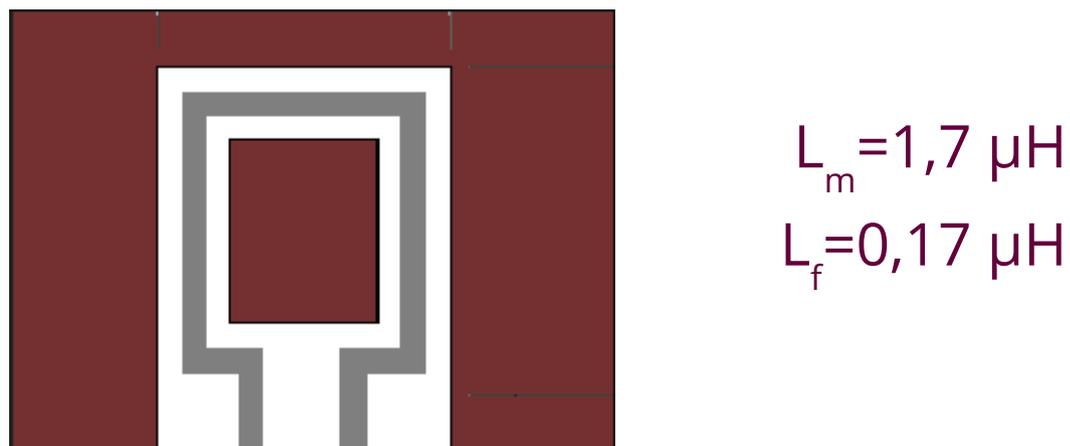
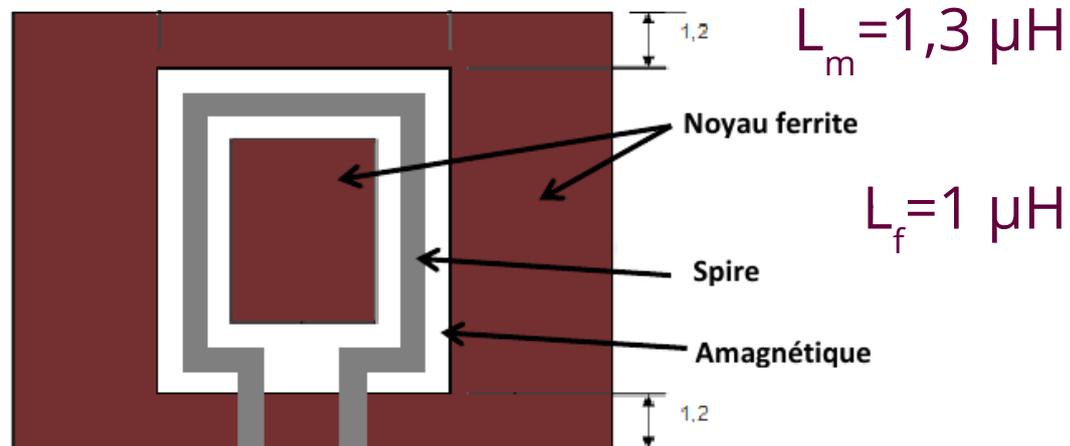
$$K = 97 \%$$



A. Lucas, Thèse de doctorat, ENS Cachan, 2010



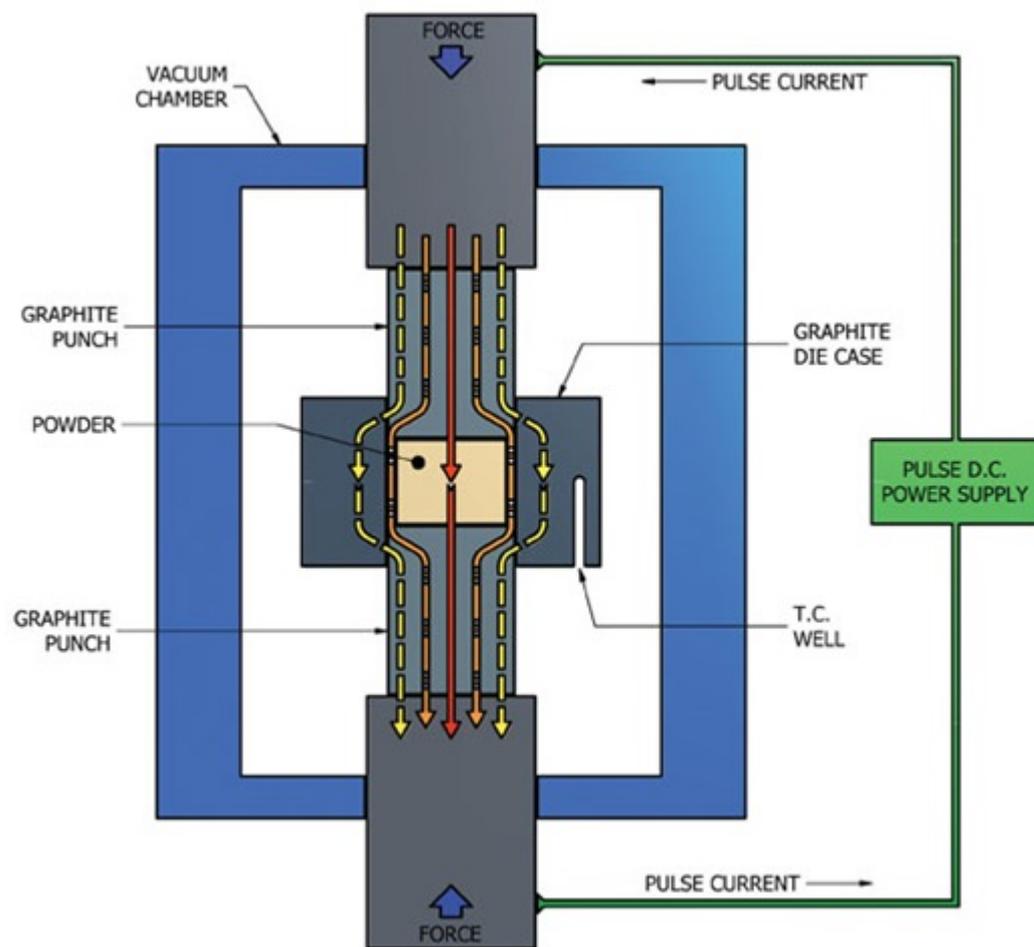
16,6 x 15 x 3 mm

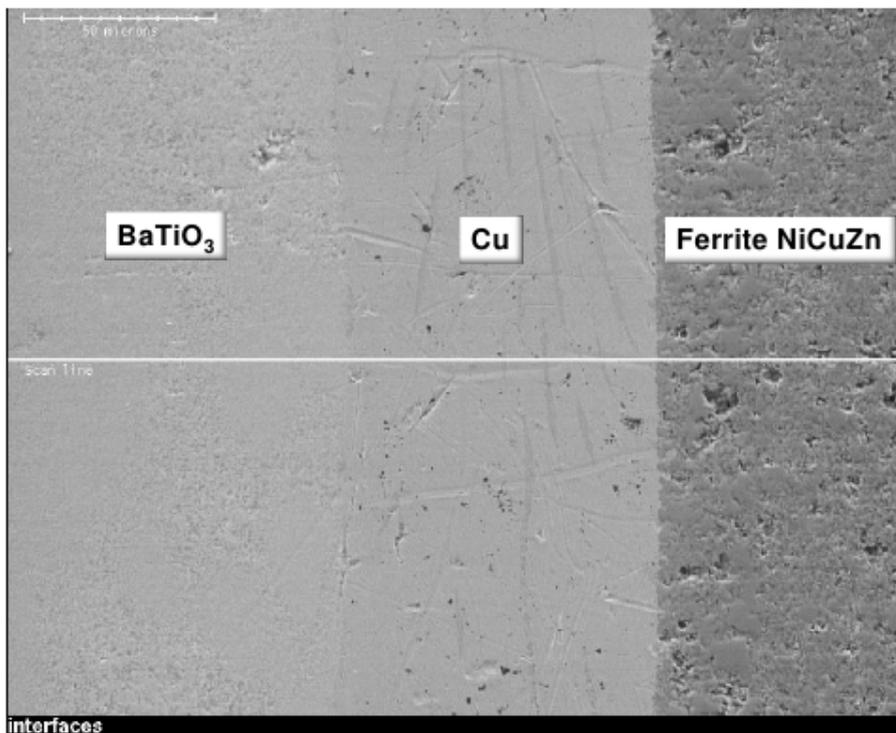


E. Brun, Thèse de doctorat, U. Paris Sud, 2014

- Introduction
- Ferrites pour l'électronique de puissance
- Technologie LTCC développée par THALES R&T
- **Technologie SPS développée par SATIE**
- Alliages métalliques nanocristallins

« Spark plasma sintering »

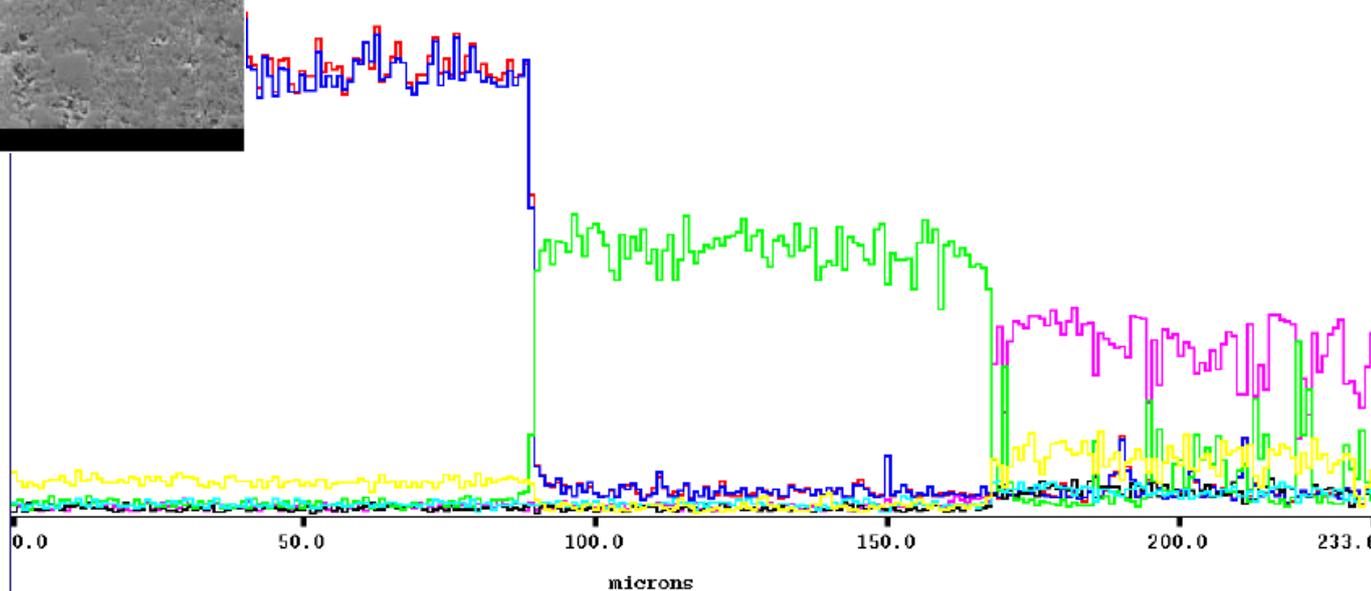




Cartographie chimique MEB EDX

- × lpa_4 Ti K
- × lpa_4 Ba L
- × lpa_4 Fe K
- × lpa_4 Ni K
- × lpa_4 Cu K
- × lpa_4 Zn K
- × lpa_4 O K

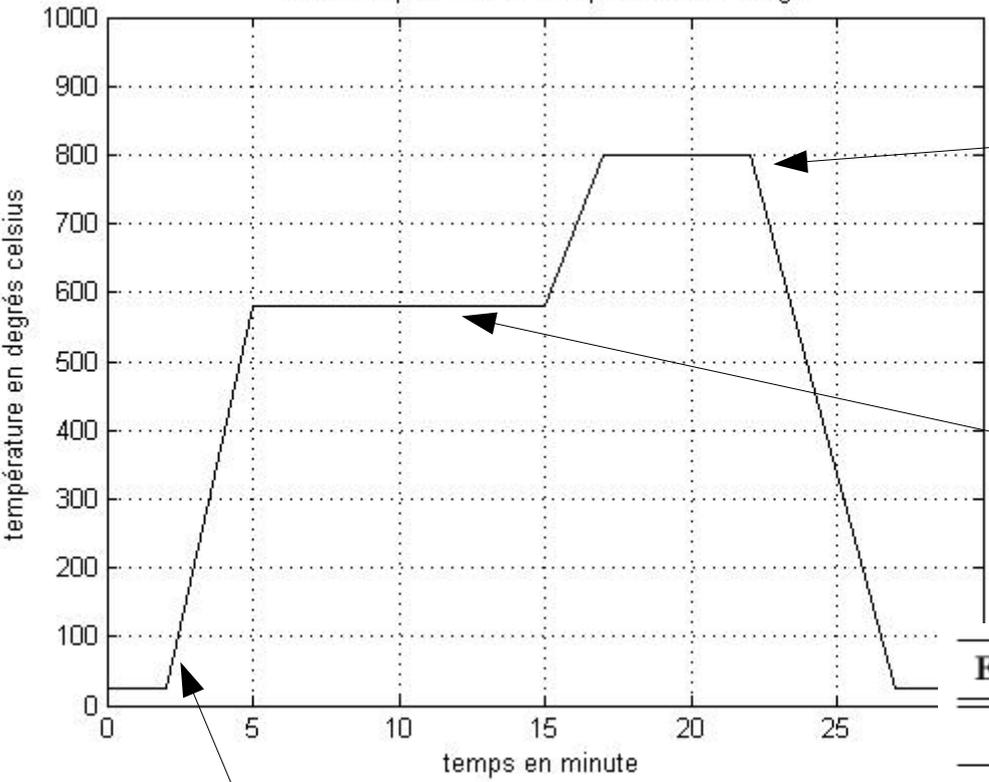
119 ES



K. Zehani, Thèse de doctorat, ENS Cachan, 2011



allure temporelle de la température de frittage

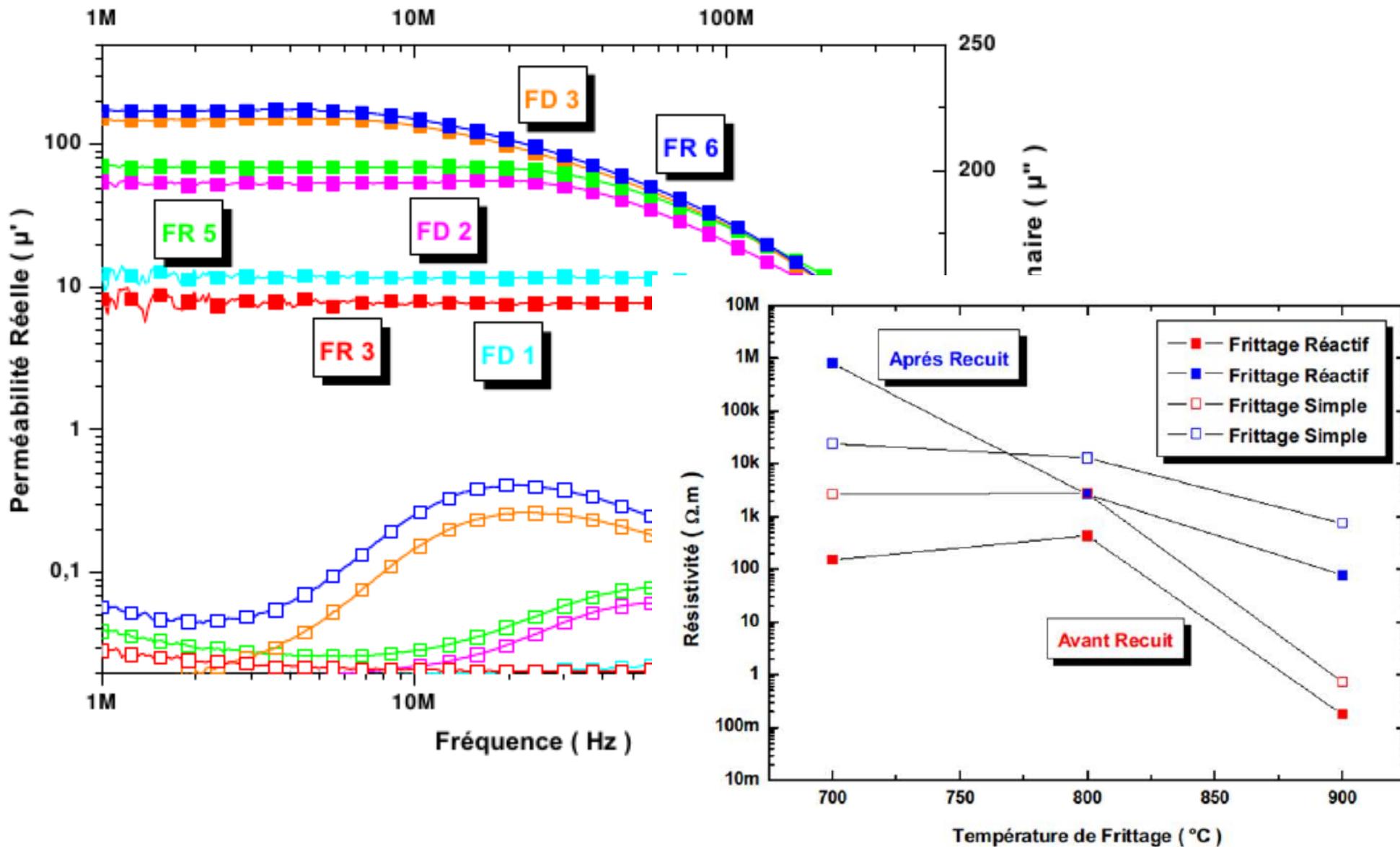


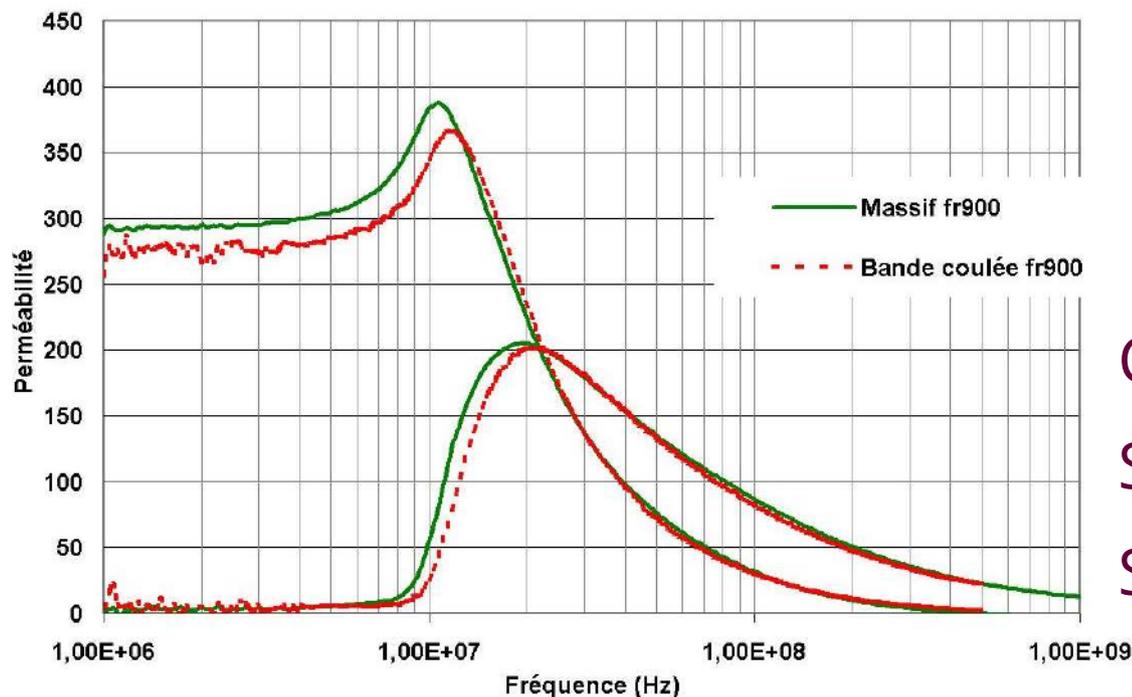
Ferrite fritté

Formation du spinelle

Poudre d'oxyde simple :
CoO, NiO, CuO, ZnO, Fe₂O₃

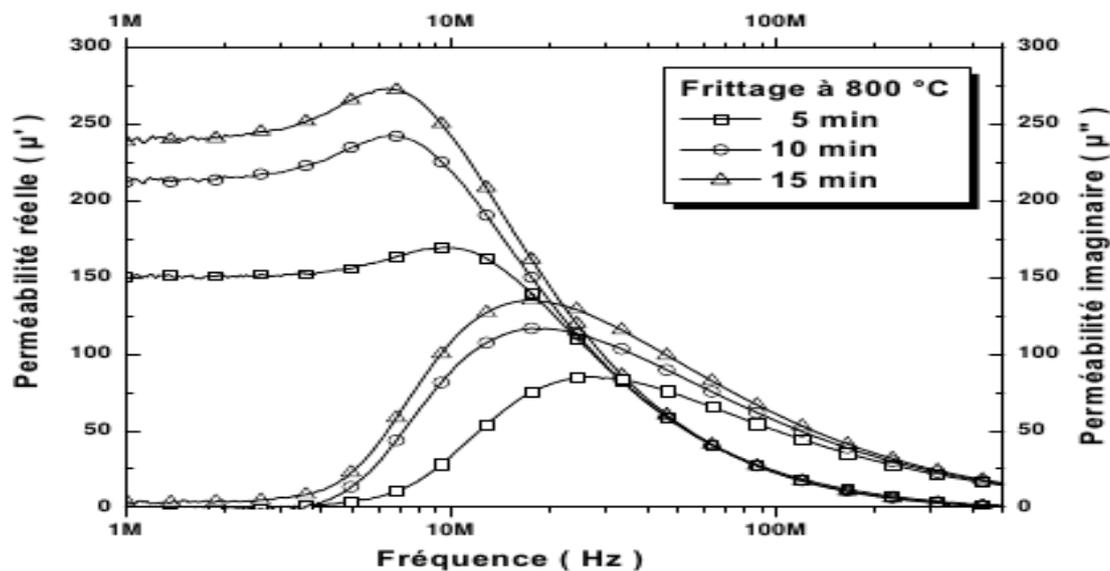
Echantillons	T _{réaction} (°C)	T _{frittage} (°C)	Densité relative (%)
Frittage SPS par synthèse in-situ			
FR 1	380	700	87.6
FR 2	480	700	89.5
FR 3	580	700	90.4
FR 4	680	700	92.7
FR 5	580	800	97.7
FR 6	580	900	97.6
Frittage SPS simple			
FD 1		700	91.9
FD 2		800	97.5
FD 3		900	97.9

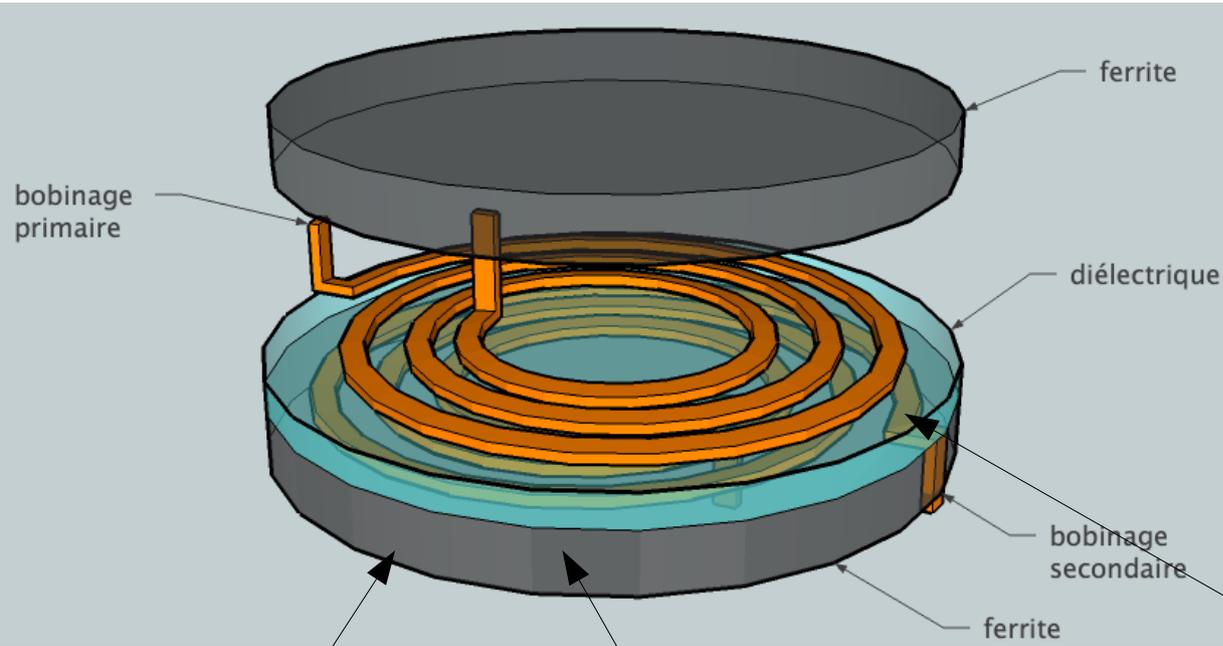




Conventionnel $\mu_{SR} \approx 6$ GHz
 SPS simple $\mu_{SR} \approx 5$ GHz
 SPS réactif $\mu_{SR} \approx 5$ GHz

SPS plus « relaxant »

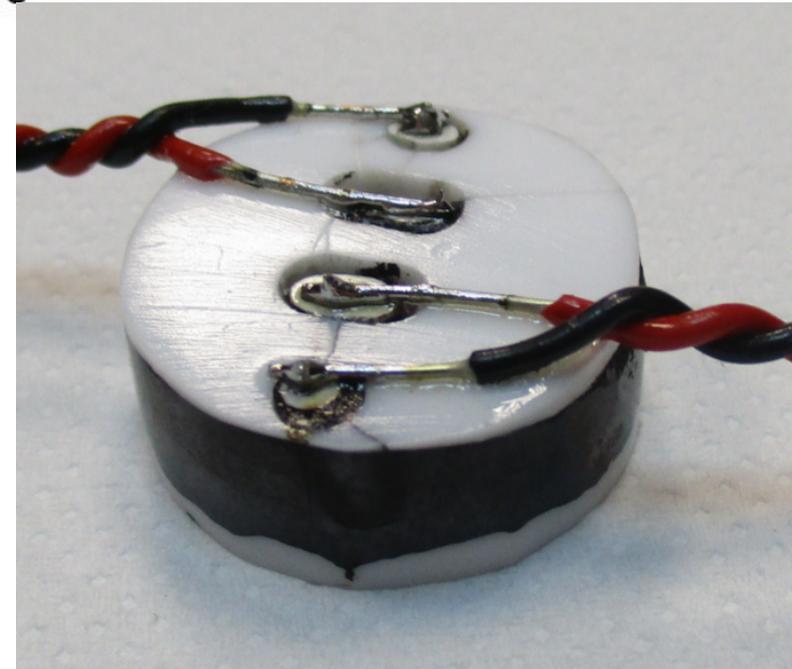
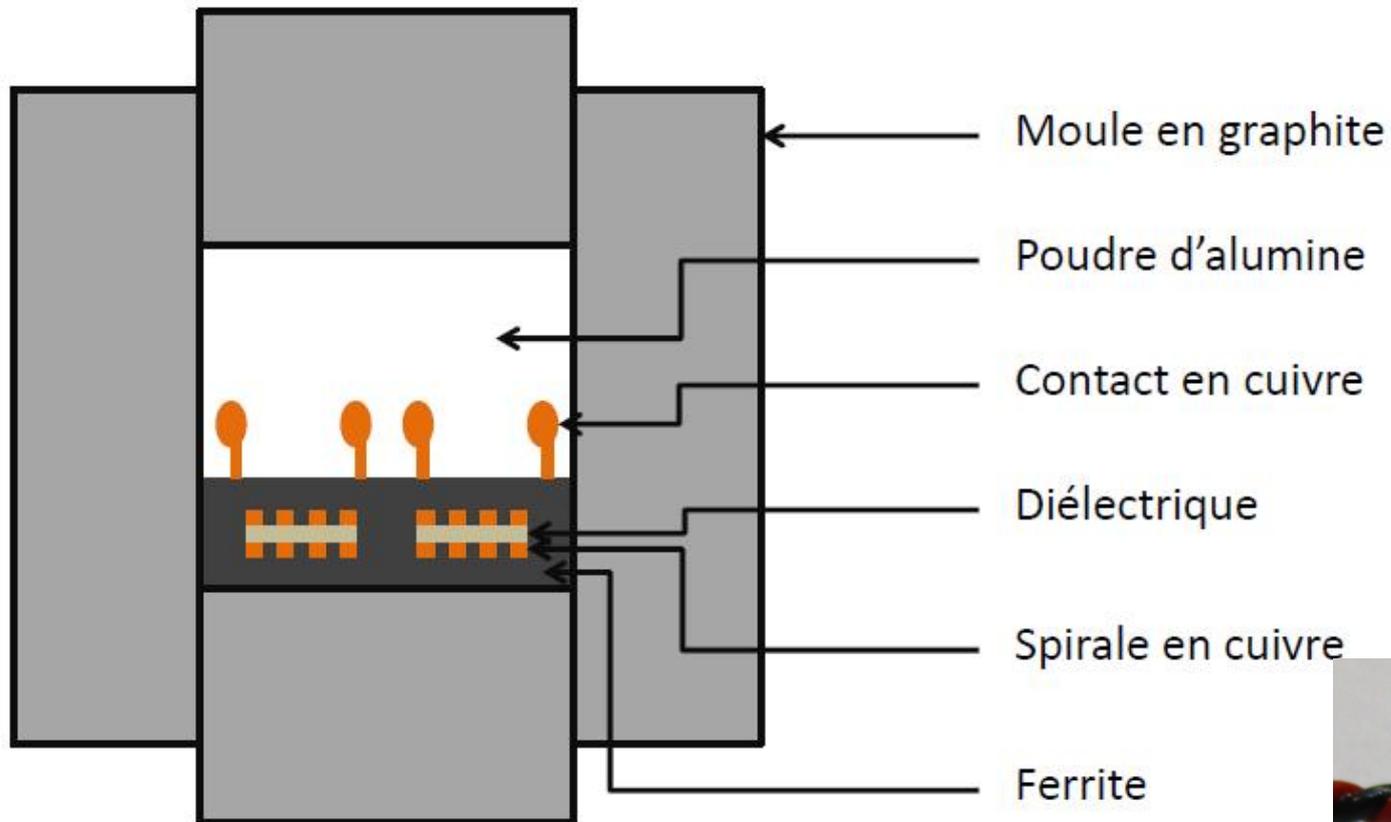




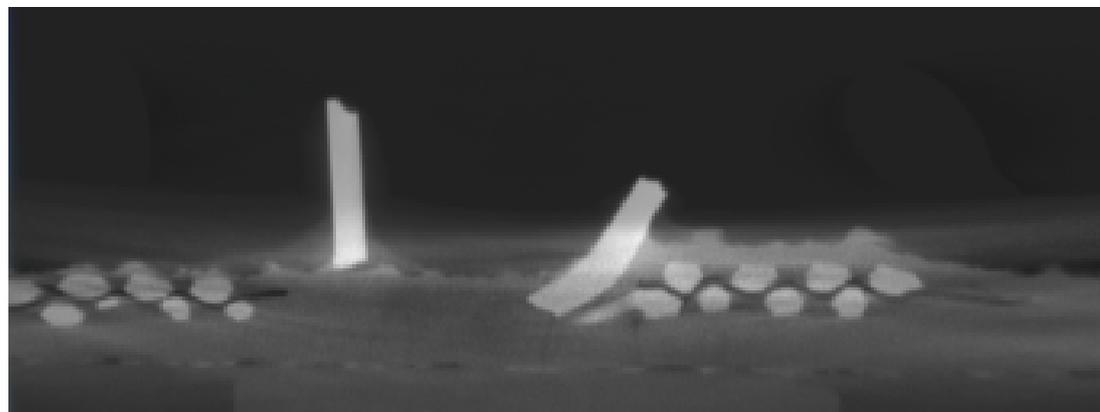
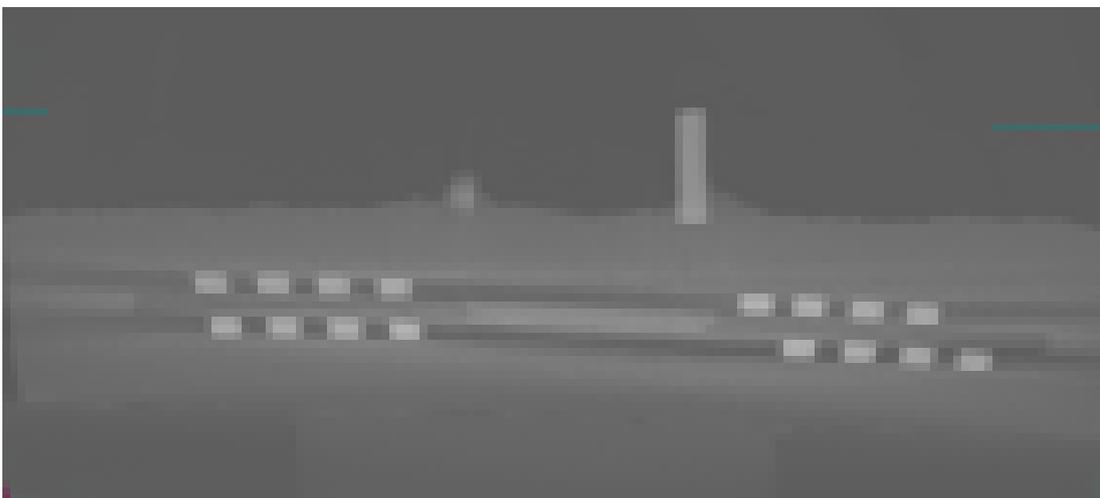
Spinelle
chamotté

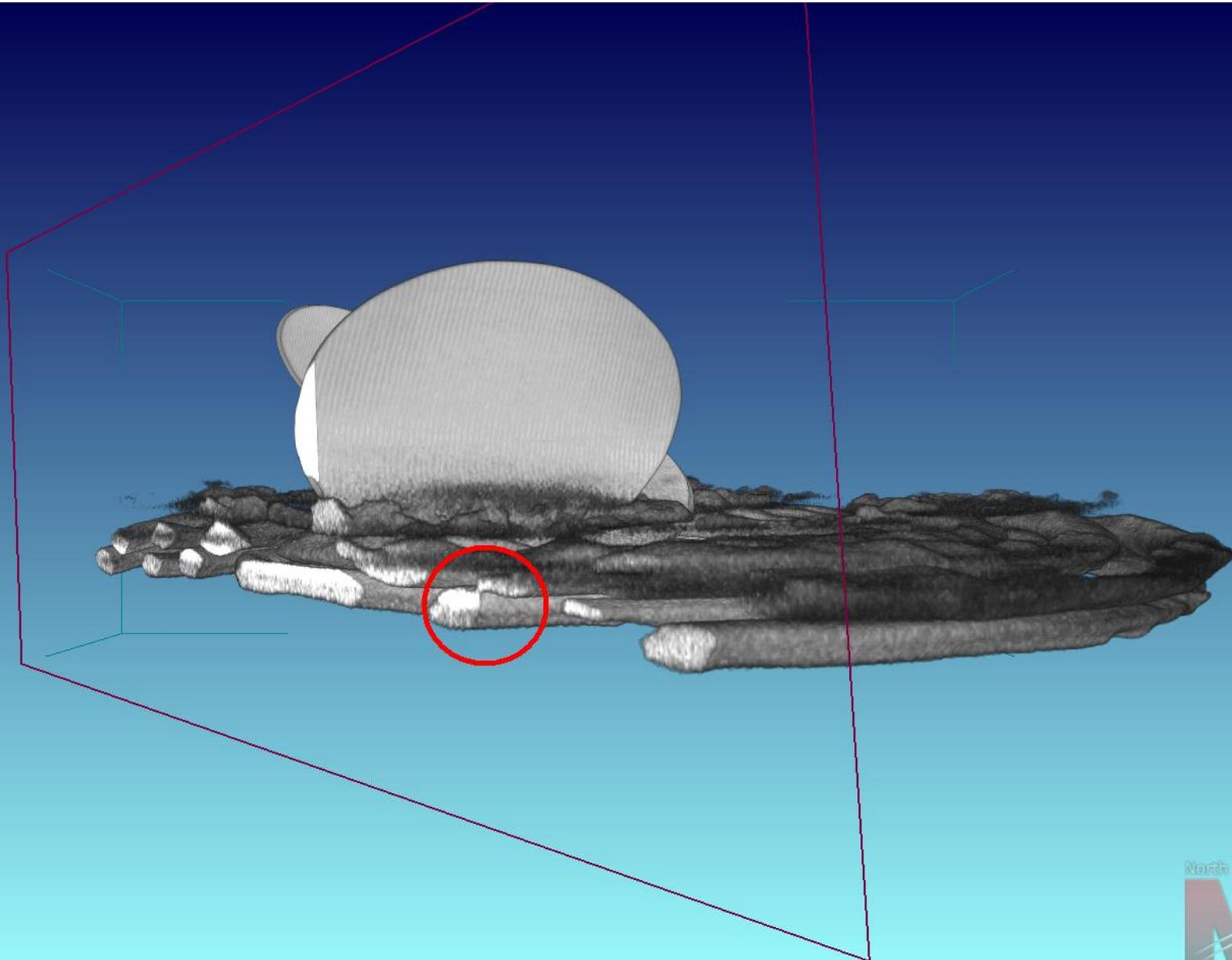


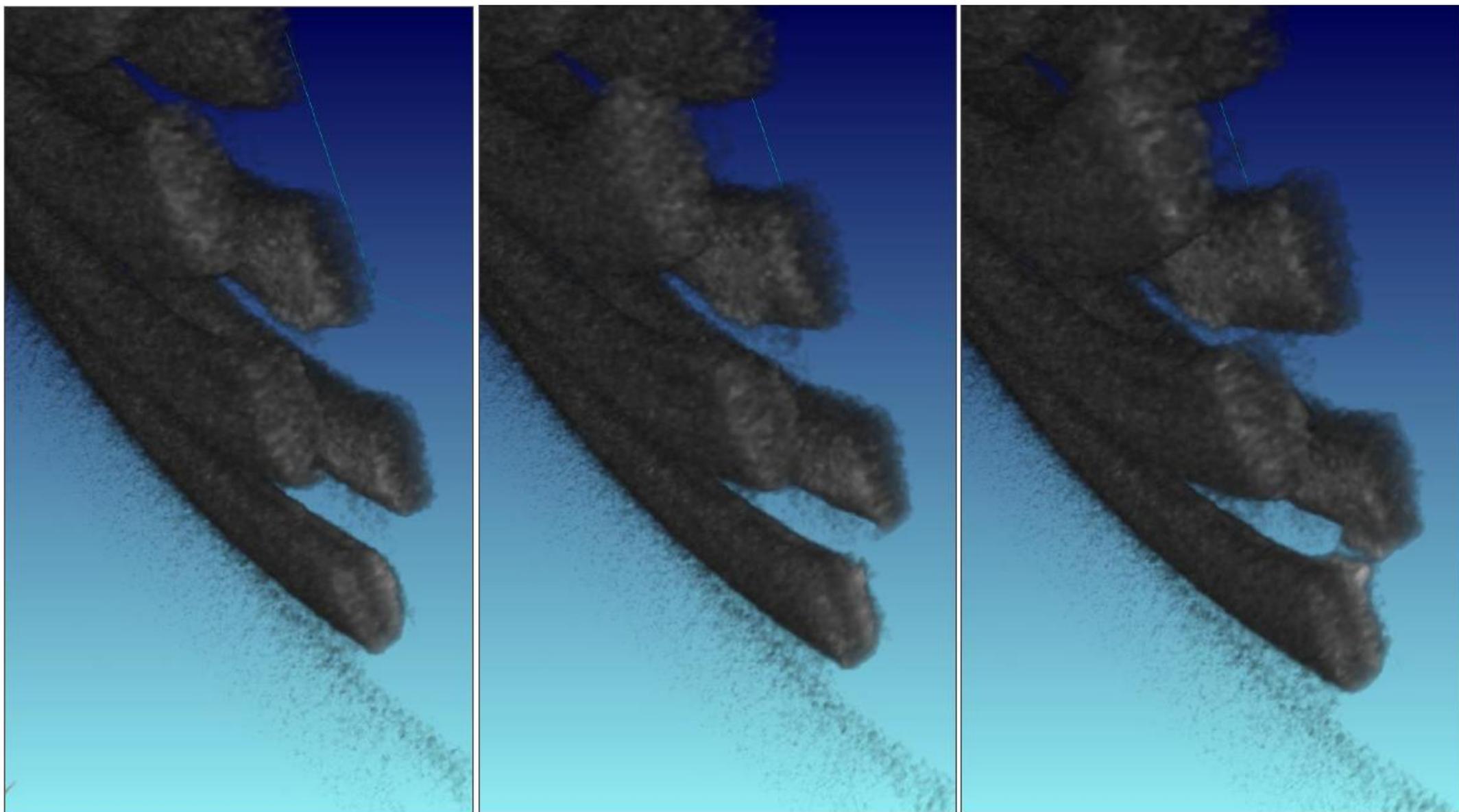
Oxydes de base

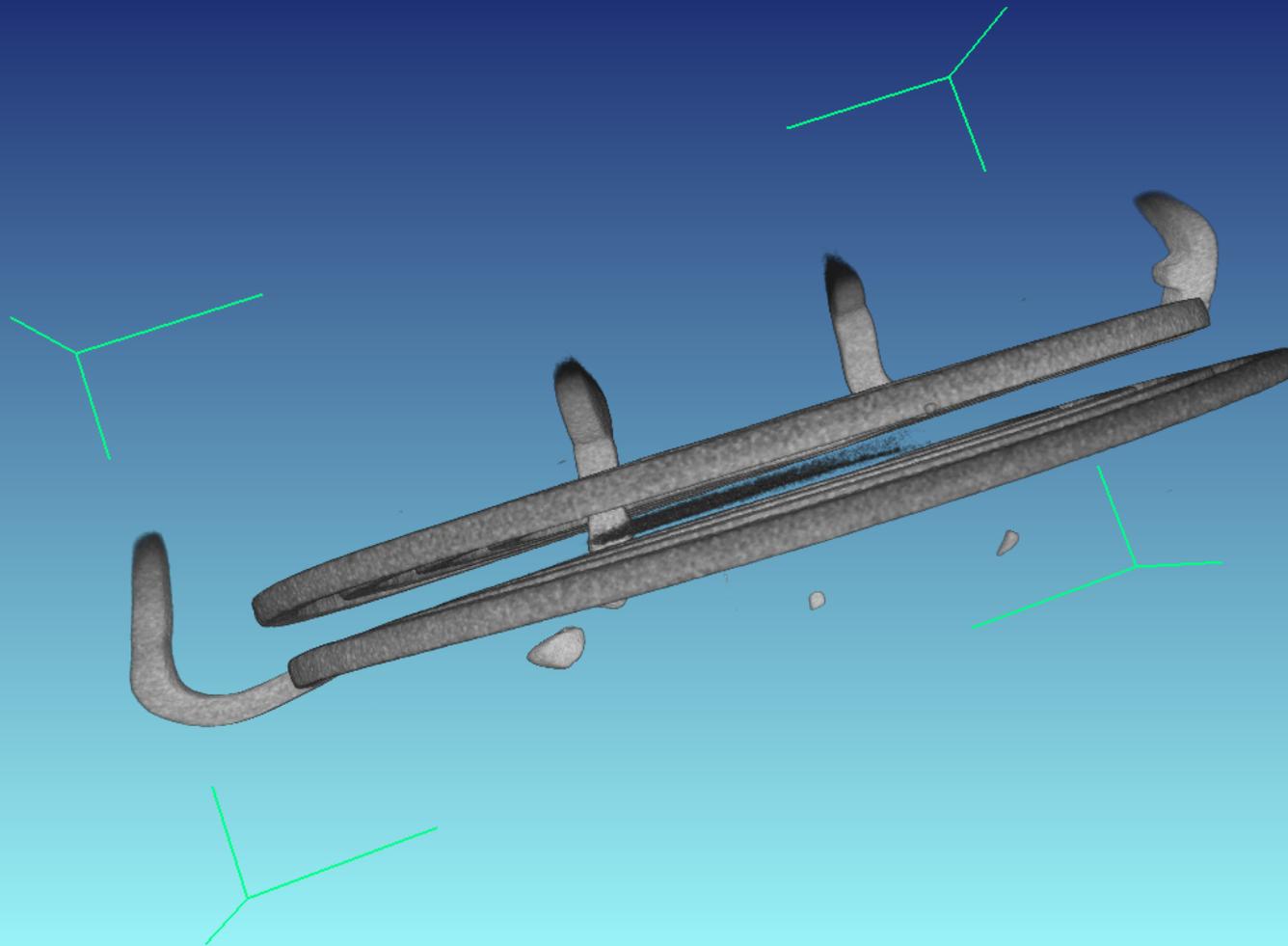


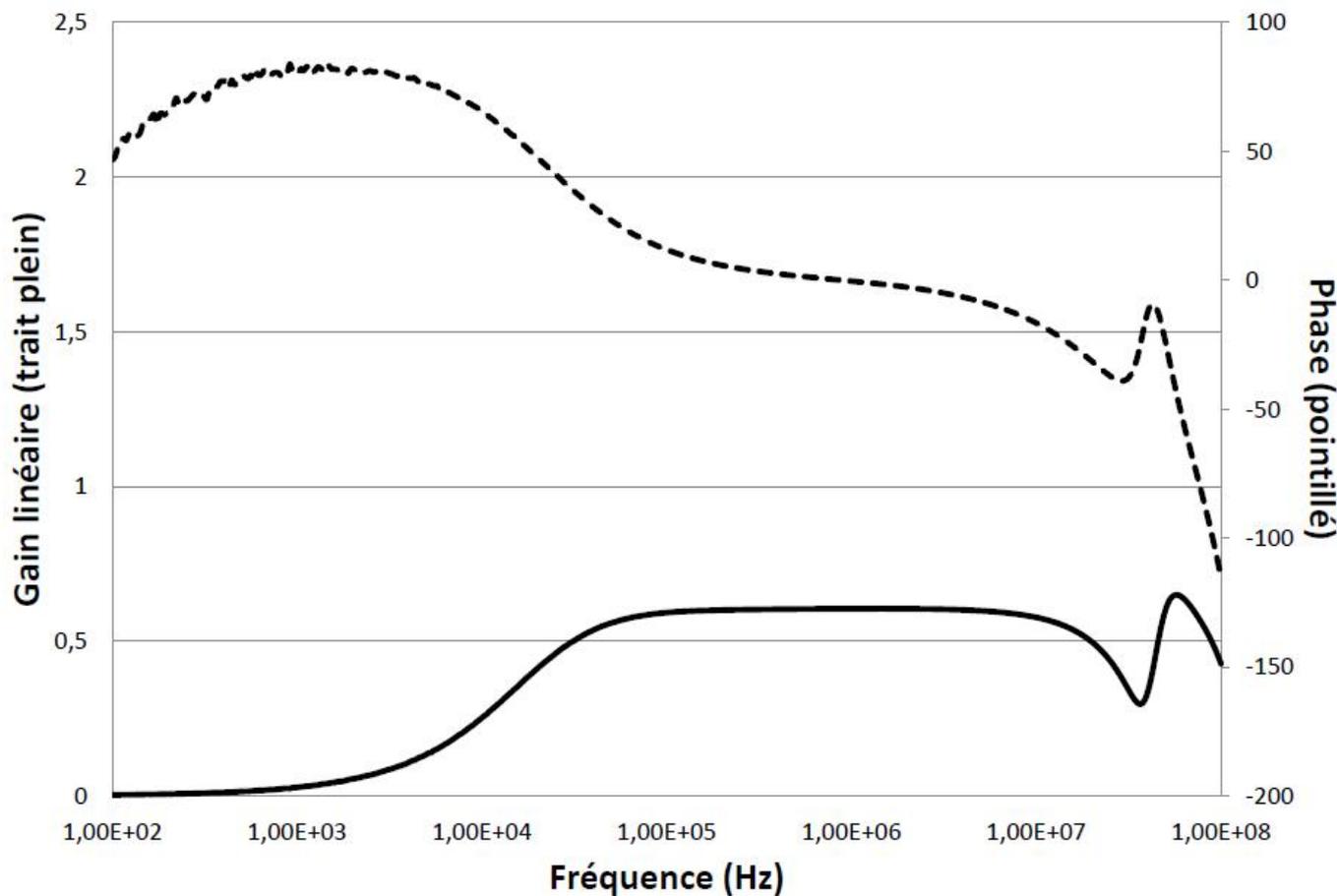
Tomo-densitométrie de rayons X

Isolant 100 μm Isolant 400 μm 





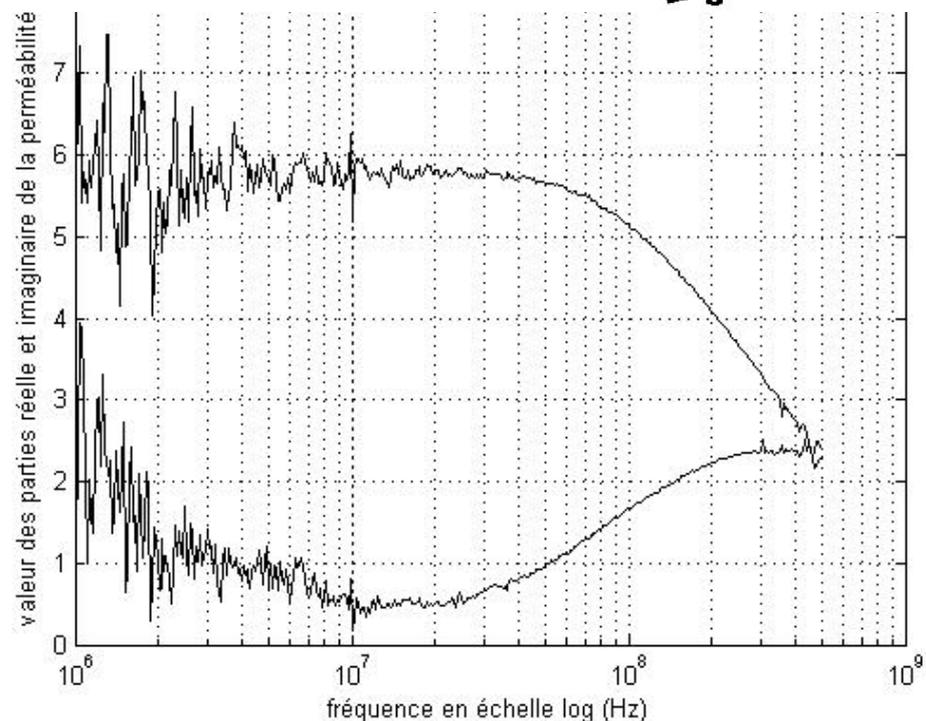
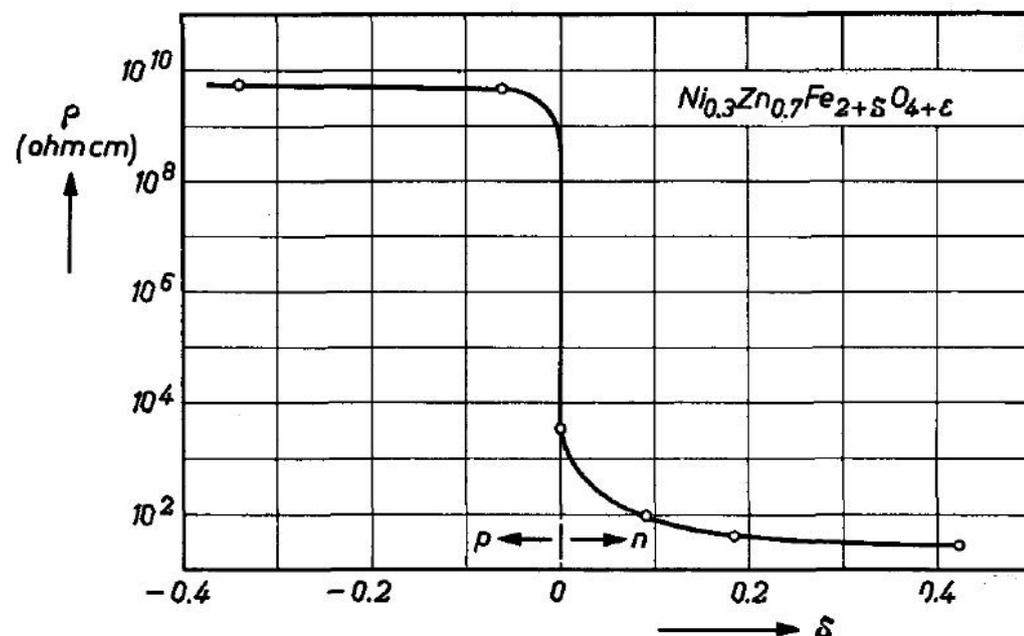




Rapport de transformation < 1

- Inductance de fuite trop importante
- Défaut d'isolation dû au ferrite

- Conductivité du ferrite due à la réduction $R_{p-S}=370 \Omega$
- Compensation de la réduction par défaut de fer
- $L_0=450 \text{ nH}$
- Utiliser le frittage réactif du ferrite (ici la poudre utilisée n'est pas optimisée pour le SPS $\mu=6$)



- Introduction
- Ferrites pour l'électronique de puissance
- Technologie LTCC développée par THALES R&T
- Technologie SPS développée par SATIE
- **Alliages métalliques nanocristallins**
- Poudres métalliques liées

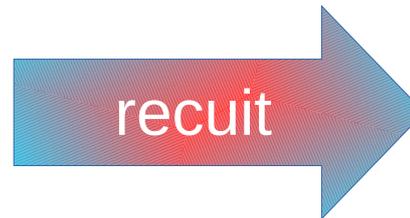
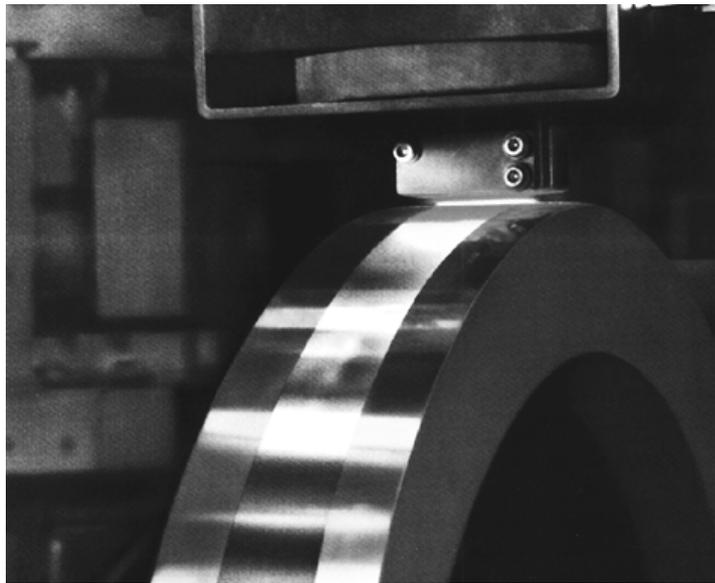
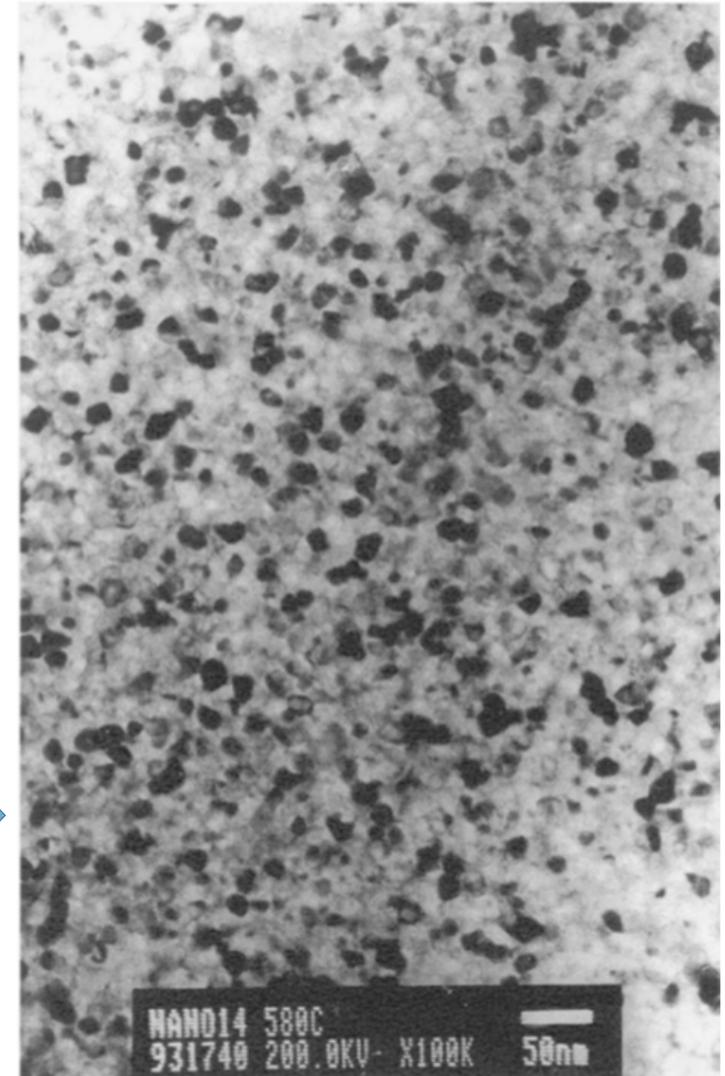
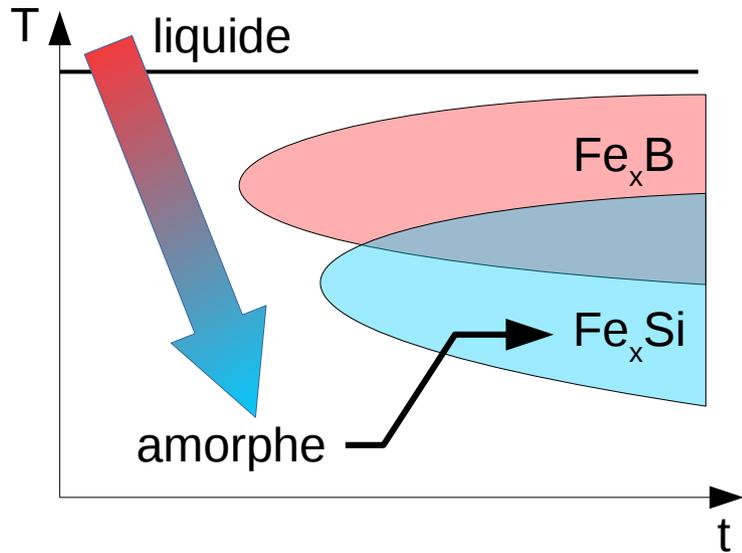


Ce sont des amorphes de composition spécifique dévitrifiés partiellement de façon contrôlée

Composition canonique

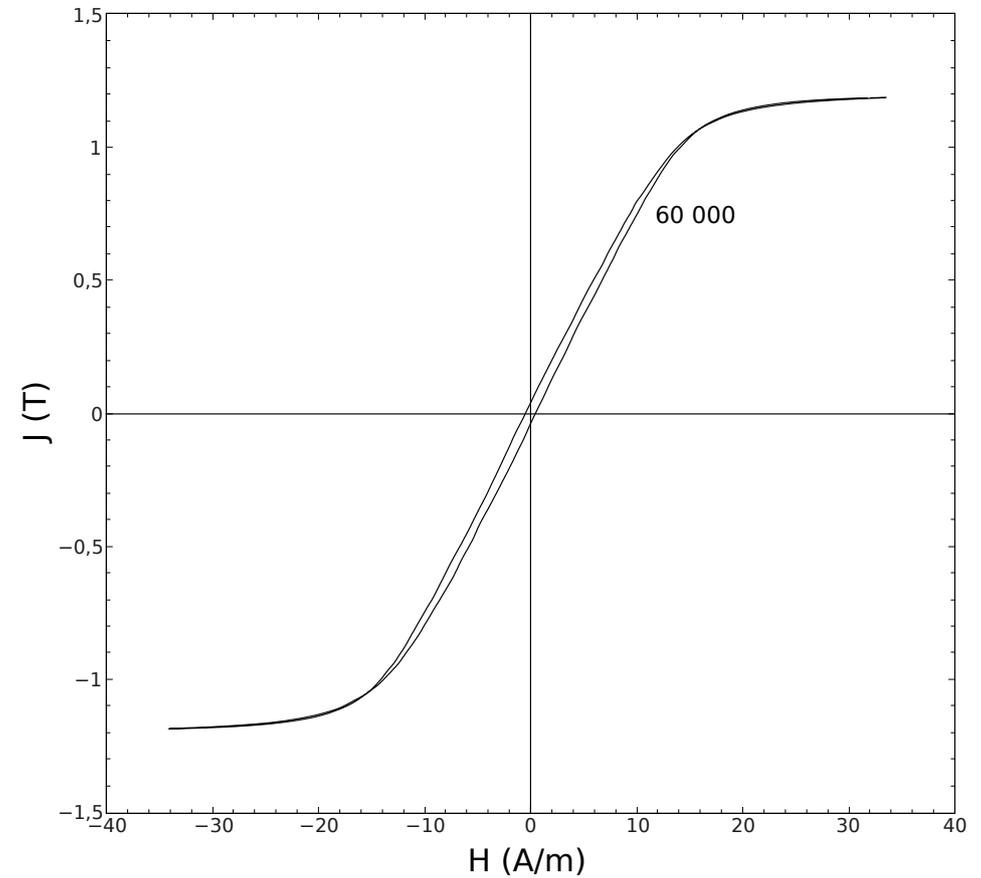
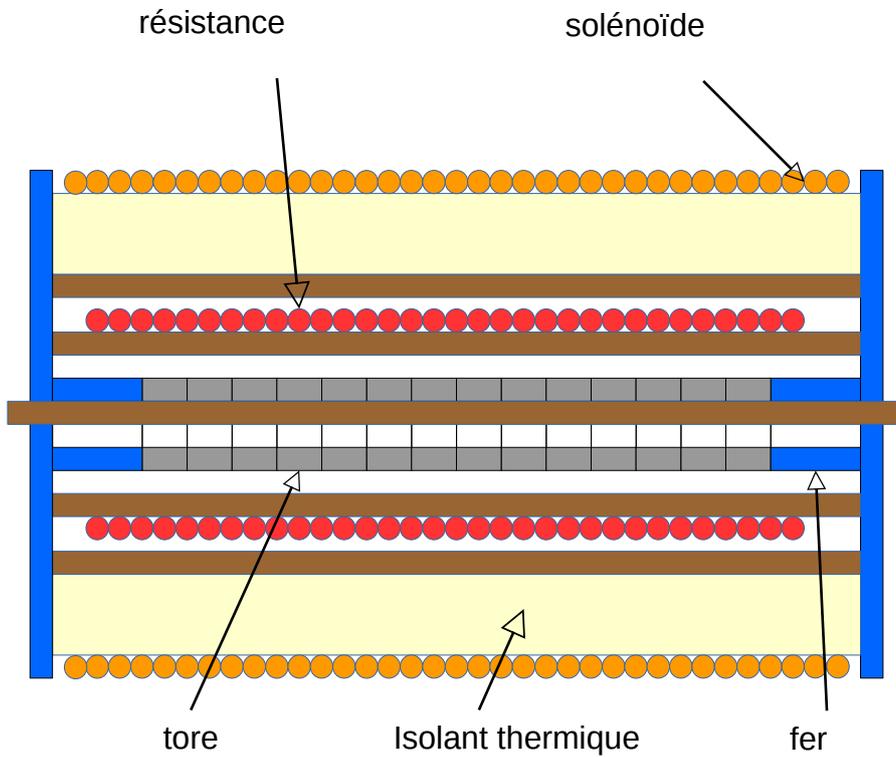
- Hitachi (brevet) $\text{Fe}_{73.5}\text{Si}_{13.5}\text{B}_9\text{Nb}_3\text{Cu}_1$
- Vacuumschmelze $\text{Fe}_{73.5}\text{Si}_{15.5}\text{B}_7\text{Nb}_3\text{Cu}_1$

JS (T)	HC (A/m)	ρ ($10^{-8} \Omega\text{m}$)	λ (10^{-6})	μ
1,25	0,5 - 1	120	<0,5	20 000 - 600 000

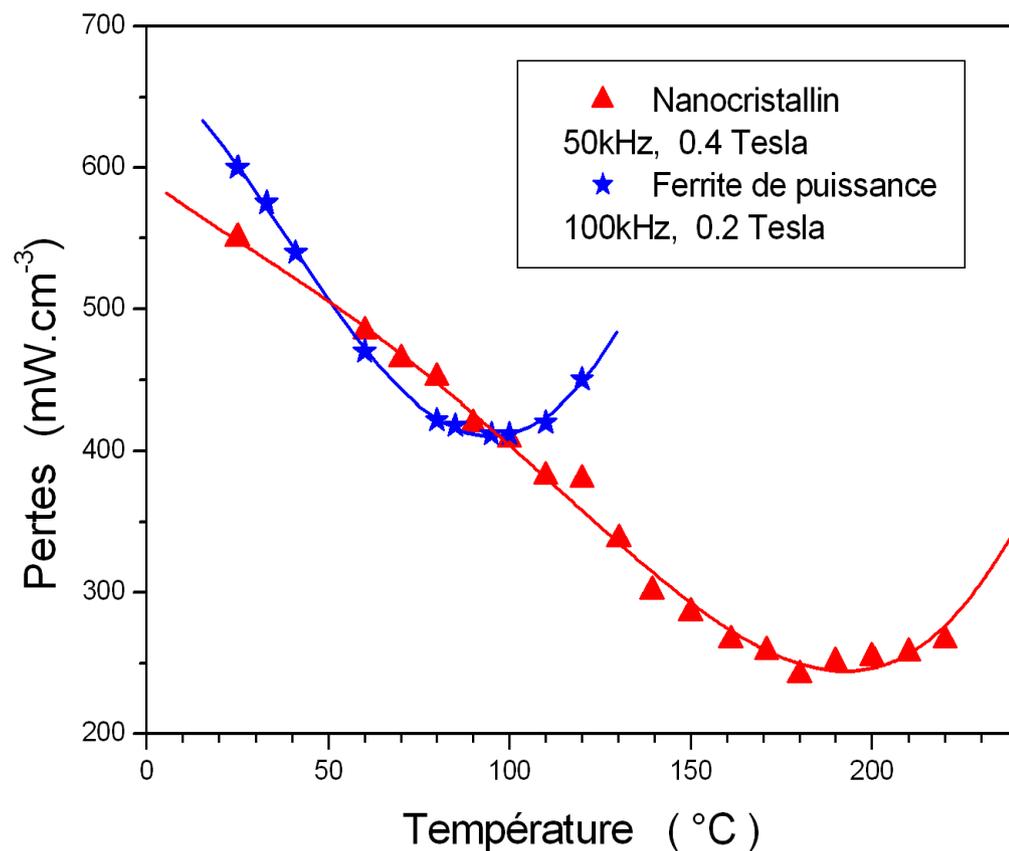
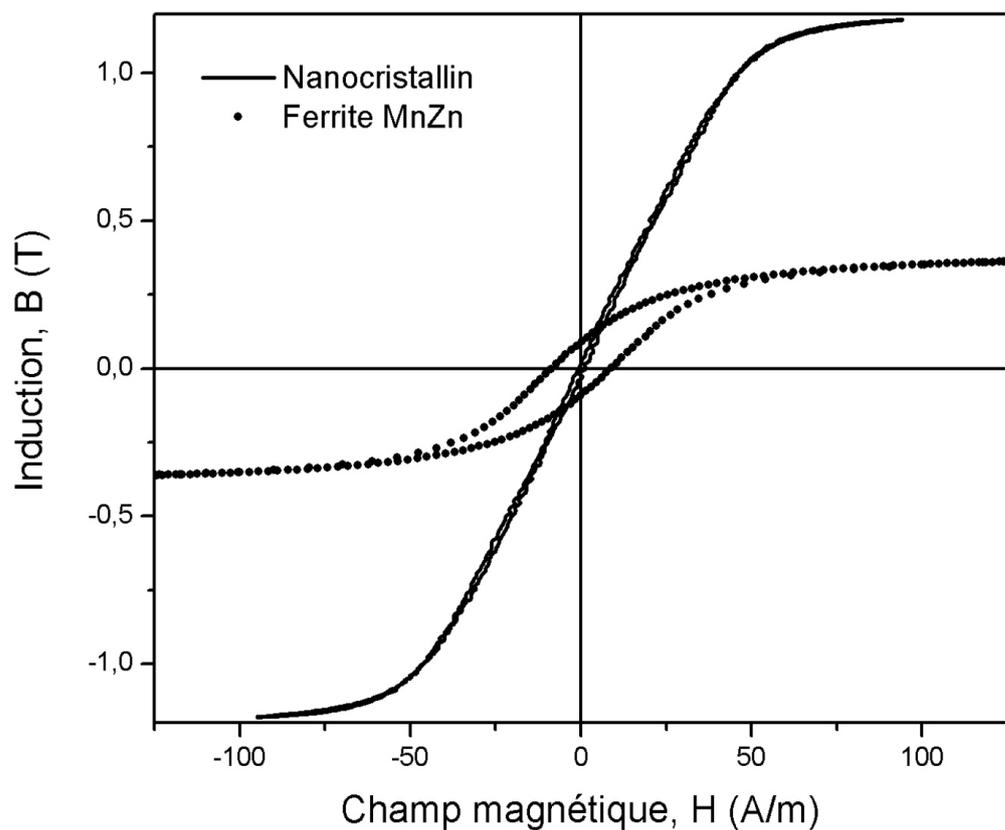


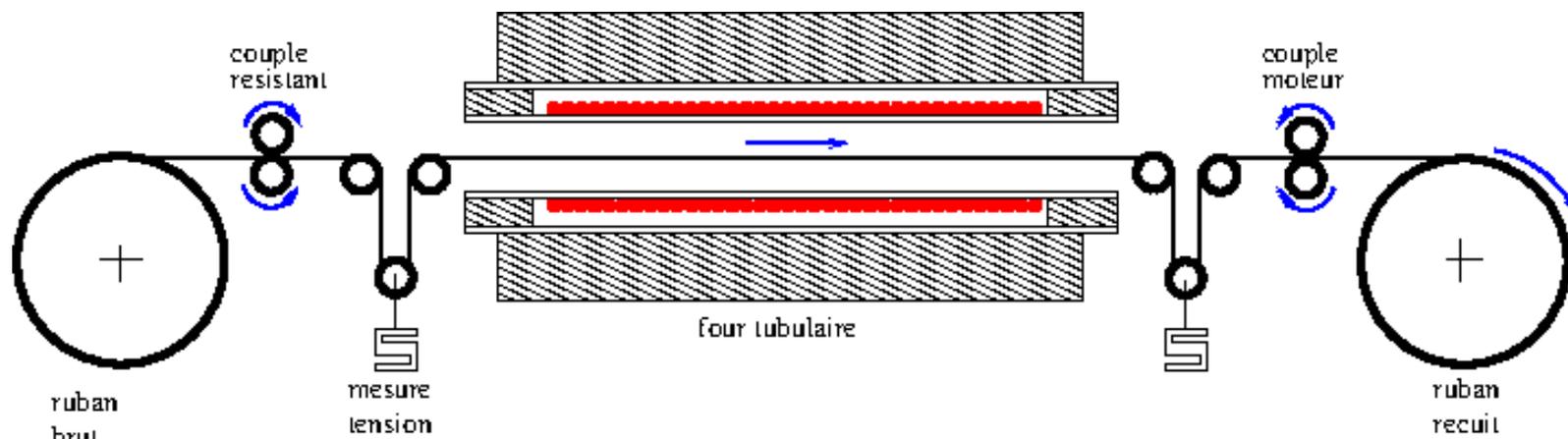


Épaisseur 15 à 30 μm , typique 20 μm



Recuit sous champ magnétique transverse



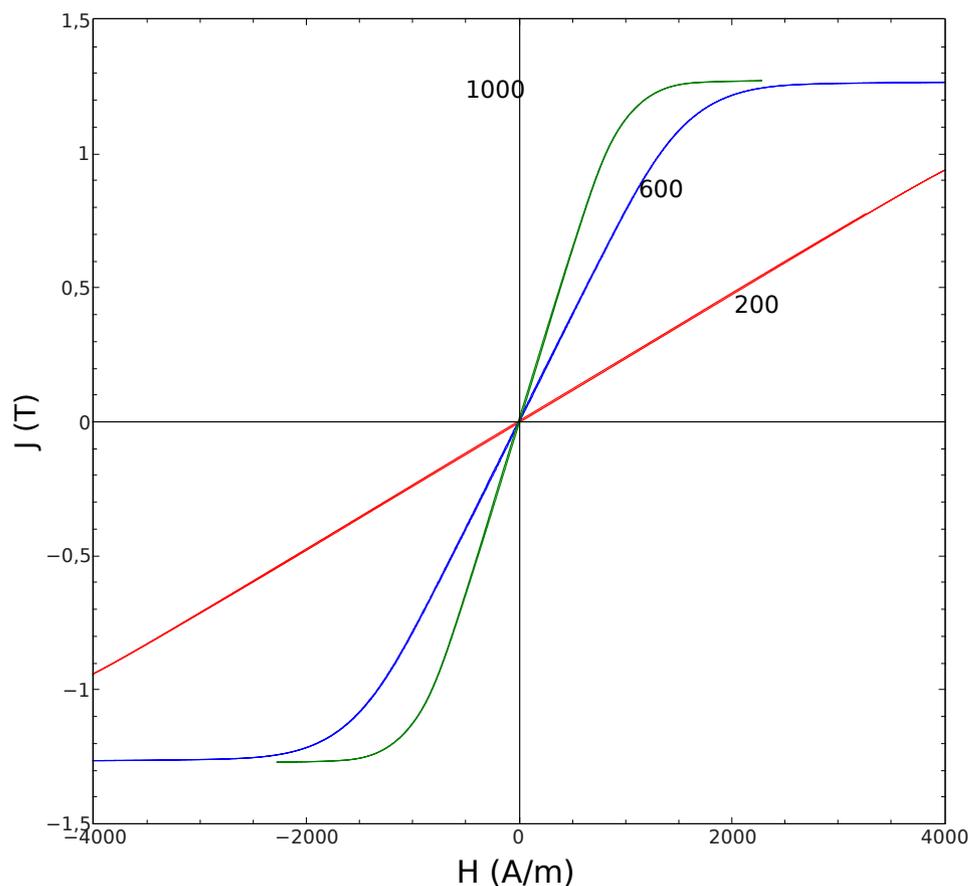


Brevet SATIE/CNRS - Arcelor

On peut stocker de l'énergie dans un matériaux doux !

$$K_U = a\sigma \text{ avec } a \simeq 4 \text{ J.m}^{-3}.\text{MPa}$$

$$\mu_R = \frac{J_S^2}{2\mu_0 a\sigma}$$



Vacuumschmelze



J_s (T)	H_c (A/m)	ρ ($10^{-8} \Omega\text{m}$)	λ (10^{-6})	μ_R
1,32	< 3	120	< 7	4700 - 5100

Vacuumschmelze



J_s (T)	H_c (A/m)	ρ ($10^{-8} \Omega\text{m}$)	λ (10^{-6})	μ_R
1,24	> 3	115	< 9	2800 - 3200

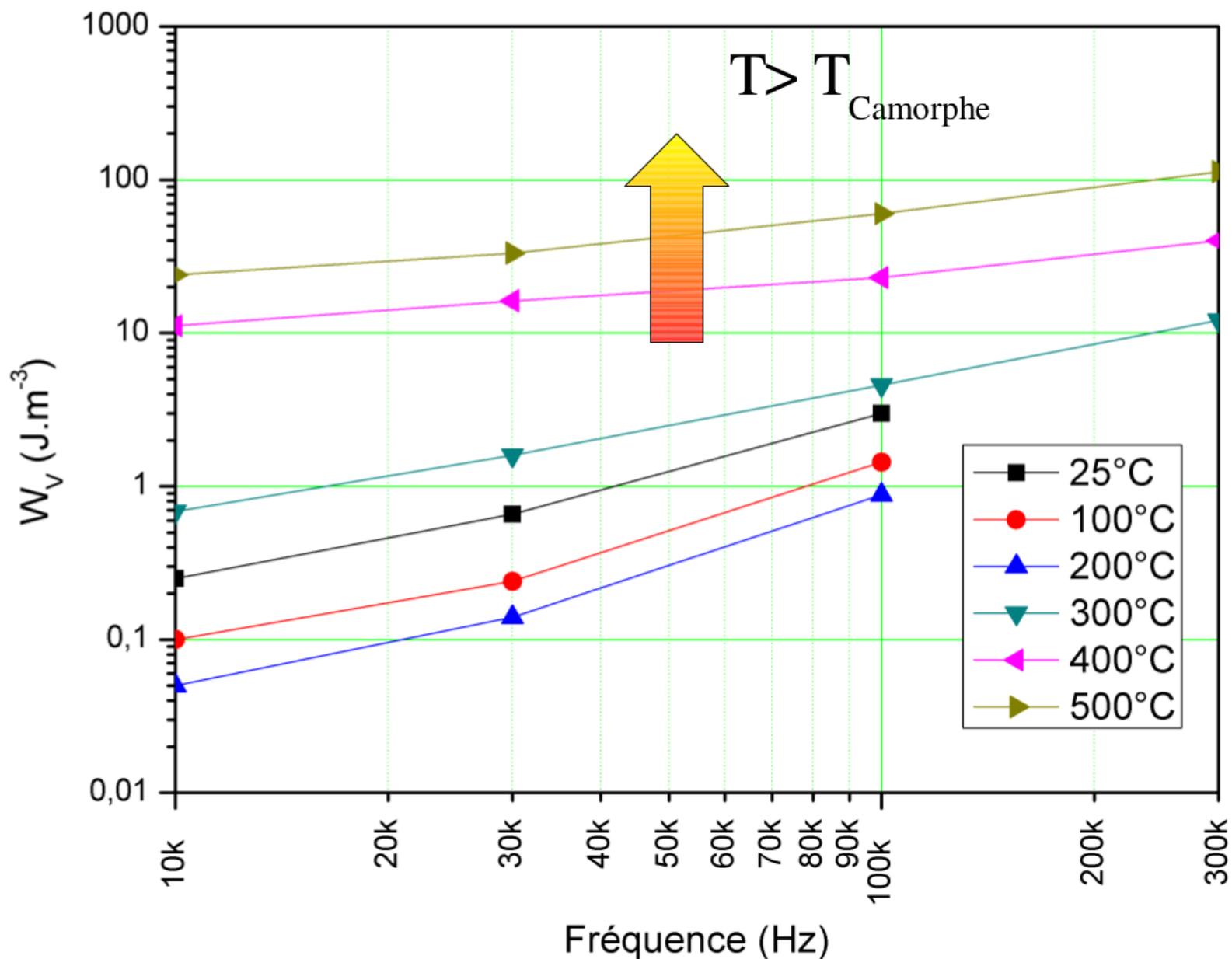
Vacuumschmelze



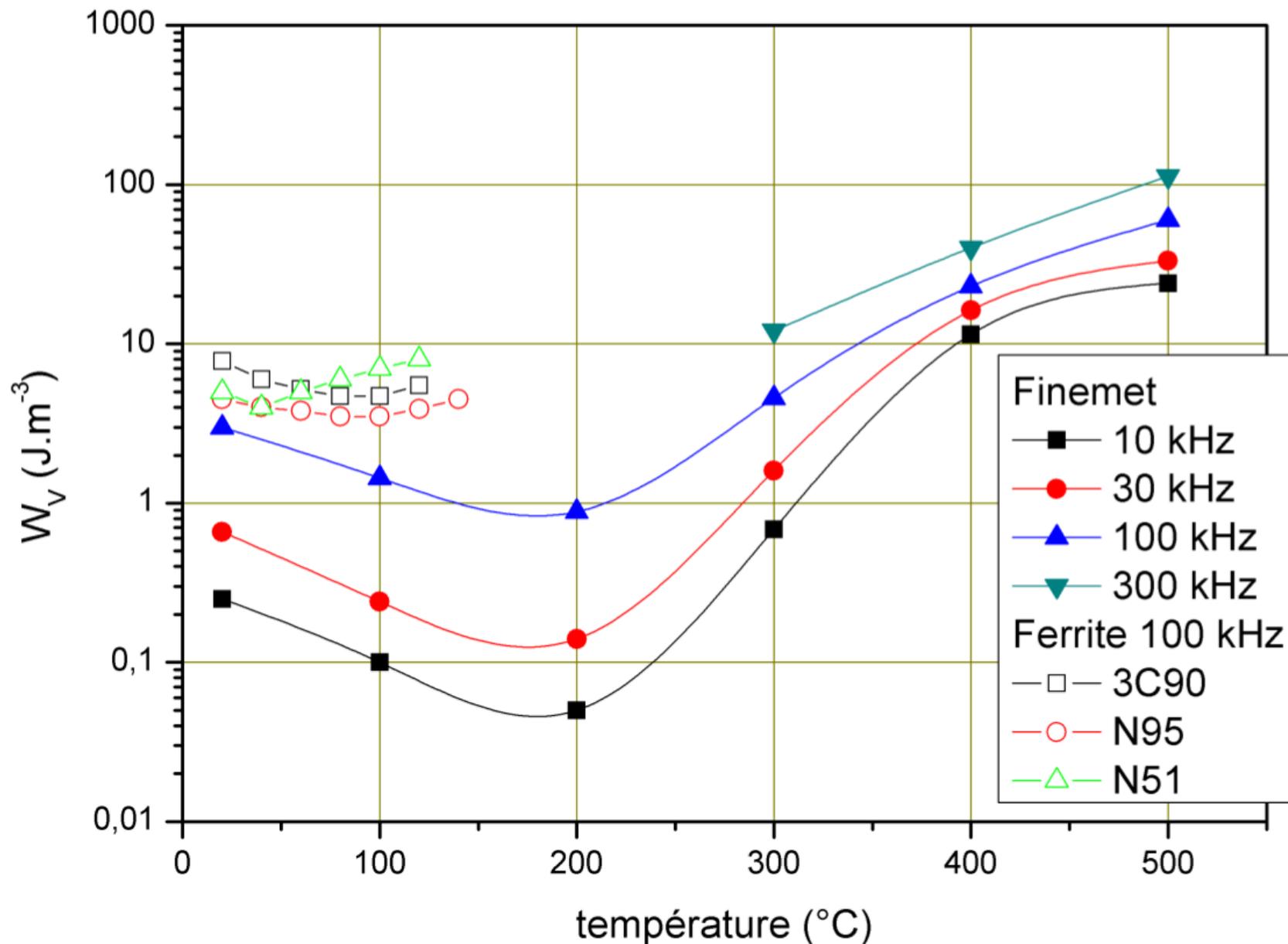
J_s (T)	H_c (A/m)	ρ ($10^{-8} \Omega\text{m}$)	λ (10^{-6})	μ_R
1,24	> 5	115	< 11	2000 - 2400



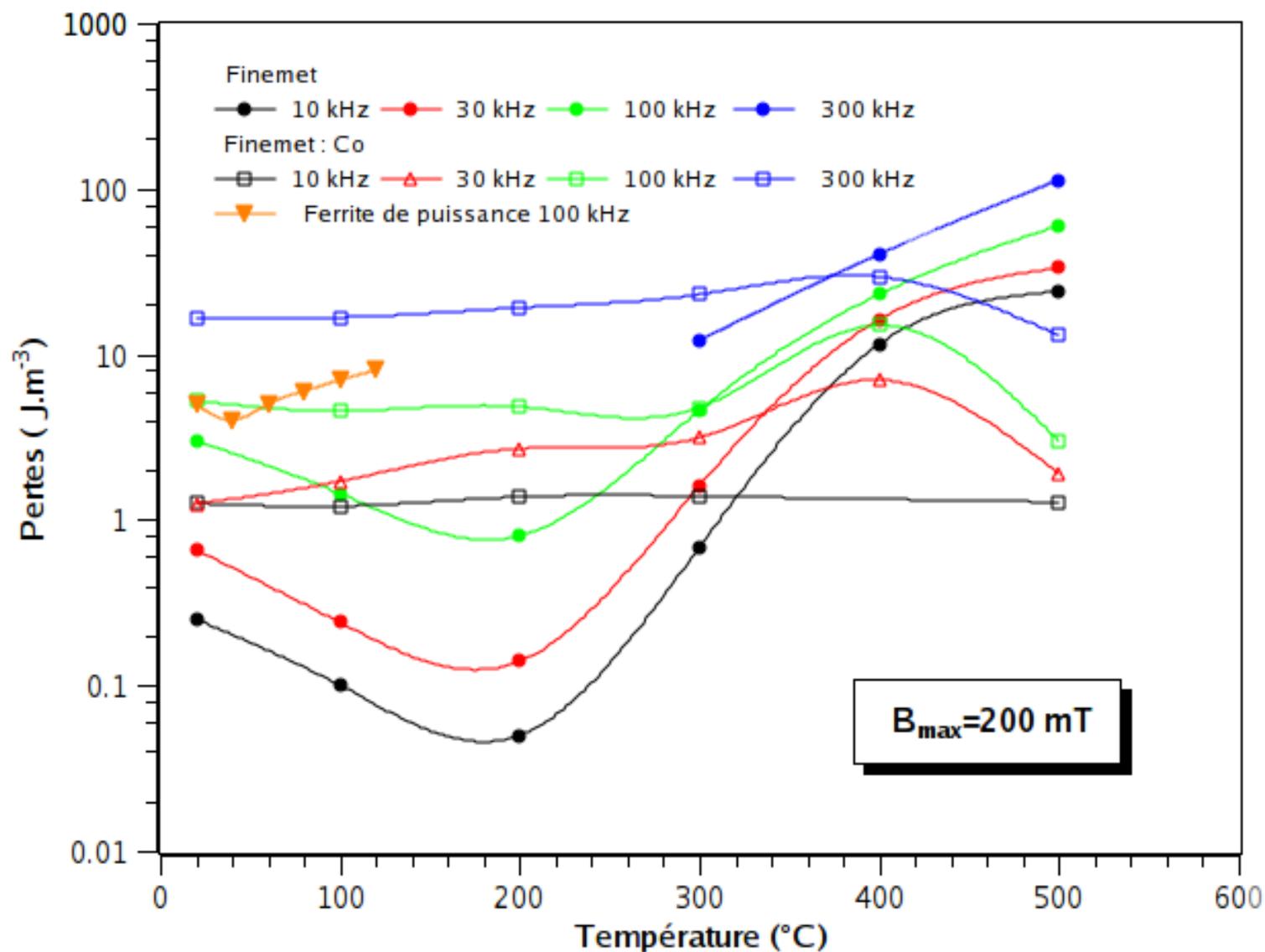
- B=200 mT



- $B=200$ mT



- B=200 mT, alliage type Finemet substitué 30 % Co



- Introduction
- Ferrites pour l'électronique de puissance
- Technologie LTCC développée par THALES R&T
- Technologie SPS développée par SATIE
- Alliages métalliques nanocristallins
- **Poudres métalliques liées**



- ✓ Induction élevée
- ✓ Entrefer réparti, perméabilité réglable par le taux de charge
- ✓ Mise en forme facile
- ✗ Champ coercitif important
- ✗ Conduction entre grains

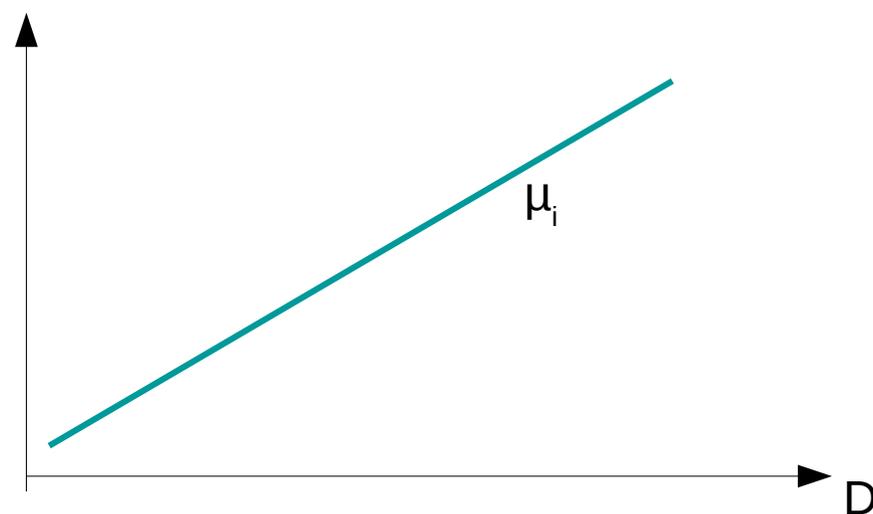
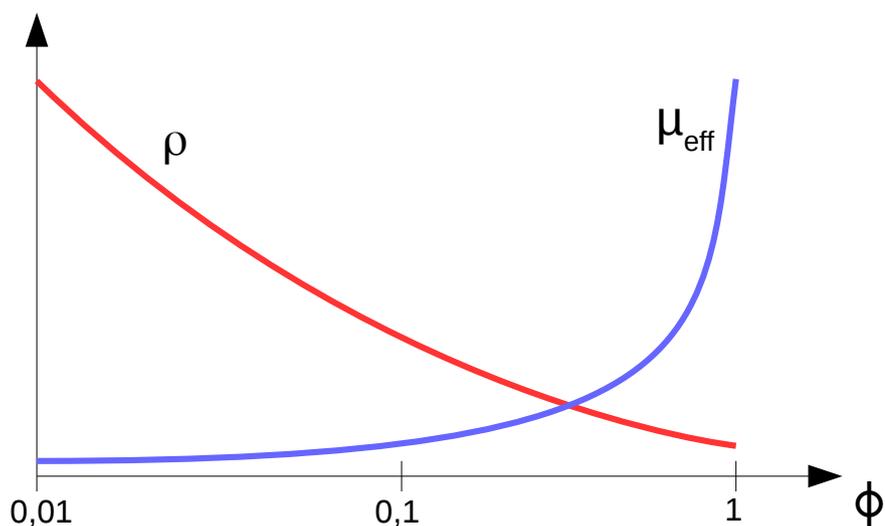
Les matériaux : qualités requises

- Forte aimantation car $B_{\max} \approx \phi^{2/3} J_S$
- Faible anisotropie car $\mu_i \propto 1/K_1$ et $\mu_{\text{eff}} \approx \frac{\mu_i}{1 + (\phi^{-1/3} - 1)\mu_i}$
- Faible magnétostriction car moulage sous pression



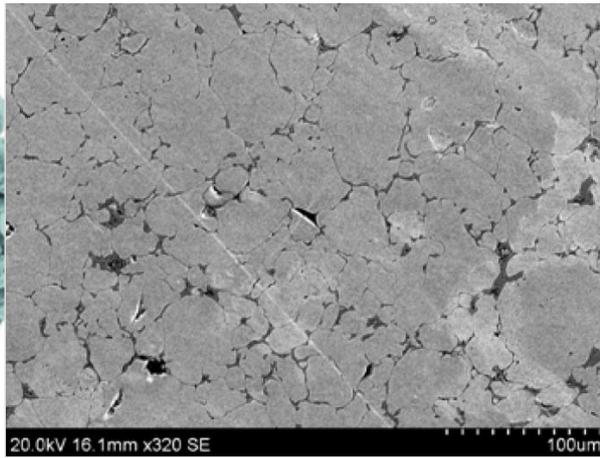
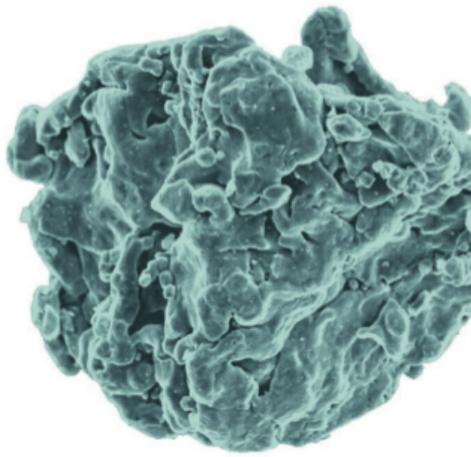
Propriétés intrinsèques pour des matériaux massifs

%at. (%m.)	J_s (T)	H_c (A/m)	ρ ($10^{-8} \Omega m$)	λ (10^{-6})	μ_i
Fe	2,16	200-1600	10	- 6	1000
Fe ₅₀ Ni ₅₀	1,6	8	60	24	4000
Fe ₁₅ Ni ₈₀ Mo ₅	0,8	< 1	60	0	100 000
Fe _{87.5} Si _{12.5} (6,5)	1,8	10	82	0,1	10 000
Fe ₈₄ Si ₁₀ Al ₆	1,05	12	80	0	20 000
α -Fe ₇₈ Si ₁₃ B ₉	1,56	3	120	25	10 000



Composition	μ_R	J_S (T)	B_{10k} (T)	H_C (A/m)	ϕ (%)	$\langle D \rangle$ (μm)	ρ (Ωm)	f_{max} (Hz)	loss	$\frac{\text{mW}}{\text{cm}^3}$
Fer carbonyl	11	1.60	0.15	1600	60	4-8	$5 \cdot 10^5$	80 M	$\mathcal{P}_{1 \text{ MHz}}^{25\text{mT}}$	=550
Fer carbonyl	20	1.90	0.30	1600	70	< 10	1	60 M	$\mathcal{P}_{1 \text{ MHz}}^{25\text{mT}}$	=800
Fer	40	1.00	0.90	1200	45		1	2 M	$\mathcal{P}_{100 \text{ kHz}}^{25\text{mT}}$	=450
Fer	75	1.80	1.30	900	62		10^{-2}	100 k	$\mathcal{P}_{100 \text{ kHz}}^{25\text{mT}}$	=250
Fer	220	2.00	1.33	200	91	40	$18 \cdot 10^{-3}$	200 k	$\mathcal{P}_{1 \text{ kHz}}^{1\text{T}}$	= 28
Fer	950	2.10	1.63	200	96	100	$70 \cdot 10^{-6}$	20 k	$\mathcal{P}_{1 \text{ kHz}}^{1\text{T}}$	= 19
Mo-permalloy	14	0.57	0.15	400	72	60		9 M	$\mathcal{P}_{100 \text{ kHz}}^{25\text{mT}}$	= 73
Mo-permalloy	160	0.74	0.70	400	92	200		700 k	$\mathcal{P}_{100 \text{ kHz}}^{25\text{mT}}$	= 37
Mo-permalloy	550	0.76	0.75	400	95	200		90 k	$\mathcal{P}_{100 \text{ kHz}}^{25\text{mT}}$	=266
50-permalloy	160	1.40	1.20		90	200		300 k	$\mathcal{P}_{100 \text{ kHz}}^{25\text{mT}}$	=100
Sendust	125	1.05	0.80		87			1 M	$\mathcal{P}_{100 \text{ kHz}}^{25\text{mT}}$	= 50
Fe-Si6.5%	90	1.78	0.90		92			3 M	$\mathcal{P}_{100 \text{ kHz}}^{25\text{mT}}$	= 80
Amorphe-Fe	270	1.56	1.50	52	>90			> 1 M	$\mathcal{P}_{100 \text{ kHz}}^{25\text{mT}}$	= 40

$\Phi > 70 \%$ risque de percolation électrique



Fe faible μ	Fer carbonyle, Micrometals		
Fe fort μ	Somalloy Hoganas		
$Fe_{50}Ni_{50}$	HighFlux, Micrometals	HighFlux, Magnetics	
$Fe_{15}Ni_{80}Mo_5$	Molly-permalloy MPP, Micrometals	Molly-permalloy MPP, Magnetics	
$Fe_{87.5}Si_{12.5}(6,5)$	FluxSan, Micrometals		
$Fe_{84}Si_{10}Al_6$	Sendust, Micrometals	Kool M μ , Magnetics	
$\alpha-Fe_{78}Si_{13}B_9$	Microlite, Hitachi		

- Ferrites MnZn : amélioration du compromis perméabilité*résistivité $\mu > 2000$ & $\rho > 10 \Omega\text{m}$
- Ferrites NiZn : diminution des pertes avec la substitution Cu/Co $\sim 100 \text{ mWcm}^{-3}$ @ 25 mT, 1 MHz
- Nanocristallins : élargissement de la gamme de perméabilité de 200 à 100 000 avec un cycle linéaire et possibilité de fonctionnement haute température
- Composites : pas de grande nouveauté, mais trop souvent méconnus.