



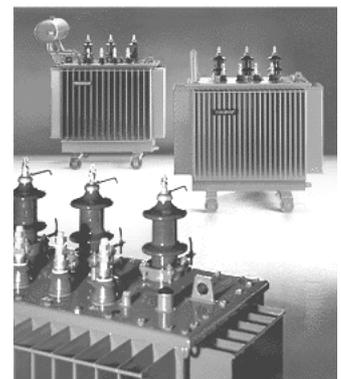
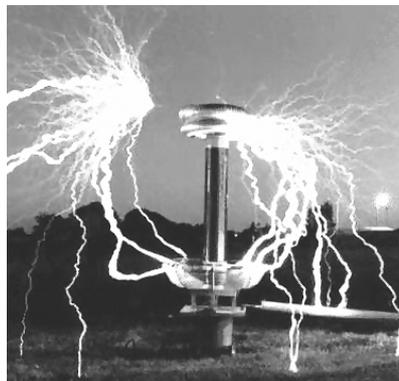
UNIVERSITÉ
TOULOUSE III
PAUL SABATIER



**MASTER 1 EEA
E2-CMD**

Travaux Pratiques

Composants Passifs et Matériaux



2018 – 2019

Table des matières

TP 1. Caractérisation et modélisation de condensateurs.....	5
TP 2. Dimensionnement et caractérisation de composants magnétiques.....	13

TP 1. CARACTERISATION ET MODELISATION DE CONDENSATEURS

OBJECTIFS DE LA MANIPULATION

L'objectif de ce TP est d'étudier la réponse fréquentielle de l'impédance de plusieurs technologies de condensateurs utilisés dans les alimentations électriques.

L'étude permettra de se rendre compte, après établissement d'un schéma équivalent, de leurs différences et en particulier en terme de leurs applications (stockage d'énergie, filtrage, ...).

MATERIEL A DISPOSITION

- Pont d'impédance HP 4194A
- Capacités : MKT Plastique 1 μ F, Céramique 1 μ F, MKP Plastique 1 μ F, Electrolytique 1 μ F, et Electrolytique 100 μ F
- PC, câble série, logiciel de pilotage du pont, logiciel de calcul : Matlab.

MANIPULATION

Mesures des caractéristiques fréquentielles

I. Préliminaires

Après un examen rapide de la documentation du pont HP 4194A en Annexe 1 :

1. Déterminer le courant maximum que peut théoriquement délivrer le pont ; quelle est alors sa tension de sortie ?
2. Déterminer la tension maximale que peut délivrer théoriquement le pont ; quel est alors le courant délivré ?
3. Tracer la caractéristique limite $V(I)$ théorique de ce pont et déterminer la zone correspondante aux points de fonctionnement possibles.
4. Que pensez vous des problèmes que peut poser la caractérisation d'un condensateur idéal en balayant la plage fréquentielle du pont ?
5. Quel problème pose la caractérisation d'une capacité électrolytique ?

II. Caractérisations

1. Réaliser les corrections en circuit ouvert et en court circuit (support court circuit). Discuter de la validité de votre correction par rapport aux composants à tester.
2. Vérifier en mode manuel que l'impédance du court circuit est bien nulle pour quelques fréquences.
3. Réaliser les réponses fréquentielles du module et de l'argument de l'impédance des capacités suivantes :
 - Capacité MKT $1\mu\text{F}$
 - Capacité céramique $1\mu\text{F}$
 - Capacité électrolytique $1\mu\text{F}$
4. Expliquer la forme de la caractéristique fréquentielle obtenue, et comparer la réponse des trois composants.
5. Proposer pour ces trois composants un modèle circuit (série ou autre) permettant de représenter cette caractéristique. Expliciter l'interprétation physique des éléments de vos modèles.
6. Déterminer les paramètres de vos modèles en utilisant vos réponses fréquentielles.
7. Réaliser la réponse fréquentielle du facteur de perte de vos capacités, peut-on distinguer les effets des pertes diélectriques par rapport aux pertes par conduction dans le diélectrique ?

8. Décrire les avantages / inconvénients des trois technologies de condensateur étudiées. On pourra s'appuyer sur les catalogues constructeurs.

III. Etude comparative

Effectuer la même démarche afin de caractériser des condensateurs issus de la même technologie mais ayant des capacités différentes :

- Capacité Electrolytique $1\mu\text{F}$
- Capacité Electrolytique $100\mu\text{F}$

Conclure.

Annexe 1. Caractéristiques générales du pont HP4194A

IMPEDANCE MEASURING INSTRUMENTS

Impedance/Gain-Phase Analyzer

HP 4194A

Test Equipment Depot
99 Washington Street
Melrose, MA 02176-6024

- Wide range impedance measurement:
100 Hz to 40 MHz, 10 mΩ to 100 MΩ
10 kHz to 100 MHz, 0.1Ω to 1 MΩ, when used with the HP 41941A/B



HP 4194A with HP 41941A

HP 4194A Impedance/Gain-Phase Analyzer

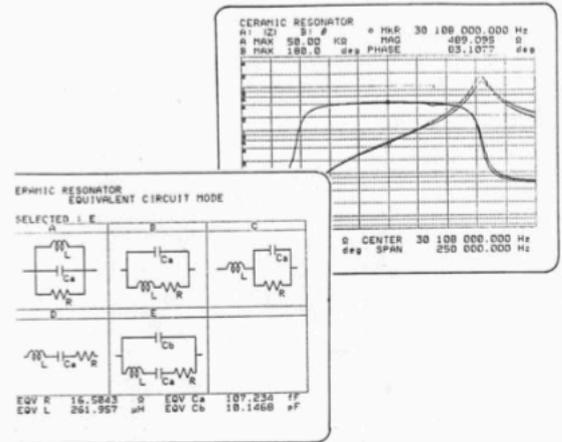
The HP 4194A impedance/gain-phase analyzer is an integrated solution for efficient measurement and analysis or go/no-go testing of components and circuits. Detailed impedance and transmission characteristics, including secondary parameter derivations, can be simply and quickly evaluated or tested. The HP 4194A can contribute to improving engineering productivity and reducing test cost. The analyzer is flexible and has wide measurement capabilities in both impedance and transmission measurements. It is also fully programmable using Auto Sequence Programming (ASP). Desired measurements and computations, including graphics analysis, can be programmed simply by storing front-panel keystroke operations, allowing you to customize measurement, computation, and analysis functions. The HP 4194A also features high-accuracy and error elimination functions to ensure reliable measurements.

Wide-Range Accurate Measurement

Featuring a wide test frequency range—100 Hz to 40 MHz for impedance measurement (10 kHz to 100 MHz when using the HP 41941A/B Impedance Probe Kit) and 10 Hz to 100 MHz for gain-phase measurements—the HP 4194A satisfies a wide spectrum of needs. Realistic device characteristics can be analyzed under actual operating conditions by varying the test frequency, test signal level, and dc bias. The HP 4194A's high degree of measurement accuracy—0.17 percent for impedance measurements (1.5 percent when using the HP 41941A/B) with an amplitude ratio of 0.1 dB—ensures that you'll improve the quality of your test devices.

Gain-phase measurement:

- 10 Hz to 100 MHz, -107 dBm to +15 dBm, 0.1 dB resolution
- Flexible measurement, computation, and analysis capabilities on a color graphic display
- Fully programmable



Quick Analysis

The HP 4194A makes high-speed measurements, (approximately 3.7 ms per point), displays results on a color CRT, and performs parameter analysis of components and circuits quickly and efficiently, substantially reducing development and evaluation time. The analysis function not only provides you with impedance and transmission characteristics, but also allows you to determine secondary parameters. Using the marker and line cursor functions, you can obtain the resonating frequency of resonators and the pass band width of band pass filters quickly.

Equivalent Circuit Analysis Function

Using the HP 4194A's equivalent circuit analysis function, you can easily and quickly obtain those equivalent circuit constants that, until now, required a number of time-consuming, complicated calculations. By using measured values, this unique function can approximate the circuit constant values of five circuit models. For example, a resonator's equivalent circuit elements or a coil's self inductance, lead resistance, and stray capacitance can be easily obtained.

The equivalent circuit analysis function also simulates the frequency characteristics of components by using derived circuit values or values you specify. By using approximation and simulation, you can compare design values to measurement values, thereby improving component design efficiency.

Auto Sequence Program (ASP)

The HP 4194A's ASP function, an internal programming feature, allows you to control all HP 4194A operations (measurement, display, and analysis) without the need for an external computer. By using ASP and actual measurement values, you can readily calculate many secondary parameters that you may need to evaluate. You can use the HP 4194A's powerful analysis functions to analyze these calculated parameters.

You can also use ASP to enhance such HP 4194A functions as alternate sweep, sweep timing control, and marker tracking. Because ASP eliminates the need for external controller, thereby eliminating data transfer time, the HP 4194A can quickly and efficiently perform production line go/no-go testing of components such as resonators and filters. All these features combine to increase your engineering and manufacturing productivity.

Increased Capabilities with the HP 41941A/B

Impedance Probe Kit

When using the HP 4194A with the HP 41941A/B impedance probe kit, you can perform reliable impedance evaluations up to 100 MHz. Measurement errors due to residual impedance and stray admittance are eliminated by using the calibration standards furnished with the HP 41941A/B and the HP 4194A's automatic calibration function. This makes it possible to make highly accurate measurements (basic measurement accuracy 1.5 to 3 percent) over a wide measurement range of 100 mΩ to 1 MΩ. Calibration accuracy is guaranteed to the tips of the HP 41941A (1.5 m) and HP 41941B (3 m) impedance probes.

The HP 41941A/B can be used as a grounded probe to evaluate the impedance of in-circuit components such as printed circuit patterns, and the input/output impedance of circuits. In addition, you can connect an external dc bias source directly to the HP 41941A/B to perform dc biased measurements up to ±150 V/0.5 A, to measure the dc characteristics of inductors, capacitors, materials, and semiconductors. To perform swept dc bias measurements, use the HP 4194A's ±40 V internal dc bias source.

Specifications

Impedance Measurements

Measurement Parameters: |Z|, |Y|, ∅, R, X, G, B, L, C, D, Q.

Twenty parameter combinations are available.

Test Frequency: 100 Hz to 40 MHz (cable length: 0m), 100 Hz to 15 MHz (cable length: 1 m), 1 mHz resolution.

OSC Level: 10 mV -1 V rms (≤10 MHz), 10 mV-0.5 V rms (>10 MHz)

(UNKNOWN terminal open), 3-digit resolution

DC Bias: 0 to ±40 V, 10 mV resolution

Measurement Terminal: 4-terminal pair configuration

Measurement Range and Maximum Resolution:

Measurement parameter	Range	Max. resolution
Z , R, X	10 mΩ to 100 MΩ	100 μΩ
Y , G, B	10 nS to 100 S	1 nS
∅	±180°	0.01°
L	1 nH to 100 kH	10 pH
C	10 fF to 0.1 F	0.1 fF
D	0.001 to 10	0.0001
Q	0.1 to 1000	0.1

Basic Measurement Accuracy: 0.17%

Level Monitor: 1 mV to 1 V rms, 1 μA -20 mA

Gain-Phase Measurements

Measurement Parameters: Tch/Rch (dB, Linear Ratio),

Tch, Rch (V, dBm, dBV), ∅ (degree, rad), τ

Tch=Test Channel, Rch=Reference Channel, τ=Group Delay

Measurement Frequency: 10 Hz to 100 MHz, 1 mHz resolution

Aperture Frequency Range (Group Delay Measurements): 0.5% to 100% of frequency span

OSC Level: -65 dBm to +15 dBm, 0.1 dB resolution

Measurement Range:

Tch/Rch: 0 to ±120 dB, 0.001 dB resolution

Tch, Rch: -107 dBm to -5 dBm (0 dB attenuator)

-87 dBm to +15 dBm (20 dB attenuator)

0.001 dB resolution

∅: ±180° (can display phase continuously with the phase scale expansion function), 0.01° resolution

τ: 0.1 ns to 1 s, 0.1 ns resolution

Basic Measurement Accuracy

Tch/Rch: 0.1 dB, 0.5°

Tch, Rch: 0.35 dBm

Level Monitor: Monitor the input level of the reference and test channels in units of dBm, dBV and Volts

Impedance Measurements Using the HP 41941A/B

The specifications listed are for the HP 4194A when used with the HP 41941A/B.

Frequency Range: 10 kHz to 100 MHz, 1 mHz resolution

OSC Level:

Option 350: 10 mV to 1.28 V rms

Option 375: 10 mV to 1.54 V rms

DC Bias:

Internal: ±40 V, ±20 mA

External: ±150 V, ±500 mA, max. 25 W

Measurement Range: 100 mΩ to 1 MΩ

Basic Measurement Accuracy: ±1.5% to 3% (≥100 kHz), ±3% to 6% (<100 kHz)

Cable Length: HP 41941A: 1.5 m, HP 41941B: 3 m

Common Specifications

Trigger Mode: Internal, external, and manual

Sweep Capabilities

Sweep Parameter: Frequency, OSC level, dc bias (impedance measurements only)

Entry: START/STOP or CENTER/SPAN

Sweep Type: LIN, LOG, ZERO SPAN (dc Bias: LIN or ZERO SPAN only)

Number of Measurement Points: 2 to 401 points

Sweep Functions: Partial sweep, expand markers sweep, program points measurement

Display

CRT: 7.5-in color CRT

Display Mode: Rectangular (X- A & B), rectangular (A - B), table

Display Control: Autoscale, superimpose, and storage

Analysis

Marker: Single, delta, double markers

Line-Cursor: Line-cursor, delta-line cursor

Equivalent Circuit Function: Approximation, simulation

Arithmetic Operation

Data Register Manipulation: Use arithmetic operations and functions to manipulate data registers

Go/No-Go Limits

Programming

Auto Sequence Program (ASP): Control the HP 4194A's operation with an internal program language. ASP can be entered using the front-panel keys or downloaded from HP-IB

Program Memory Size: 20 kB of nonvolatile memory

Copy: Dump, plot, print mode

General Specifications

Operating Temperature and Humidity: 0 to 40° C

(HP 41941A/B: -20 to +65° C), ≤95% RH at 40° C

Storage Temperature: -30° C to +60° C (HP 41941A/B: -40 to +65° C)

Safety: Based on IEC-348, UL-1244

Power: 100, 120, 220V ±10%, 240 V -10% +5%, 48 to 66 Hz, 400 VA (max.)

Size: 425 mm W x 375 mm H x 620 mm D (16.73 in x 14.76 in x 24.41 in)

Weight: Net, approximately 37 kg (81.4 lb)

Reference Data

Typical Measurement Speed

Impedance: Approximately 3.7 ms/point

Gain-phase: Approximately 3.5 ms/point

Impedance when used with the HP 41941A/B: Approximately 6 ms/point

Accessories Furnished

HP 16047D: Direct Coupled Test Fixture

HP 8120-1838: 30-cm BNC Cable (2 ea) (Option 350)

HP 04194-61640: 30-cm BNC Cable (2 ea) (Option 375)

HP 8120-1839: 60-cm NNC Cable (Option 350)

HP 04194-61641: 60-cm NNC Cable (Option 375)

HP 1250-0080: BNC Adapter

Key Literature

HP 4194A Impedance/Gain Phase Analyzer Data Sheet, p/n 5952-7802

Ordering Information

HP 4194A Impedance/Gain-Phase Analyzer

Opt 350* 50 Ω System

Opt 375* 75 Ω System

Opt 001 High-Stability Frequency Reference

HP 41941A* Impedance Probe Kit (1.5 m)

HP 41941B* Impedance Probe Kit (3 m)

Annexe 2. Technologies de condensateurs

CONDENSATEURS A FILM PLASTIQUE

Les diélectriques employés sont des matériaux plastiques :

- Le polystyrène (styroflex), marquage MKS
- Le polyester (mylar), marquage MKT 1
- Le polycarbonate, marquage MKC
- Le polypropylène, marquage MKP

Tableau 1. Propriétés des matériaux utilisés dans les condensateurs à film plastique

Matériau	Permittivité relative	Rigidité diélectrique kV/mm
Polyester	3.3	100 à 200
Polyéthylène HD	2.25 - 2.4	90
Polypropylène	2.2	> 20
Polycarbonate	3	30
Polystyrène (styroflex...)	2.5	40 - 120

Afin de réduire le volume des condensateurs, on a pensé métalliser également le film plastique. Une marge est réservée sur un des côtés des deux films afin de pouvoir métalliser la tranche et adopter le principe de fabrication retenu pour les condensateurs au papier et à l'aluminium. De cette façon, on obtient un condensateur compact, de faible inductance.

La protection externe peut être assurée selon le type de condensateur par un enrobage en résine moulée sous pression ou par des boîtiers métalliques remplis de cire ou d'huile.

Parfois, le corps du composant est marqué par un anneau afin que, dans les montages mettant en jeu des tensions élevées, la borne la plus proche de cette marque soit à un potentiel jouant le rôle de blindage pour le condensateur (c'est souvent le potentiel le plus bas).

La gamme de leur capacité est comprise entre une dizaine de picofarads et une dizaine de microfarads ; la stabilité est bonne au-delà même de 85 °C et les valeurs de tension nominale s'échelonnent de 25 V à plus de 2000 V.

Les condensateurs à film plastique sont largement employés car ils sont d'un coût réduit et présentent de bonnes caractéristiques électriques.

CONDENSATEURS ELECTROLYTIQUES

Les condensateurs électrolytiques en aluminium appartiennent à la catégorie des condensateurs fixes enroulés. Ils se différencient des autres types (papier, film plastique...) par le fait qu'une armature (anode) est constituée d'une feuille d'aluminium lisse ou gravée, sur laquelle a été déposée une couche très mince d'alumine par un procédé chimique. Le diélectrique est ici formé par l'alumine et la seconde armature est constituée par l'électrolyte retenu dans du papier poreux appelé parfois «papier buvard». La liaison avec l'électrolyte est réalisée au moyen d'une deuxième feuille d'aluminium, appelée cathode sur laquelle est fixée une borne de sortie. L'autre armature (anode) possède également une borne de sortie qu'il faudra relier impérativement à un potentiel plus grand que celui de la cathode (Figure 1).

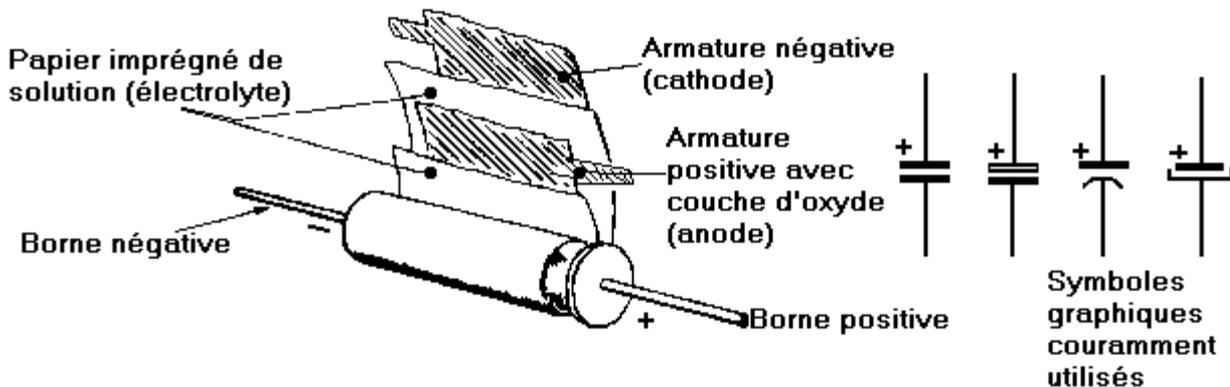


Figure 1. Constitution d'un condensateur « bobiné » à électrolyte

CONDENSATEURS CERAMIQUES

On distingue les céramiques de classe I (type NPO /COG) présentant une permittivité relative ϵ_r faible et une grande stabilité en température et les céramiques de classe II présentant de hautes permittivité relative (>1000) au dépend d'une variation de la permittivité avec la température. En électronique de puissance, les capacités céramiques sont particulièrement appréciées pour leur faible «ESR». Les condensateurs céramiques sont alors distingués en fonction de leur classe en température selon les normes EIA et CECC.

Attention aux variations de capacité en fonction de la température et de la tension appliquée (effet ferroélectrique, ...).

Pour plus d'informations, télécharger les documentations des constructeurs :

- <http://www.epcos.com>
- <http://www.exxelia.com>
- <http://www.avx.com>
- ...

TP 2. DIMENSIONNEMENT ET CARACTERISATION DE COMPOSANTS MAGNETIQUES

OBJECTIFS DE LA MANIPULATION

L'objectif de ce TP est de réaliser le dimensionnement d'une inductance de lissage et de la caractériser en fréquence.

L'étude de l'impédance de la bobine permettra de vérifier la validité de la procédure de dimensionnement et d'obtenir différents modèles sous la forme de schémas électriques équivalents. Les paramètres de ces modèles seront analysés au regard des phénomènes physiques mis en jeu dans le composant en particulier l'origine des pertes.

MATERIEL MIS A DISPOSITION

- Inductances sans noyau bobinées (cuivre monobrin section circulaire et fils de Litz)
- Pont de mesure Fluke PM 6306
- PC, câble série, logiciel de pilotage du pont : FLUKE_M1, logiciel de calcul : Matlab

MANIPULATION

I. Préliminaires

Après un examen rapide de la documentation du pont Fluke PM 6306 en Annexe 3 :

1. Déterminer le courant maximum que peut théoriquement délivrer le pont ; quelle est alors sa tension de sortie ?
2. Déterminer la tension maximale que peut délivrer théoriquement le pont ; quel est alors le courant délivré ?
3. Tracer la caractéristique limite $V(I)$ théorique de ce pont et déterminer la zone correspondante aux points de fonctionnements possibles.

II. Dimensionnement

On souhaite réaliser une inductance de lissage à placer à la sortie d'un hacheur série ayant les caractéristiques suivantes :

- $L = 100 \mu\text{H}$
- Courant moyen $I_{\text{moy}} = 10 \text{ A}$
- Fréquence de découpage 20 kHz
- Ondulation de courant admissible $\Delta I = 0,5 \text{ A}$.

On prendra :

- La densité de courant $J = 5 \text{ A.mm}^{-2}$
- Induction maximale pour la ferrite $B_s = 0,3 \text{ T}$
- Le coefficient de foisonnement : $k_b = 1,5$

1. Calculer le courant efficace maximum qui traversera la bobine, le comparer au courant moyen et au courant maximum. Conclure sur le courant à utiliser dans ce cas pour réaliser rapidement le dimensionnement.
2. Déterminer l'énergie magnétique maximale W_L à stocker.
3. Réaliser le dimensionnement du tore équivalent au circuit magnétique et celui du bobinage. On précisera pour cela la section effective du circuit magnétique A_e et la section de la fenêtre de bobinage S_b .
4. Effectuer alors, sur la base de la série de Circuits Magnétique ETD, le choix de la taille. Déterminer l'épaisseur de l'entrefer éventuel et le nombre de spires. Utiliser pour cela les données du constructeur en Annexe 4.

III. Caractérisation fréquentielle

On souhaite séparer, dans la bobine réalisée, les pertes Cuivre dans le bobinage des pertes Fer dans le circuit magnétique et étudier le comportement en fréquence de ces pertes. D'autre part, on

souhaite étudier l'évolution de l'impédance de la bobine en fonction de la fréquence et déterminer en particulier, pour le modèle série (R,L) les évolutions éventuelles de la résistance et de l'inductance.

III.1. Pertes dans le bobinage : Intérêt des fils de Litz

On dispose de deux bobinages de test (sans circuit magnétique) : l'un est constitué de fils de diamètre 0,8 mm en cuivre massif de section circulaire, l'autre est réalisé à l'aide de fils de Litz comportant 10 brins de 0,28 mm de diamètre et isolés.

1. Comparer les sections de cuivre utiles de ces deux bobinages.
2. Calculer l'épaisseur de peau dans le cuivre pour un courant circulant à fréquence de 50 Hz, 100 kHz et 1MHz. Rappeler la condition que doit satisfaire le diamètre du fil afin de pouvoir négliger l'effet de peau. Calculer les diamètres limites dans les trois cas précédents. Conclure sur la gamme de fréquence où l'effet de peau sera visible dans le cas des sections proposées.

On rappelle que la profondeur de pénétration δ du courant dans un métal de résistivité ρ et de perméabilité μ est donné par :

$$\delta = \sqrt{\frac{\rho}{\pi \cdot \mu \cdot f}}$$

Pour le cuivre, $\rho_{\text{cu}} = 1,7 \cdot 10^{-6} \Omega \cdot \text{cm}$ et $\mu_{\text{cu}} = \mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{H} \cdot \text{m}^{-1}$

3. Proposer une méthode pratique pour évaluer l'effet de peau dans les bobinages proposés à l'aide de l'impédance mètre.
4. Réaliser les corrections en court circuit (support court circuit) et circuit ouvert. Discuter de la validité de votre correction par rapport aux composants à tester. Vérifier en mode manuel que l'impédance du court circuit est bien nulle pour quelques fréquences.
5. Mesurer la réponse fréquentielle de l'impédance des 2 bobines (module et phase) et sauvegarder le fichier au format txt.
6. Ouvrir les fichiers sauvegardés sous Matlab et tracer sur le même graphe la partie réelle et imaginaire de l'impédance en fonction de la fréquence en coordonnées log-log.
7. Commenter les caractéristiques obtenues dans chaque cas (superposer les tracés).
8. Comment évolue la partie imaginaire de l'impédance ? Quelle est la valeur de l'inductance dans chaque cas ? Comparer ces valeurs à celles obtenues avec l'approche théorique.
9. Montrer que l'évolution de la partie réelle de l'impédance peut être restituée par un modèle de la forme :

$$\text{Re}(z) = R_{cc} \left(1 + \frac{\omega}{\omega_0} \right)^\alpha$$

Déterminer pour cela graphiquement les paramètres R_{cc} , ω_0 et α pour les cas 0,8 mm et fils de Litz. Quel est le sens physique de R_{cc} ? Conclure sur l'origine des variations des paramètres obtenus.

10. Faut-il dans le cadre de notre dimensionnement avoir recours aux fils de Litz ? Donner une application classique ou ce type de fil est utilisé.

III.2. Caractérisation de la bobine avec circuit magnétique

III.2.1 Circuit magnétique sans entrefer

1. Réaliser l'analyse fréquentielle des bobines avec le circuit magnétique (module et phase) de 50 Hz à 1 MHz (entre 20 et 50 points de mesure).
2. Tracer la réponse fréquentielle de l'impédance mesurée à l'aide de Matlab (module et phase / partie réelle et imaginaire).
3. Calculer et tracer les évolutions de l'induction maximale en fonction de la fréquence. Conclure sur l'évolution éventuelle des caractéristiques du matériau en fonction du point de fonctionnement magnétique.
4. Proposer un modèle sous la forme d'un schéma équivalent électrique. Evaluer graphiquement les paramètres de ce modèle et superposer sur le même tracé la réponse expérimentale et celle du modèle dans la gamme de fréquence des mesures.
5. Estimer la partie réelle de la perméabilité magnétique du matériau μ_r' et comparer avec la documentation du constructeur.
6. Proposer une méthode permettant de séparer les pertes Fer dans le matériau magnétique et les pertes Cuivre dans le bobinage. Préciser vos hypothèses.
7. Comparer dans le domaine fréquentiel les facteurs de dissipation $\tan(\delta_{Cu})$ et $\tan(\delta_m)$ respectivement dans le cuivre et dans le fer.
8. Estimer la partie imaginaire de la perméabilité du matériau μ_r'' (on regroupe ici l'ensemble des pertes dans le circuit magnétique). Tracez les évolutions fréquentielle de μ_r'' et comparer avec la documentation constructeur.

III.2.2 Circuit magnétique avec entrefer

1. Réaliser l'analyse du circuit magnétique avec entrefer en utilisant les deux bobinages. Vérifier votre dimensionnement.
Une méthode de découpe d'un entrefer à l'aide d'une scie à fil (diamanté) est présentée en Annexe 6 (Equipement de prototypage LAPLACE - 3DPHI).
2. On montre que les pertes dans le circuit magnétique avec entrefer sont plus faibles que sans à cause de la variation de volume de circuit magnétique (pour la même induction). Vérifier l'expression suivante :

$$\frac{\tan(\delta_{ef})}{\mu_e} = \frac{\tan(\delta_m)}{\mu_r}$$

3. Montrer que l'effet de peau seul n'explique pas l'écart des parties réelles des impédances des deux bobinages. Proposer un phénomène causant des pertes d'énergie supplémentaires dans le cas du conducteur massif en présence de l'entrefer. Conclure.

Annexe 3. Caractéristiques générales du pont PM 6306



Figure 2. Face avant du pont d'impédance

	PM 6306	PM 6304
AC Test mode		
Test frequency	50, 60, 100, 120 Hz 200 Hz to 100 kHz (100 Hz steps) 100 kHz to 1 MHz (1 kHz steps)	50, 60, 100, 120 Hz 200 Hz to 20 kHz (100 Hz steps) 100 kHz
Test frequency accuracy	0.01%	0.01%
Test signal levels	50 mV to 2V (10 mV steps) via 100Ω	50 mV via 100Ω 1V via 100Ω 2V via 400Ω
Basic measurement accuracy at normal measurement mode	0.1% ± 1 digit (for ≥ 0.25V, ≤ 50 kHz) 0.1% * (f / 50 kHz) ± 1 digit (for ≥ 0.25V, > 50 kHz) 0.1% * (0.25V/Vr) ± 1 digit (for < 0.25 V, ≤ 50 kHz)	0.05% ± 1 digit (for PM 6304C, ≤ 2 kHz) 0.1% ± 1 digit (for ≤ 20 kHz) 0.4% ± 1 digit (100 kHz) 0.5% ± 1 digit (for 50 mV, ≤ 20 kHz) 2.0% ± 1 digit (for 50 mV, 100 kHz)
DC bias		
Internal	0 to 10V (0.1V steps)	2V
External	0 to 40V	0 to 40V
DC Test mode (Optional)		
Test signal levels	50 mV to 2 V (10 mV steps) via 100Ω	300 mV via 100Ω 1 V via 100Ω 2 V via 400Ω
Basic measurement accuracy at normal measurement mode	0.1% ± 1 digit (for ≥ 0.25V)	0.1% ± 1 digit (for 1V)
Contact check (PM 6306 only)		
Pass	< 3Ω	-
Fail	≥ 3Ω (with indication of failed connection lead)	-
Maximum measuring ranges		
Impedance / Resistance AC Z or R _{AC}		0.0000Ω to 200 MΩ
Resistance DC R _{DC}		0.0000Ω to 50 MΩ
Capacitance C		0.00 pF to 31.8F
Inductance L		0.00 μH to 637 kH
Quality factor Q		0.000 to 1000
Dissipation factor D		0.000 to 1000
Phase angle φ		-179 to +180 deg
Voltage monitor V _X		0.1 μV to 2.00V
Current monitor I _X		0.005 μA to 10.0 mA
Maximum resolution		
Impedance / Resistance AC Z or R _{AC}		0.1 mΩ
Resistance DC R _{DC}		0.1 mΩ
Capacitance C		0.01 pF
Inductance L		0.01 μH
Quality factor Q		0.001
Dissipation factor D		0.001
Phase angle φ		0.1 deg
Voltage monitor V _X		0.1 μV
Current monitor I _X		0.001 μA
Circuit diagram		
Display	1 of 7 different equivalent circuit diagrams	
Auto mode		
Read-out	Dominant and secondary parameter	
Equivalent circuit diagram	Parallel for R+C, Serial for R+L	
Manual mode		
Read-out	Dominant and secondary parameter or Z, φ, D, Q, V _X , I _X	
Equivalent circuit diagram	Parallel or serial selectable	
Average function		
Function	Exponential averaging in continuous mode	
Levels	3 (and off)	1 (and off)
Deviation mode (PM 6306 only)		
Relative range in respect	-100% to +100%	-
Measuring modes		
Normal		
Continuous	2 measurements/s	
Single	Triggered via "TRIG" key, Triggered via handler interface Triggered via IEEE-488 or RS-232	
Test frequency	50, 60, 100, 120 Hz 200 Hz to 100 kHz (100 Hz steps) 100 kHz to 1 MHz (1 kHz steps) DC (optional)	50, 60, 100, 120 Hz 200 Hz to 20 kHz (100 Hz steps) 100 kHz DC (optional)
Read-out	Display or via IEEE-488 or RS-232 interface	
Fast		
Max. speed	10 measurements/s	
Test frequency	200 Hz to 100 kHz (200 Hz steps) 100 kHz to 1 MHz (1 kHz steps) DC (optional)	200 Hz to 20 kHz (200 Hz steps) 100 kHz DC (optional)
Single	Triggered via handler interface Triggered via IEEE-488 or RS-232	
Read-out	Via IEEE or RS-232 interface (display blanked)	

Options for PM 6306 and PM 6304

PM 9548

Control capability
Interface functions

Address range
Remote lock-out

Special functions

Signals

PM 9549

Mode

Control capability
Baud rates

Data bits

Stop bits

Parity

Xon/Xoff handshake

Hardware handshake

Signals

Connector

PM 9565

Technical specification

PM 9566

Signals

Inputs

Outputs

Max. switchable current

Max. switchable voltage

IEEE-488 interface

All functions
AH1, L3, RL1, SR1, SH1, T6

L..30

Go to local by front panel key "LOCAL"
Learn mode / device identification mode
All optically isolated

RS-232 interface

Communication mode
Printing mode
All functions
110, 150, 300, 600, 1200, 2400, 4800, 9600, 19200

7 or 8

1 (2 for 110 baud only)

Odd, Even, None

On or Off

DSR/DTR and CTS/RTS

All optically isolated

9-pin D-connector, male

DC test measurement option

See "DC test mode"

Handler interface

All optically isolated

Trigger input

Bin 0-9 indication

FAIL indication

200 mA

40V

Logiciel de contrôle du pont

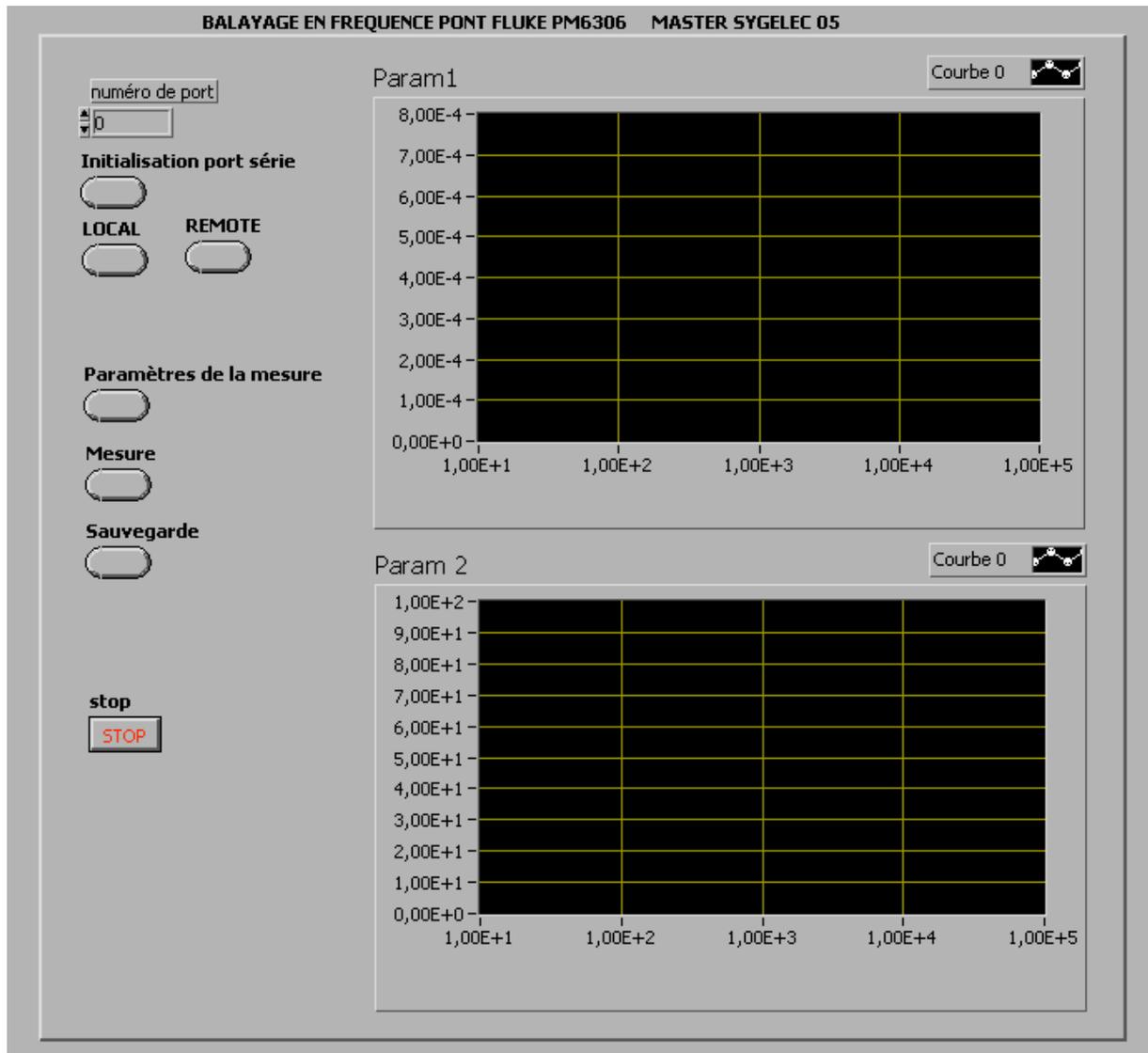


Figure 3. Ecran d'accueil

Après avoir connecté le port série faire :

- Initialisation du port série
- REMOTE
- Vérifier sur l'affichage du pont la présence de l'indicateur REMOTE
- Réaliser le paramétrage (voir ci dessous)
- Réaliser les mesures (MESURE)
- Sauvegarder votre fichier (.txt)

PARAMETRAGE DE LA MESURE :

Lors de l'activation du paramétrage, l'écran suivant apparaît :

The screenshot shows a configuration window with five main sections, each with a label on the right side:

- Configuration du Balayage:** Contains three input fields: "Fréquence de départ" (50,00), "Fréquence de fin" (100000,00), and "Nombre de points total" (100,00).
- Source:** Contains four controls: "Niveau AC" (1,00), "TEST SIG" (radio buttons for DC and AC), "DC BIAS" (radio buttons for EXTERNE and INTERNE), and "BIAS VOL" (0,00).
- Acquisition:** Contains three controls: "Moyennage" (radio buttons for ON and OFF), "nombre de points pour moyenne" (3,00), and "Mesure rapide" (radio buttons for ON and OFF).
- Modèle:** Contains two controls: "modèle" (radio buttons for PARALLELE and SERIE) and "Paramètre affiché sur le pont" (AUTO).
- Paramètres sauves:** Contains five dropdown menus: "Paramètre 1" (FREQUENCE), "Paramètre 2" (CAPACITE), "Paramètre 3" (FACTEUR D), "Paramètre 4" (V MESURE), and "Paramètre 5" (I MESURE).

An "OK" button is located at the bottom right of the window.

Figure 4. Fenêtre de paramétrage

Première ligne

Configurer les paramètres du balayage. Les points de mesures sont calculés pour suivre une progression logarithmique en fonction de la liste des fréquences que propose le générateur du pont.

Deuxième ligne

- Imposer le niveau AC de tension du générateur (valeur efficace).
- Le type de signal AC ou DC
- La polarisation éventuelle interne ou externe
- La valeur de la polarisation continue (interne)

Troisième ligne

Indiquer le modèle série ou parallèle et le type de paramètre affiché sur le pont. C'est seulement le paramètre qui apparaîtra sur l'afficheur du pont durant le balayage.

Quatrième ligne

Choisir dans les listes proposées les paramètres sauvegardés lors de la sauvegarde ultérieure du fichier. Cette ligne correspond aux colonnes respectives du fichier.

L'affichage à l'écran, durant le balayage réalise le tracé des paramètres 2 et 3 en fonction du paramètre 1.

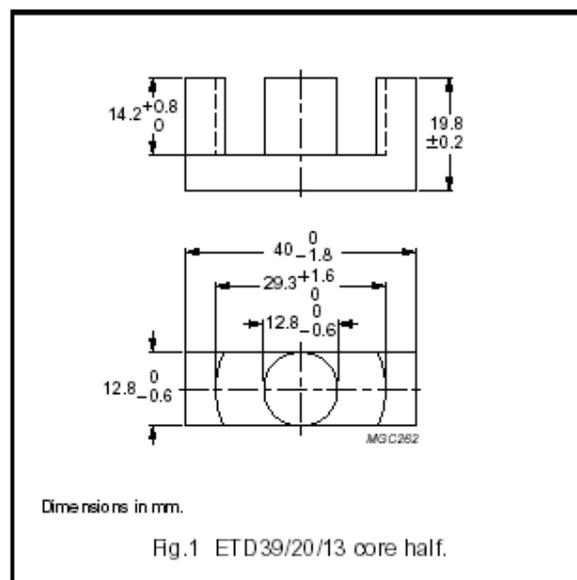
Annexe 4.

NOYAU ETD 39

CORE SETS

Effective core parameters

SYMBOL	PARAMETER	VALUE	UNIT
$\Sigma(l/A)$	core factor (C1)	0.737	mm ⁻¹
V_e	effective volume	11 500	mm ³
l_e	effective length	92.2	mm
A_e	effective area	125	mm ²
A_{min}	minimum area	123	mm ²
m	mass of core half	≈ 30	g



Core halves

Clamping force for A_L measurements, 40 ± 20 N. Gapped cores are available on request.

GRADE	A_L (nH)	μ_e	AIR GAP (μ m)	TYPE NUMBER
3C90	$3000 \pm 25\%$	≈ 1760	≈ 0	ETD39/20/13-3C90
3C94	$3000 \pm 25\%$	≈ 1760	≈ 0	ETD39/20/13-3C94
3F3	$2800 \pm 25\%$	≈ 1640	≈ 0	ETD39/20/13-3F3

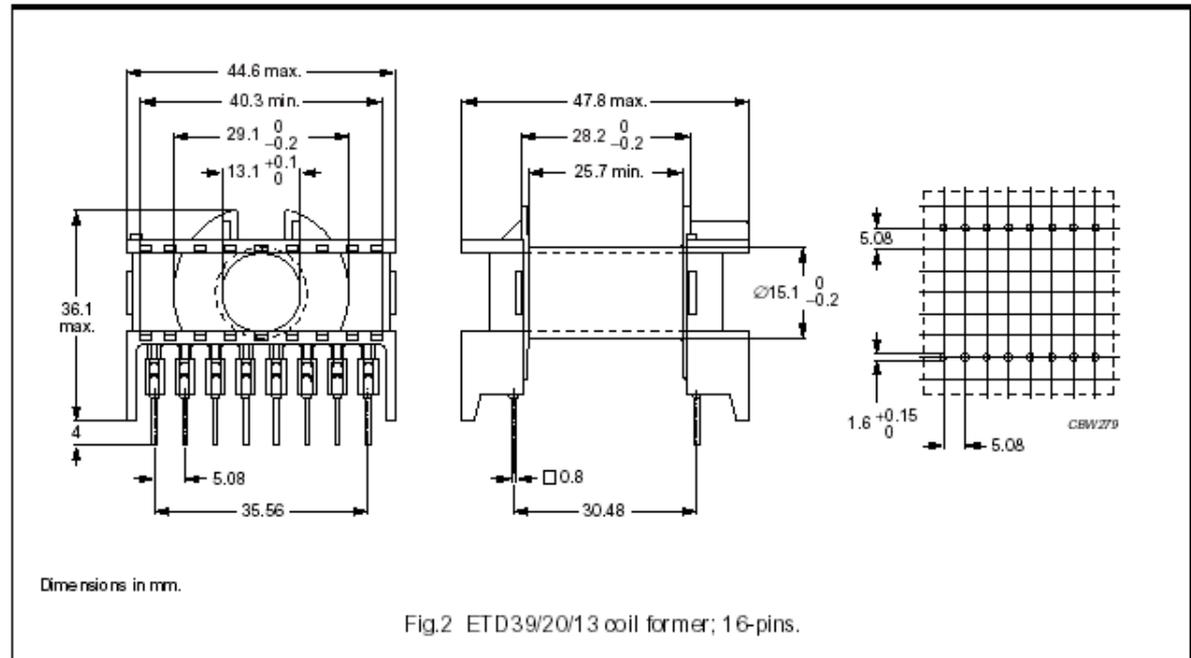
Properties of core sets under power conditions

GRADE	B (mT) at	CORE LOSS (W) at			
	H = 250 A/m; f = 25 kHz; T = 100 °C	f = 25 kHz; B = 200 mT; T = 100 °C	f = 100 kHz; B = 100 mT; T = 100 °C	f = 100 kHz; B = 200 mT; T = 100 °C	f = 400 kHz; B = 50 mT; T = 100 °C
3C90	≥330	≤ 1.4	≤ 1.5	–	–
3C94	≥330	–	≤ 1.2	≤ 6.0	–
3F3	≥320	–	≤ 1.4	–	≤ 2.5

COIL FORMER

General data 16-pins ETD39/20/13 coil former

PARAMETER	SPECIFICATION
Coil former material	polybutyleneterephthalate (PBT), glass-reinforced, flame retardant in accordance with "UL 94V-0"; UL file number E45329(R)
Pin material	copper-tin alloy (CuSn), tin-lead alloy (SnPb) plated, transition to lead-free (Sn) ongoing.
Maximum operating temperature	155 °C, "IEC 60085", class F
Resistance to soldering heat	"IEC 60068-2-20", Part 2, Test Tb, method 1B, 350 °C, 3.5 s
Solderability	"IEC 60068-2-20", Part 2, Test Ta, method 1



Winding data for 16-pins ETD39/20/13 coil former

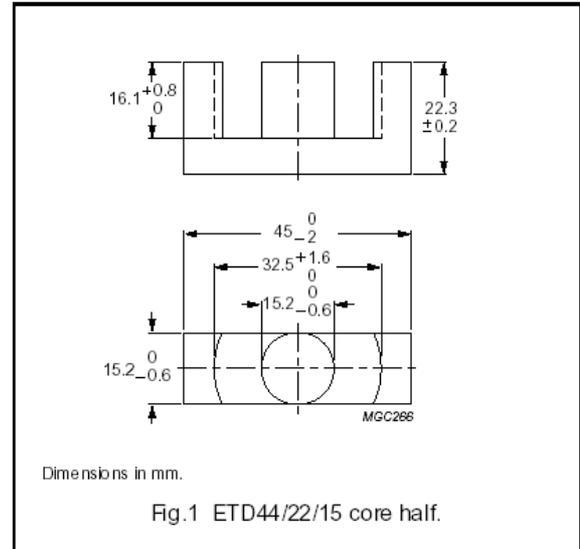
NUMBER OF SECTIONS	WINDING AREA (mm ²)	MINIMUM WINDING WIDTH (mm)	AVERAGE LENGTH OF TURN (mm)	TYPE NUMBER
1	177	25.7	69	CPH-ETD39-1S-16P ⁽¹⁾

NOYAU ETD 44

CORE SETS

Effective core parameters

SYMBOL	PARAMETER	VALUE	UNIT
$\Sigma(l/A)$	core factor (C1)	0.589	mm ⁻¹
V_e	effective volume	17800	mm ³
l_e	effective length	103	mm
A_e	effective area	173	mm ²
A_{min}	minimum area	172	mm ²
m	mass of core half	≈ 47	g



Core halves

Clamping force for A_L measurements, 40 ± 20 N. Gapped cores are available on request.

GRADE	A_L (nH)	μ_e	AIR GAP (μm)	TYPE NUMBER
3C90	3800 ±25%	≈ 1800	≈ 0	ETD44/22/15-3C90
3C94	3800 ±25%	≈ 1800	≈ 0	ETD44/22/15-3C94
3F3	3500 ±25%	≈ 1660	≈ 0	ETD44/22/15-3F3

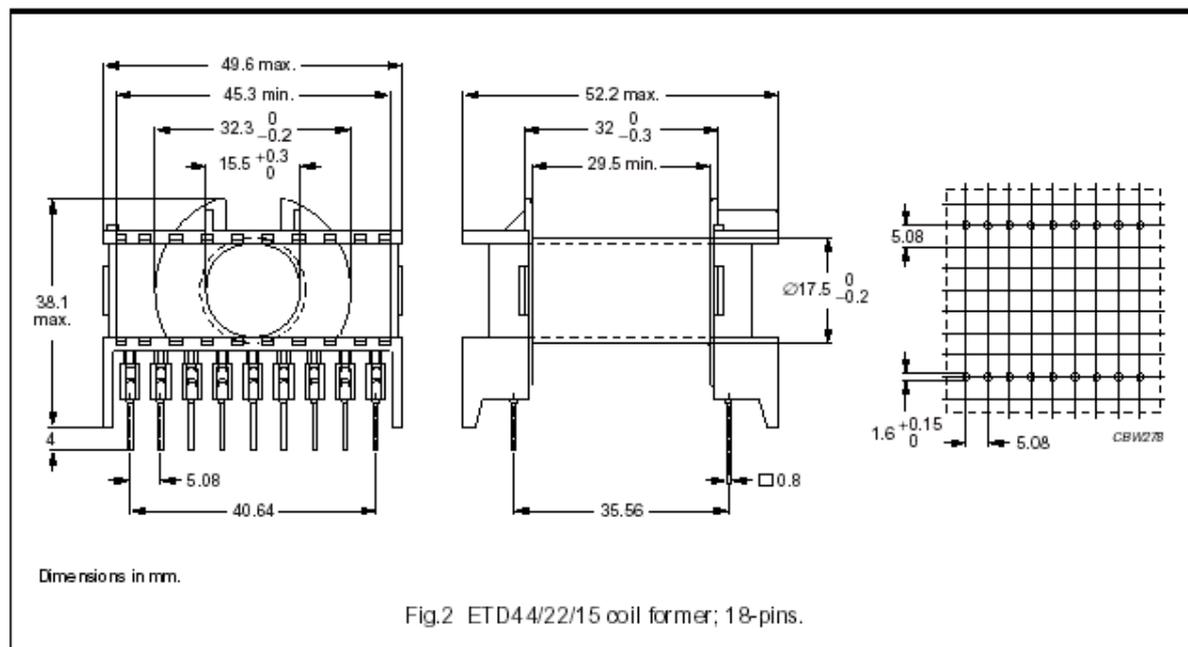
Properties of core sets under power conditions

GRADE	B (mT) at	CORE LOSS (W) at			
	H = 250 A/m; f = 25 kHz; T = 100 °C	f = 25 kHz; B = 200 mT; T = 100 °C	f = 100 kHz; B = 100 mT; T = 100 °C	f = 100 kHz; B = 200 mT; T = 100 °C	f = 400 kHz; B = 50 mT; T = 100 °C
3C90	≥330	≤2.2	≤2.3	–	–
3C94	≥330	–	≤1.7	≤9.4	–
3F3	≥320	–	≤2.2	–	≤3.9

COIL FORMERS

General data 18-pins ETD44/22/15 coil former

PARAMETER	SPECIFICATION
Coil former material	polybutylene terephthalate (PBT), glass-reinforced, flame retardant in accordance with "UL 94V-0"; UL file number E45329(R)
Pin material	copper-tin alloy (CuSn), tin-lead alloy (SnPb) plated, transition to lead-free (Sn) ongoing.
Maximum operating temperature	155 °C, "IEC 60085", class F
Resistance to soldering heat	"IEC 60068-2-20", Part 2, Test Tb, method 1B, 350 °C, 3,5 s
Solderability	"IEC 60068-2-20", Part 2, Test Ta, method 1



Winding data for 18-pins ETD44/22/15 coil former

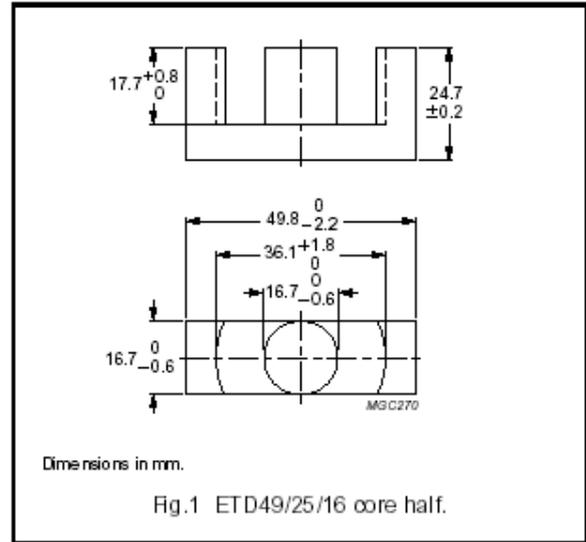
NUMBER OF SECTIONS	WINDING AREA (mm ²)	MINIMUM WINDING WIDTH (mm)	AVERAGE LENGTH OF TURN (mm)	TYPE NUMBER
1	214	29.5	77	CPH-ETD44-1S-18P ⁽¹⁾

NOYAU ETD 49

CORE SETS

Effective core parameters

SYMBOL	PARAMETER	VALUE	UNIT
$\Sigma(l/A)$	core factor (C1)	0.534	mm ⁻¹
V_e	effective volume	24000	mm ³
l_e	effective length	114	mm
A_e	effective area	211	mm ²
A_{min}	minimum area	209	mm ²
m	mass of core half	≈ 62	g



Core halves

Clamping force for A_L measurements, 50 ± 20 N. Gapped cores are available on request.

GRADE	A_L (nH)	μ_e	AIR GAP (μm)	TYPE NUMBER
3C90	$4200 \pm 25\%$	≈ 1810	≈ 0	ETD49/25/16-3C90
3C94	$4200 \pm 25\%$	≈ 1810	≈ 0	ETD49/25/16-3C94
3F3	$3900 \pm 25\%$	≈ 1680	≈ 0	ETD49/25/16-3F3

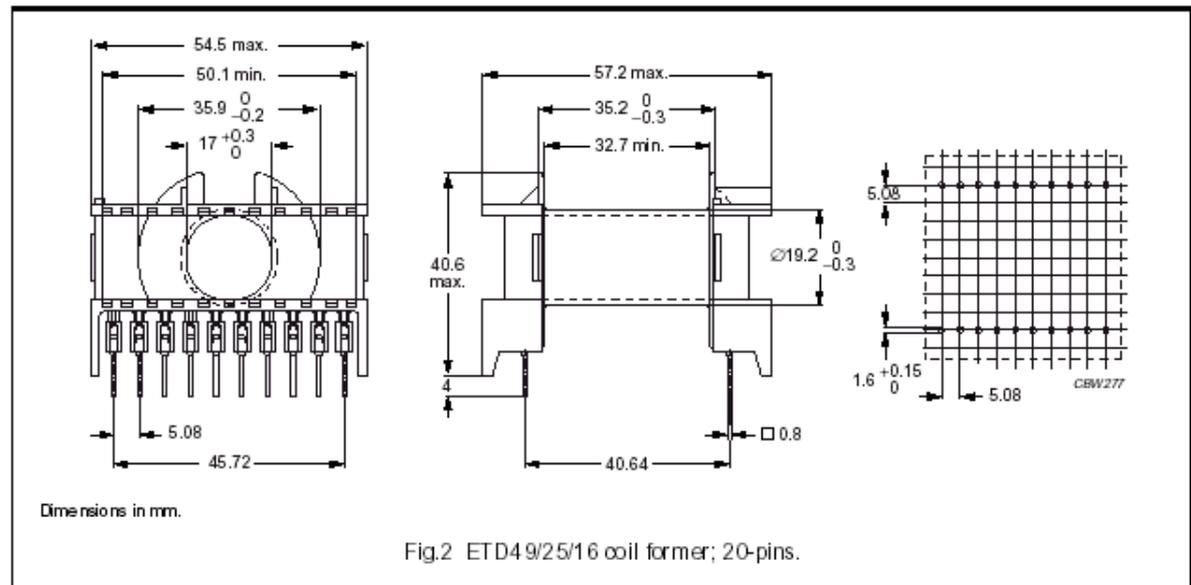
Properties of core sets under power conditions

GRADE	B (mT) at	CORE LOSS (W) at			
	H = 250 A/m; f = 25 kHz; T = 100 °C	f = 25 kHz; Ḃ = 200 mT; T = 100 °C	f = 100 kHz; Ḃ = 100 mT; T = 100 °C	f = 100 kHz; Ḃ = 200 mT; T = 100 °C	f = 400 kHz; B = 50 mT; T = 100 °C
3C90	≥ 330	≤ 2.9	≤ 3.1	–	–
3C94	≥ 330	–	≤ 2.3	≤ 12.4	–
3F3	≥ 320	–	≤ 3.0	–	≤ 5.4

COIL FORMERS

General data 20-pins ETD49/25/16 coil former

PARAMETER	SPECIFICATION
Coil former material	polybutyleneterephthalate (PBT), glass-reinforced, flame retardant in accordance with "UL 94V-0"; UL file number E45329(R)
Pin material	copper-tin alloy (CuSn), tin-lead alloy (SnPb) plated, transition to lead-free (Sn) ongoing.
Maximum operating temperature	155 °C, "IEC 60085", class F
Resistance to soldering heat	"IEC 60068-2-20", Part 2, Test Tb, method 1B, 350 °C, 3.5 s
Solderability	"IEC 60068-2-20", Part 2, Test Ta, method 1



Winding data for 20-pins ETD49/25/16 coil former

NUMBER OF SECTIONS	WINDING AREA (mm ²)	MINIMUM WINDING WIDTH (mm)	AVERAGE LENGTH OF TURN (mm)	TYPE NUMBER
1	273	32.7	85	CPH-ETD49-1S-20P ⁽¹⁾

SELECTING THE CORRECT CORE TYPE

The choice of a core type for a specific design depends on the design considerations and also on the personal preference of the designer. Table 1 gives an overview of core types as a function of power throughput and this may be useful to the designer for an initial selection.

Each of the core types has been developed for a specific application, therefore they all have advantages and drawbacks depending on, for example, converter type and winding technique.

Table 1 Power throughput for different core types at 100kHz switching frequency

POWER RANGE (W)	CORE TYPE
< 5	RM4; P11/7; T14; EF13; U10
5 to 10	RM5; P14/8
10 to 20	RM6; E20; P18/11; T23; U15; EFD15
20 to 50	RM8; P22/13; U20; RM10; ETD29; E25; T26/10; EFD20
50 to 100	ETD29; ETD34; EC35; EC41; RM12; P30/19; T26/20; EFD25
100 to 200	ETD34; ETD39; ETD44; EC41; EC52; RM14; P36/22; E30; T58; U25; U30; E42; EFD30
200 to 500	ETD44; ETD49; E55; EC52; E42; P42/29; U67
> 500	E65; EC70; U93; U100; P66/56; PM87; PM114; T140

Choice of ferrite for power transformers and inductors

A complete range of power ferrites is available for any application.

3C30

Low frequency (< 200 kHz) material with improved saturation level. Suitable for flyback converters e.g. Line Output Transformers.

3C34

Medium frequency (< 300 kHz) material with improved saturation level. Suitable for flyback converters e.g. Line Output Transformers.

3C81

Low frequency (< 100 kHz) material with loss minimum around 60 °C.

3C90

Low frequency (< 200 kHz) material for industrial use.

3C91

Medium frequency (< 300 kHz) material with loss minimum around 60 °C.

3C92

Low frequency (< 200 kHz) material with a very high saturation level. Specially recommended for inductors and output chokes.

3C93

Medium frequency (< 300 kHz) material with loss minimum around 140 °C.

3C94

Medium frequency material (< 300 kHz). Low losses, especially at high flux densities.

3C96

Medium frequency (< 400 kHz) material. Very low losses, especially at high flux densities.

3F3

High frequency material (up to 700 kHz).

3F35

High frequency material (up to 1 MHz). Very low losses, around 500 kHz.

3F4

High frequency material (up to 2 MHz). Specially recommended for resonant supplies.

3F45

High frequency material (up to 2 MHz). Specially recommended for resonant supplies.

3F5

High frequency material (up to 4 MHz). Specially recommended for resonant supplies.

4F1

High frequency material (up to 10 MHz). Specially recommended for resonant supplies.

3C90 SPECIFICATIONS

A low frequency power material for use in power and general purpose transformers at frequencies up to 0.2 MHz.

	CONDITIONS	VALUE	UNIT
μ_i	25 °C; ≤ 10 kHz; 0.25 mT	$2300 \pm 20\%$	
μ_a	100 °C; 25 kHz; 200 mT	$5500 \pm 25\%$	
B	25 °C; 10 kHz; 1200 A/m	≈ 470	mT
	100 °C; 10 kHz; 1200 A/m	≈ 380	mT
P_V	100 °C; 25 kHz; 200 mT	≤ 80	kW/m ³
	100 °C; 100 kHz; 100 mT	≤ 80	
	100 °C; 100 kHz; 200 mT	≈ 450	
ρ	DC, 25 °C	≈ 5	Ωm
T_c		≥ 220	°C
density		≈ 4800	kg/m ³

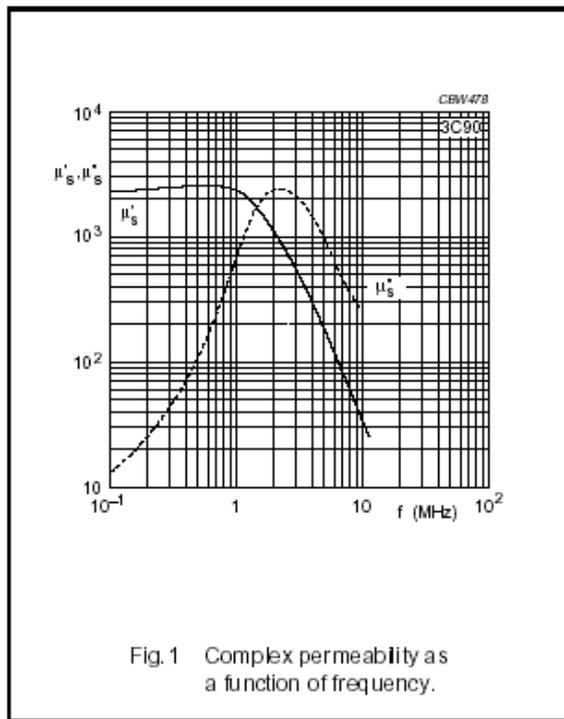


Fig. 1 Complex permeability as a function of frequency.

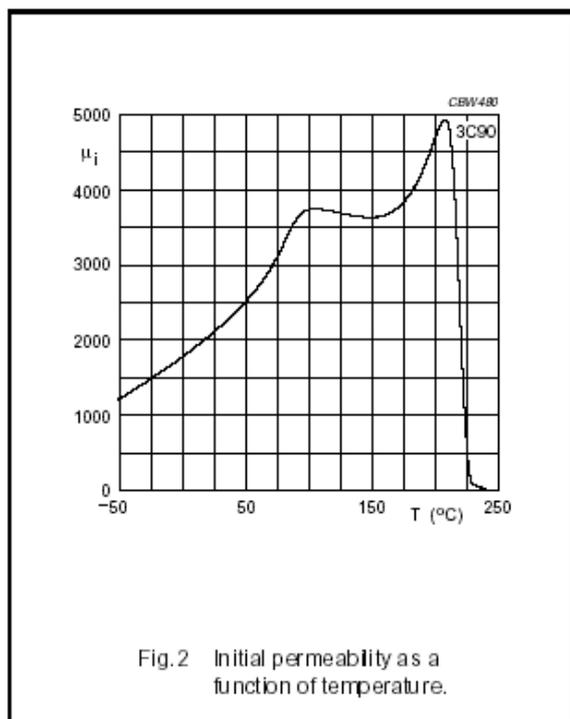


Fig. 2 Initial permeability as a function of temperature.

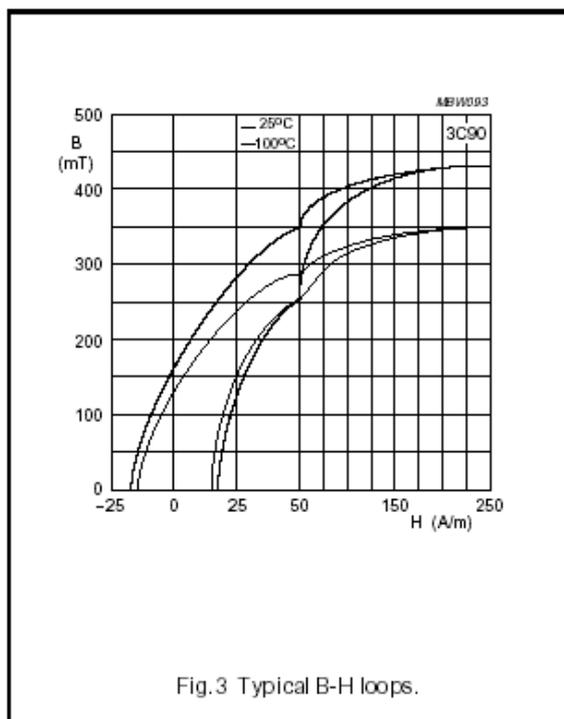
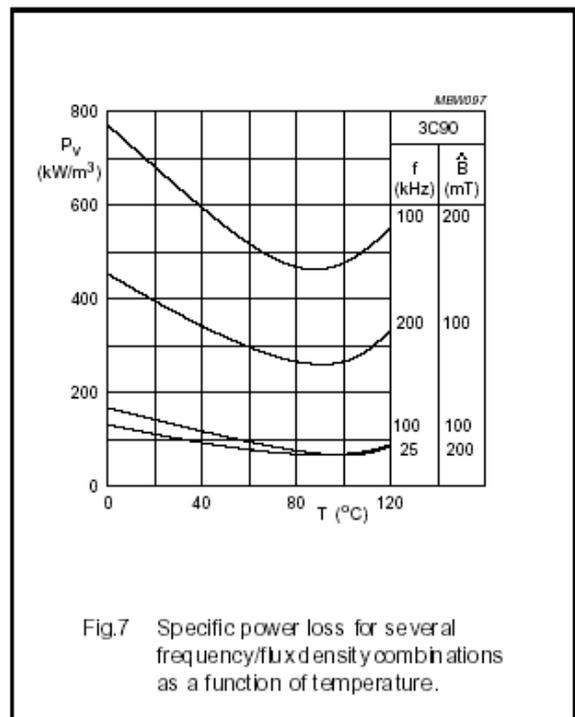
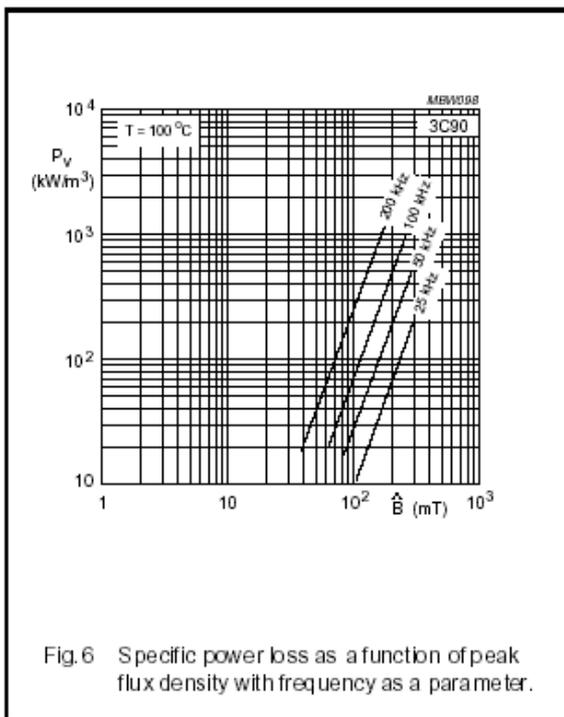
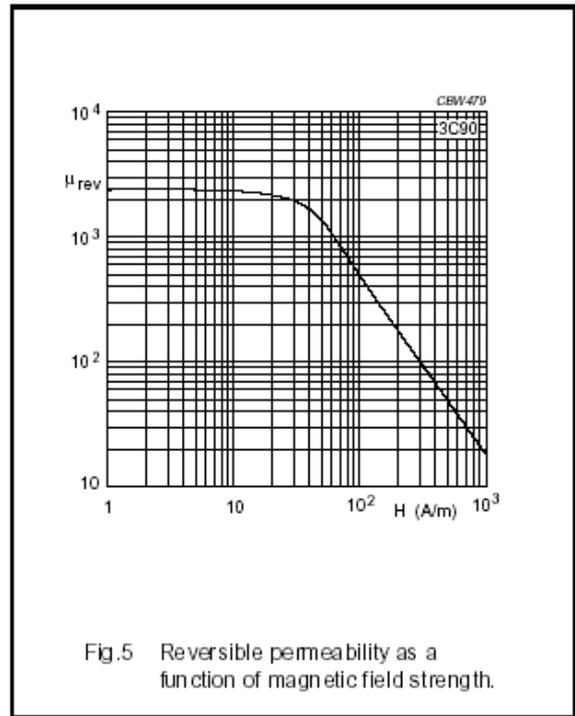
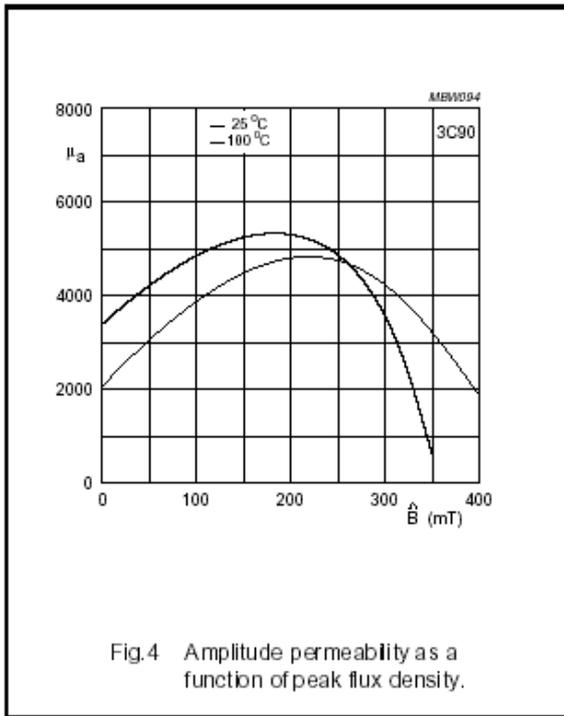


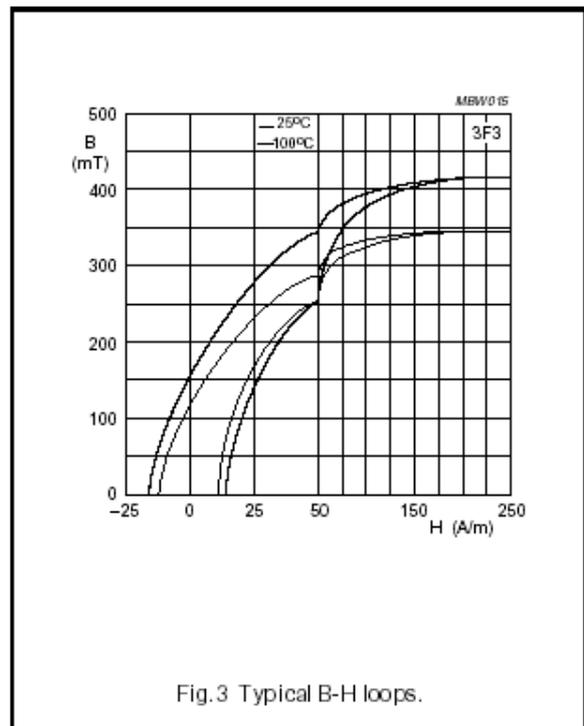
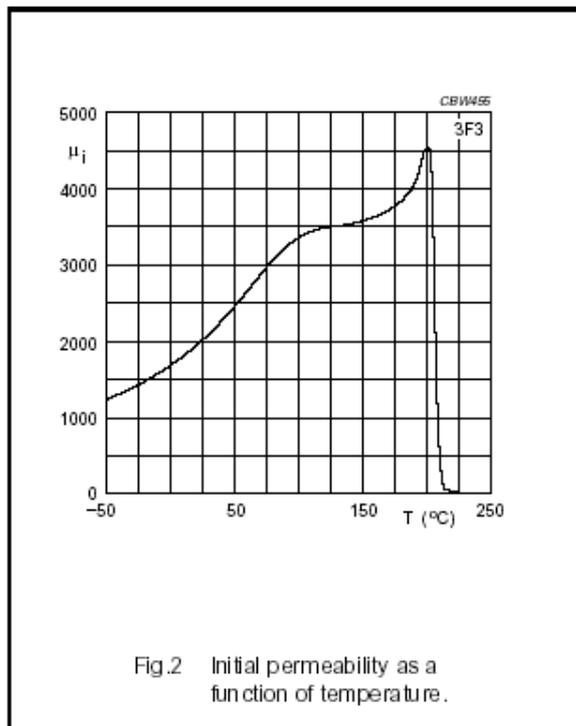
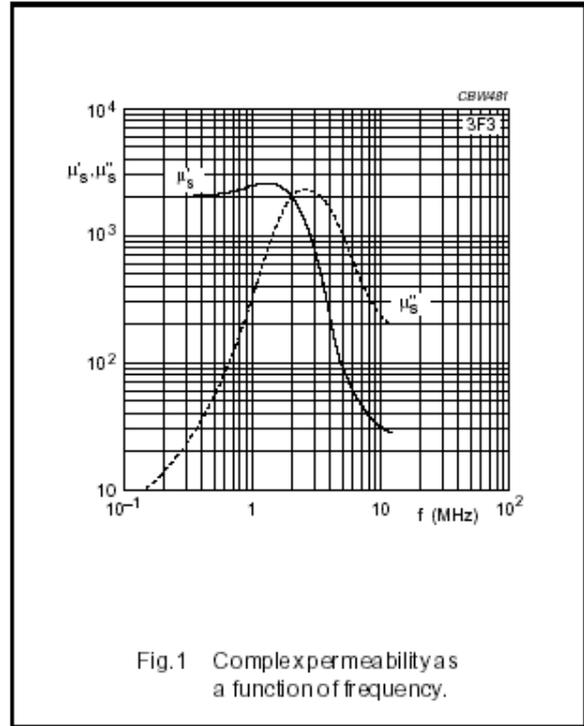
Fig. 3 Typical B-H loops.



3F3 SPECIFICATIONS

A medium frequency power material for use in power and general purpose transformers at frequencies of 0.2 - 0.5 MHz.

SYMBOL	CONDITIONS	VALUE	UNIT
μ_i	25 °C; ≤ 10 kHz; 0.25 mT	$2000 \pm 20\%$	
μ_a	100 °C; 25 kHz; 200 mT	≈ 4000	
B	25 °C; 10 kHz; 1200 A/m 100 °C; 10 kHz; 1200 A/m	≈ 440 ≈ 370	mT
P_v	100 °C; 100 kHz; 100 mT 100 °C; 400 kHz; 50 mT	≤ 80 ≤ 150	kW/m ³
ρ	DC; 25 °C	≈ 2	Ωm
T_c		≥ 200	°C
density		≈ 4750	kg/m ³



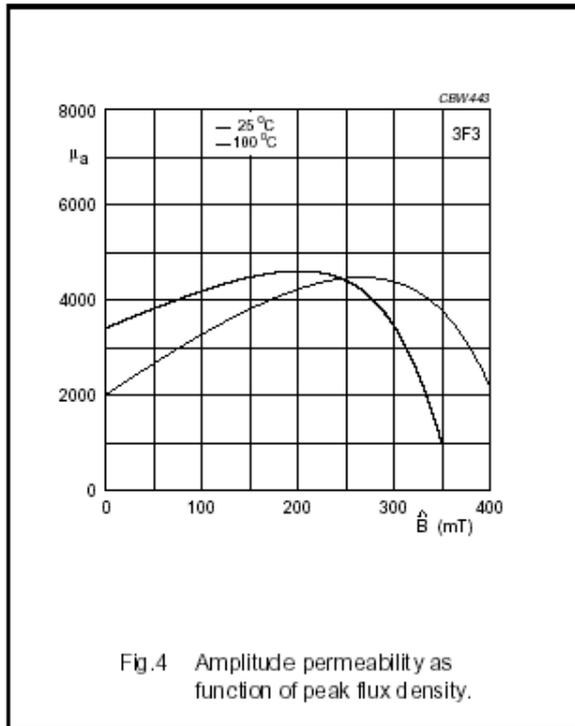


Fig.4 Amplitude permeability as function of peak flux density.

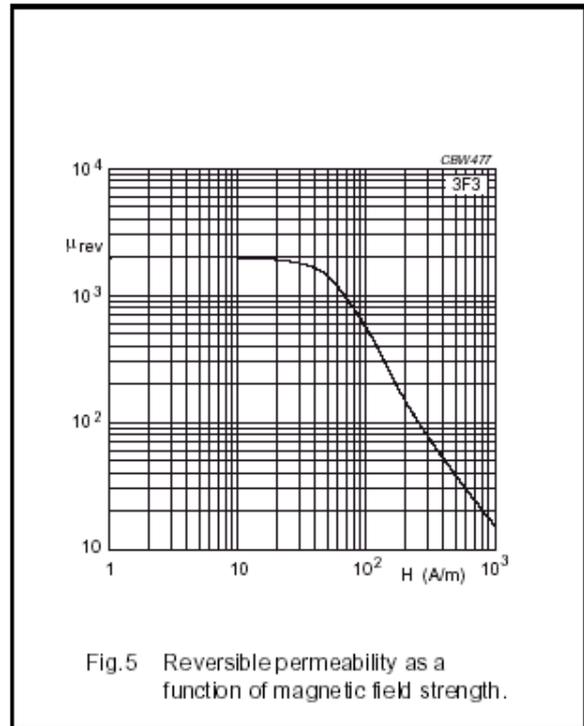


Fig.5 Reversible permeability as a function of magnetic field strength.

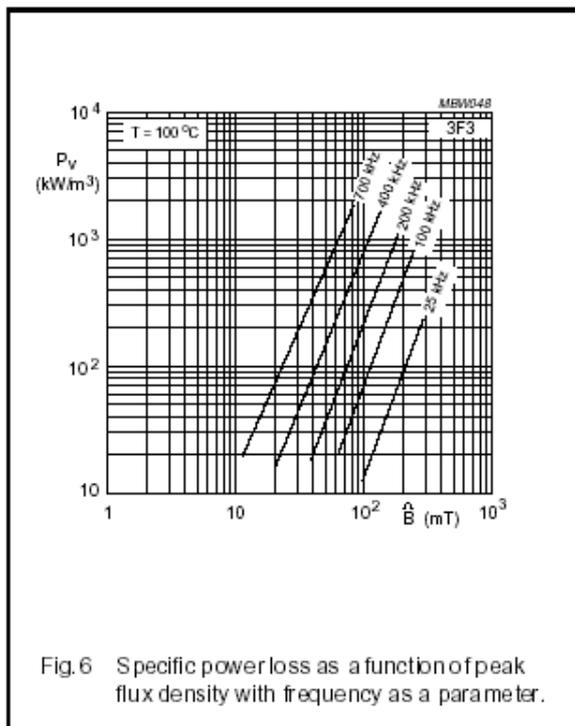


Fig.6 Specific power loss as a function of peak flux density with frequency as a parameter.

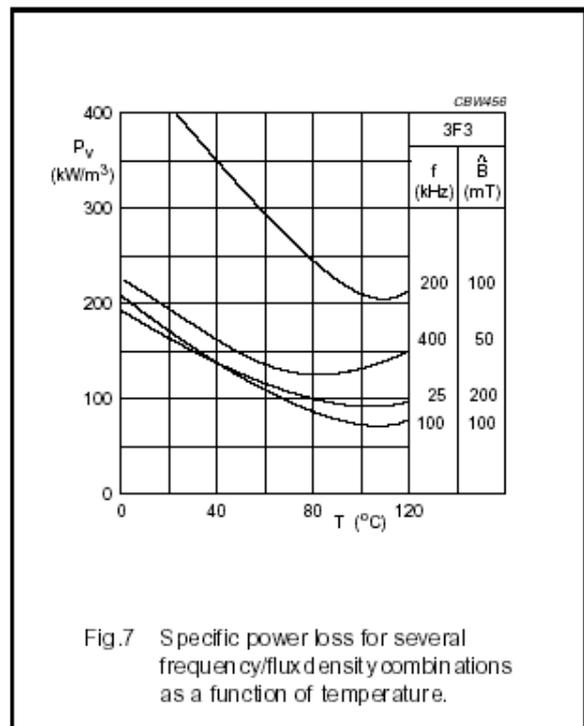


Fig.7 Specific power loss for several frequency/flux density combinations as a function of temperature.

Annexe 5. Rappel pertes magnétiques

A partir d'un schéma $R_p L_p$ parallèle :

$$\tan(\delta) = \frac{L_p \omega}{R_p} = L_p \omega G = \frac{\mu''}{\mu'}$$

avec $L_p = n^2 \mu_0 \mu_r \frac{A_e}{l_e}$ on a :

$$\tan(\delta) = n^2 \mu_0 \mu_r \frac{A_e}{l_e} G \omega$$

La puissance perdue par unité de volume P_v est donnée par :

$$P_v = \frac{V^2}{R_p A_e l_e} = \frac{V^2}{A_e l_e} G$$

d'où

$$G = \frac{P_v A_e l_e}{V^2}$$

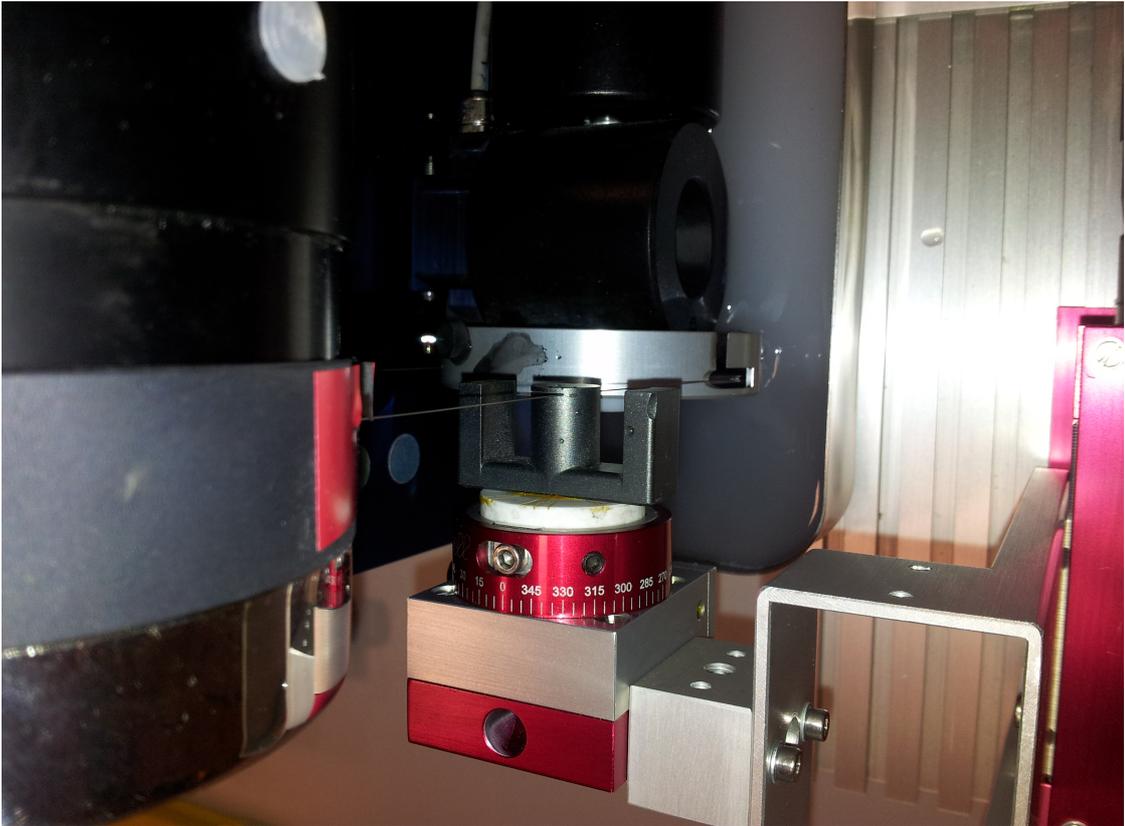
avec $\hat{B} = \frac{\hat{V}}{n A_e \omega}$ (Lentz-Faraday) on a :

$$V = \frac{\hat{B} n A_e 2\pi f}{\sqrt{2}}$$

d'où

$$\tan(\delta) = \frac{\mu_a \mu_r P_v}{\hat{B}^2 \pi f}$$

Annexe 6. Découpe d'un entrefer



*Figure 5. Découpe d'un entrefer à l'aide d'une scie à fil (diamanté)
Equipement de prototypage LAPLACE - 3DPHI*