



# Caractérisation de microélectroaimants

Guilhem Almuneau

## ► To cite this version:

Guilhem Almuneau. Caractérisation de microélectroaimants. Micro et nanotechnologies/Microélectronique. 1993. hal-03095437

**HAL Id: hal-03095437**

**<https://laas.hal.science/hal-03095437>**

Submitted on 4 Jan 2021

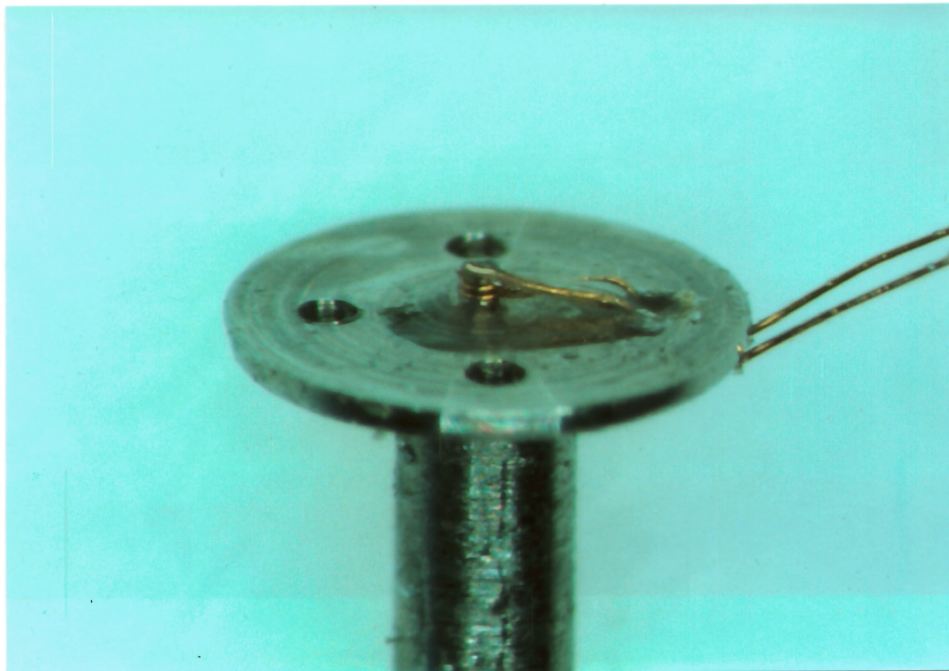
**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Rapport de stage

**CARACTERISATION  
DE MICROELECTROAIMANTS**

*par G. Almuneau  
juin à sept. 1993*



## Sommaire

|                                                                  | Page |
|------------------------------------------------------------------|------|
| Présentation du stage                                            | 3    |
| Présentation du CSEM                                             | 4    |
| 1. Introduction                                                  | 5    |
| 2. Théorie                                                       | 6    |
| 2.1 - Théorème d'Ampère                                          | 6    |
| 2.2 - Flux magnétique                                            | 7    |
| 2.3 - Réductance d'un circuit magnétique et analogie d'Hopkinson | 8    |
| 3. Simulation du système à l'aide du logiciel ANSYS              | 13   |
| 3.1 - Théorie                                                    | 13   |
| 3.2 - Description du système simulé                              | 13   |
| 3.3 - Résultats et analyse                                       | 14   |
| 4. Réalisation physique                                          | 15   |
| 4.1 - Géométrie du capteur                                       | 15   |
| 4.2 - Propriétés du matériau                                     | 16   |
| 5. Système de mesure                                             | 18   |
| 5.1 - Schéma bloc de l'ensemble                                  | 18   |
| 5.2 - Appareils utilisés                                         | 18   |
| 5.3 - Signaux ( génération, forme, fréquence )                   | 19   |
| 5.4 - Mesure de la tension induite                               | 20   |
| 6. Analyse des résultats                                         | 21   |
| 6.1 - Problèmes de génération du signal d'entrée                 | 21   |
| 6.2 - Influences du circuit testé                                | 21   |
| 7. Conclusions et extensions de la caractérisation               | 23   |
| Références                                                       | 24   |

*Je remercie les nombreuses personnes qui m'ont aidé dans mes travaux, et qui par leur convivialité et leur disponibilité ont contribué à rendre mon séjour à Neuchâtel plus qu'agréable.*

*Je tiens à exprimer toute ma reconnaissance à Messieurs Raymond Vuilleminier et Jean-Marc Moret qui m'ont permis de mener à bien ce projet.*

*Ce stage m'a apporté considérablement, autant au niveau des connaissances que dans les relations Humaines.*

*A tous un grand MERCI.*



## Présentation du stage

- Lieu :* Centre Suisse d'Electronique et de Microtechnique  
Secteur Process Architecture  
Jacquet-Droz 7  
CH-2007 Neuchâtel
- Responsables :* J.M. Moret  
R. Vuillemier
- Date :* Du 5 juin au 17 septembre 1993
- Sujet :* Caractérisation de microélectroaimants
- But du stage :* Elaboration d'une méthode de test pour un circuit magnétique
- Travaux :*
- Etudes préliminaires
    - modélisation théorique des phénomènes physiques
    - simulations magnétiques
    - conception d'une sonde
  - Mise en place
    - appareillage électronique
    - construction et mise en place de la sonde
  - Mesures et interprétations

## Présentation du **CSEM**

Dans ses champs d'activités le Centre Suisse d'Electronique et de Microtechnique joue un rôle important d'interface dans le transfert du savoir-faire entre la recherche de base et l'industrie.

Le CSEM est une entreprise privée soutenue principalement par des sociétés et organisations Suisses. Les programmes de recherches avancées sont parrainés par le Gouvernement Fédéral.

L'effectif est d'environ 270 personnes, dont la moitié sont des scientifiques et ingénieurs, à noter la multitude de nationalités représentées au CSEM.

Les principaux domaines d'activités sont les suivants :

- Recherche en circuits et systèmes intégrés
- Technologie des microstructures
- Technologie des circuits intégrés
- Développement d'ASICs en technologie CMOS
- Optoélectronique et systèmes optiques
- Capteurs, actionneurs et microstructures
- Matériaux et micromécanique

Ces activités techniques sont réparties en unités :

- Le centre C : Conception de circuits et systèmes
- Le centre P : Projets spéciaux
- Le centre T : Technologies pour la microstructuration

D'autre part, le CSEM offre des services tels que :

- La production de petites séries spécifiques aux clients
- Des solutions pour des intégrations en diverses technologies CMOS
- Des masques photolithographiques standards et spécifiques par le "maskshop" LITOMASK
- Des tests d'ICs avec une spécialité pour les ASICs combinés analogiques/digitaux
- Des dépôts de couches minces, durcissements et lubrifications de pièces industrielles.

## 1. Introduction

Le CSEM a récemment développé un circuit magnétique formé en partie d'une matrice de microélectroaimants, utilisé pour les têtes magnétographiques d'imprimantes ( cf. fig. 1-1 ). Le processus de fabrication ne permet à aucune étape de tester le fonctionnement de ces microélectroaimants. Les tests ne peuvent être réalisés qu'après le montage des circuits, d'où un coût superflu d'assemblage d'éléments défectueux.

Ce stage m'a permis d'élaborer une méthode de tests magnétiques pour ces circuits ; cette étude a aussi une perspective plus large, car d'autres circuits magnétiques sont en cours d'évaluation.

Les tests consistent à observer si chaque microélectroaimant produit le champ magnétique attendu.

La solution adoptée utilise un transformateur formé des microélectroaimants du circuit et d'une sonde ferromagnétique. La sonde baigne dans le champ magnétique alternatif généré par un microélectroaimant, ce qui induit une tension aux bornes d'une bobine de détection.

Les récentes mesures sur une nouvelle gamme de circuits se sont révélées efficaces. Les tests sur ce circuit ont permis d'identifier un problème de fuites et d'y remédier.

Cette étude a débuté par une modélisation, des simulations ensuite sont venues préciser la forme et les dimensions de la sonde magnétique.

La pièce a pu alors être réalisée, puis montée sur un manipulateur. L'appareillage électronique autour de la sonde complète ce système de mesure. Enfin l'optimisation des signaux d'alimentations des microélectroaimants a débouché sur l'obtention d'une tension induite mesurable, qui a pu être testée dans des cas réalistes.

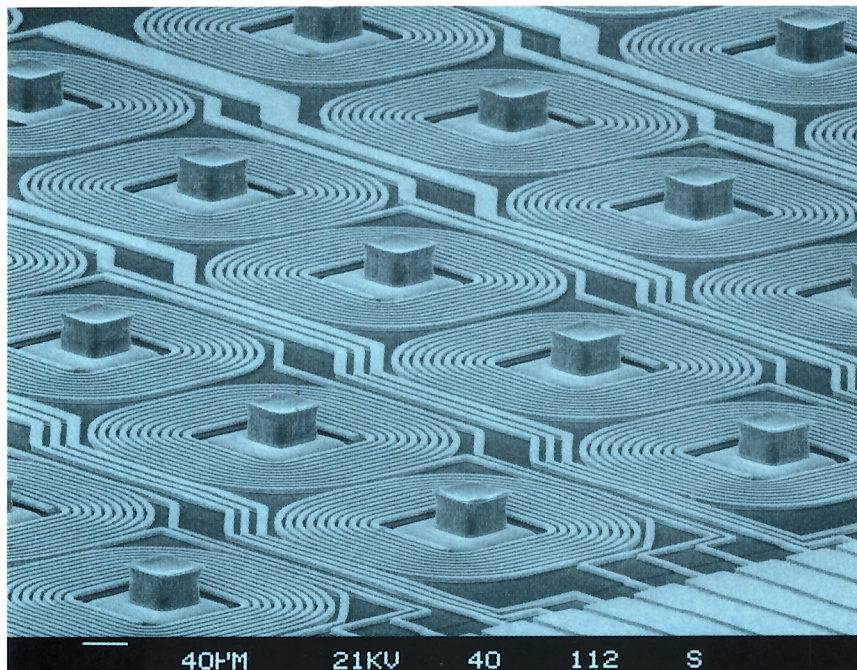


Figure 1-1 : Détail de la matrice de microélectroaimants



## 2. Théorie [2]

Le principe de mesure est basé sur le fonctionnement d'un transformateur. Ce transformateur contient un circuit magnétique qui canalise le champ magnétique, on met en commun le pôle magnétique d'un microélectroaimant et celui d'une sonde pour réaliser un circuit magnétique ( cf. figure 2-1 ). Des enroulements sur chaque élément génèrent un champ magnétique ou permettent de le mesurer.

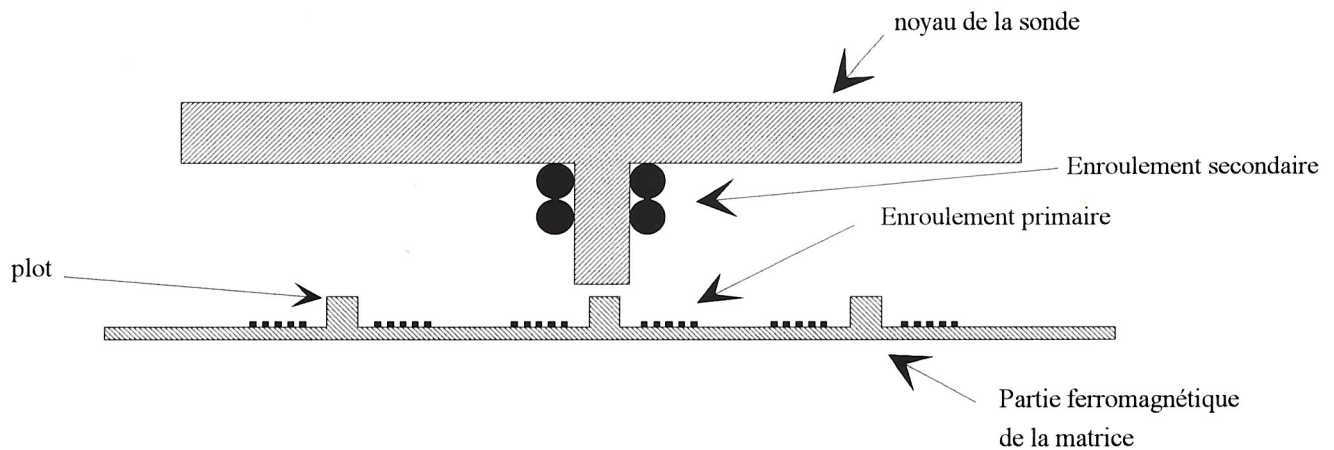


Fig.. 2-1 : Vue transversale de la sonde positionnée au-dessus de la matrice de microélectroaimants

Cette partie théorique a pour but de connaître les ordres de grandeur des quantités mises en jeu, en avançant des hypothèses réalisables en pratique.

### 2.1. Théorème d'Ampère

L'équation de Maxwell régissant la relation entre champ magnétique et densité de courant est :

$$\vec{\nabla} \times \vec{H} = \vec{j} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}$$

$\vec{H}$  ( unité : Ampère/mètre ) désigne le champ magnétique.

$\vec{j}$  représente la densité de courant de conduction et  $\frac{\partial \vec{D}}{\partial t}$  la densité de courant de déplacement (  $\text{Am}^{-2}$  ).

Le courant et les fréquences qui interviennent dans notre cas permettent d'avancer que  $j \gg \frac{\partial D}{\partial t}$ . On peut alors négliger le terme  $\frac{\partial \vec{D}}{\partial t}$ , et écrire simplement :

$$\vec{\nabla} \times \vec{H} = \vec{j}$$

Une simple intégration conduit à la forme équivalente :

$$\oint_{\Gamma} \vec{H} \cdot d\vec{l} = ni$$

$d\vec{l}$  est une partie infinitésimale du contour  $\Gamma$ .

Cette expression donne la circulation du champ  $\vec{H}$  le long du contour  $\Gamma$  fermée entourant un circuit  $C$  parcouru par un courant  $i$ ,  $n$  est le nombre de fois que cette ligne  $\Gamma$  traverse le circuit  $C$ . Dans notre cas la production d'un champ magnétique dans les microélectroaimants à partir d'un courant électrique circulant dans les spires, est le résultat physique de cette relation, on peut remarquer les poids du courant et du nombre de spires sur la valeur du champ magnétique.

## 2.2. Flux magnétique

Une quantité importante qui intervient dans cette étude est le flux magnétique à travers une surface.

Considérons une surface quelconque  $S$  qui s'appuie sur un circuit  $C$  ( figure 2-2).

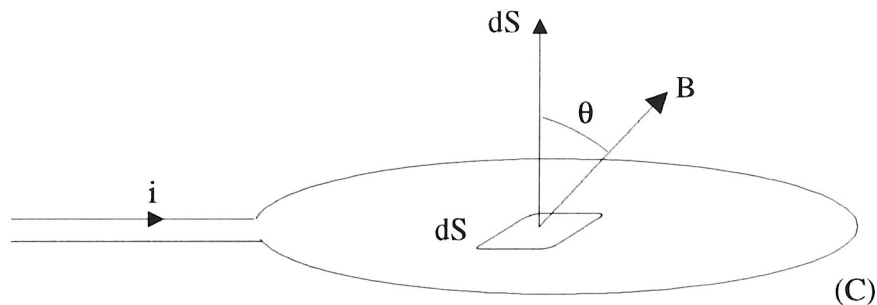


fig. 2-2 : Paramètres définissant le flux

Le flux  $\Phi$  à travers  $(C)$  est exprimé par :

$$\Phi = \iint_S \vec{B} \cdot d\vec{S} \quad (\text{ en Weber :Wb } )$$

Le flux a la propriété d'être conservatif dans tout l'espace, l'équation de Maxwell correspondant à celle-ci est :

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0$$

Dans notre système on pourra supposer que l'espace est limité à l'ensemble formé par les microélectroaimants et le capteur magnétique. On représente souvent la présence d'un champ magnétique par des lignes de flux, celles-ci sont tangentes au champ magnétique.

- Flux de fuite

$\Phi$  est défini comme le flux produit par l'enroulement et qui le traverse.

En considérant le flux d'une bobine dans un matériau ferromagnétique une partie de ce flux fuit dans l'air, seule la partie utile  $\Phi_m = \Phi - \Phi_f$  reste dans le noyau ( figure 2-3 ). On considère comme une perte le flux  $\Phi_f$  car cette partie du flux ne sera pas présente dans le circuit magnétique, en particulier d'autres spires ne pourront capter ce flux de fuite. On appelle circuit magnétique un ensemble d'éléments ferromagnétiques formant un circuit fermé et qui canalise le flux, une courte interruption est un entrefer.

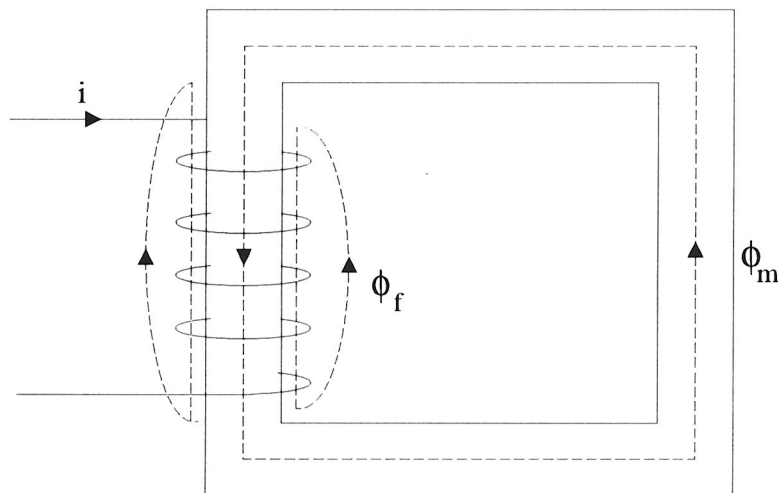


Fig.. 2-3 : Dispersion du flux dans l'air

### 2.3. Réluctance d'un circuit magnétique et analogie de Hopkinson

Le long d'un contour  $\Gamma$ , le théorème d'Ampère s'écrit  $\oint_{\Gamma} \vec{H} \cdot d\vec{l} = ni$ . En faisant intervenir l'induction  $\vec{B} = \mu \vec{H}$  et le flux  $B.S$  :

$$\oint_{\Gamma} \frac{dl}{\mu S} \Phi = ni$$

$\mu$  est la perméabilité du milieu, ce facteur de proportionnalité entre le champ magnétique  $\vec{H}$  et l'induction  $\vec{B}$  est lié aux propriétés magnétiques du milieu.  $\mu$  est le produit de la perméabilité du vide  $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ m.kg.C}^{-1}$  et de la perméabilité relative  $\mu_r$  dépendante du milieu.

Le flux conservatif dans le circuit permet d'écrire une relation simplifiée :

$$\mathcal{R}\Phi = ni$$

En posant  $\mathcal{R} = \oint_{\Gamma} \frac{dl}{\mu S}$  ( en Ampères-tours / Wb )

$\mathcal{R}$  étant la réluctance, quantité caractéristique de la géométrie du noyau et de ses aptitudes à capter un flux magnétique.

Par analogie avec les circuits électriques, on considère une réluctance comme une résistance, et on appelle le terme "ni" la force magnétomotrice.

Les lois appliquées aux circuits électriques peuvent alors être utilisées pour les circuits magnétiques.

#### 2.3.1. Calcul des réluctances [2]

L'ensemble constitué par le circuit magnétique présentant la plage de microélectroaimants et le capteur magnétique, peut être assimilé à un transformateur. Le primaire est le microélectroaimant alimenté, le secondaire étant constitué par la sonde ( cf. figure 2-1 ).

On divise le circuit magnétique total en plusieurs éléments, afin de calculer leur réluctances respectives.



Un schéma du circuit équivalent montre cette subdivision :

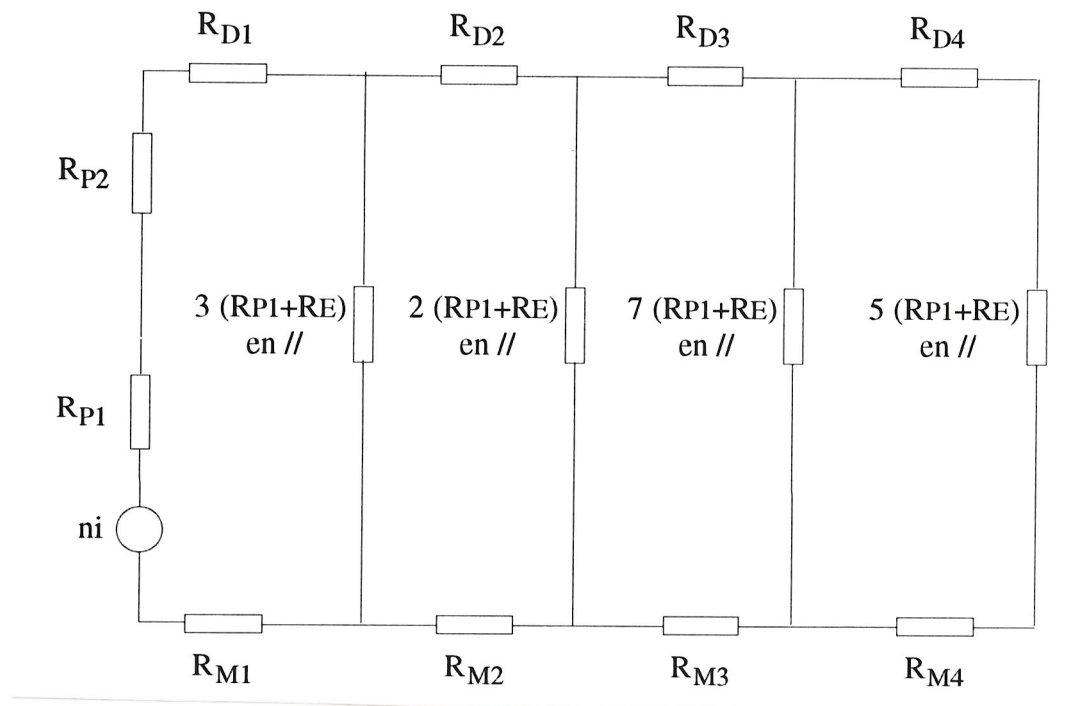


Fig.. 2-4 : Schéma électrique équivalent  
 au circuit magnétique

- $R_{Dn}$  = Réluctances de la partie sous forme de disque du capteur
- $R_E$  = Réluctance de l'entrefer entre le disque et les différents plots de la matrice
- $R_{P1}$  = Réluctance d'un plot de la matrice
- $R_{Mn}$  = Réluctances de la membrane reliant les plots
- $R_{P2}$  = Réluctance du plot du capteur

- Réductance du disque

On suppose que les microélectroaimants sont agencés selon un quadrillage simple, avec des espacements de 300 µm :

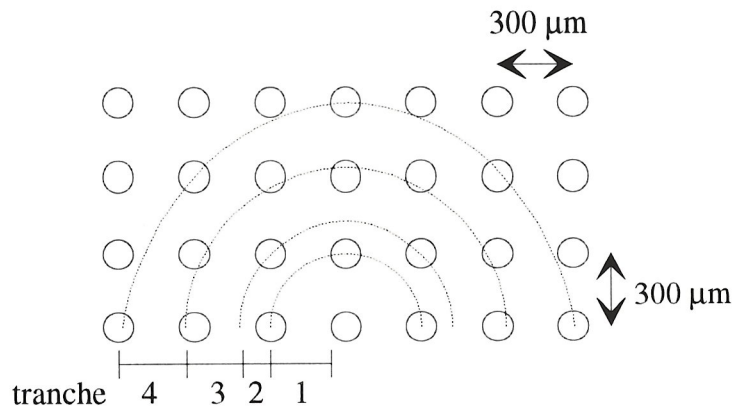


Fig.. 2-5 : Agencement et répartition par rangées des microélectroaimants

On suppose que le circuit magnétique se prolonge au dessus des plots de la matrice jusqu'à la surface inférieure du disque de la sonde. Cette approximation restreint le circuit car les entrefers sont les plus étroits entre les plots et le disque.

Les lignes en pointillés sur la figure 2-5 déterminent les zones où plusieurs plots se trouvent en face du disque.

Chaque tranche du disque entre deux de ces zones ont une certaine réductance, les réductances des différentes tranches varie selon leur surface.

La réductance d'une tranche est donné par la relation :

$$R_{Dn} = \int_{\text{tranche } n} \frac{dl}{\mu S} = \frac{1}{\mu \cdot 2\pi \cdot 150e-6} \int \frac{dl}{l} = \frac{1}{\mu \cdot 2\pi \cdot 150e-6} \ln \frac{l_n}{l_{n-1}}$$

Le calcul pour chaque tranche, avec une perméabilité relative de 5000 donne :

$$\begin{aligned} R_{D1} &= 340e3 \text{ H}^{-1} \\ R_{D2} &= 58.5e3 \text{ H}^{-1} \\ R_{D3} &= 69.3e3 \text{ H}^{-1} \\ R_{D4} &= 53.6e3 \text{ H}^{-1} \end{aligned}$$

- Réductance de l'entrefer entre disque et plots [3]

On considère que les lignes de champ ont la géométrie suivante :

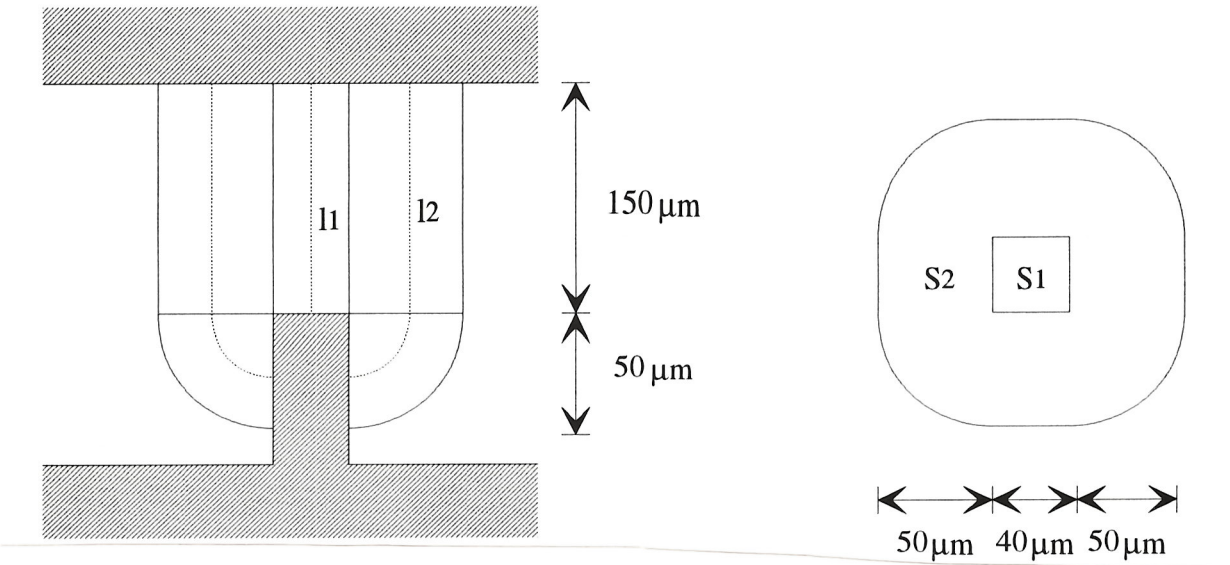


Fig.2-6 : Simplification de la forme des lignes de champ entre le disque et un plot de la matrice

$$R_E = R_1 // R_2 = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2} = \left( \frac{l_1}{S_1 \cdot \mu_0} \right) // \left( \frac{l_2}{S_2 \cdot \mu_0} \right)$$

$$R_E = 8.88e9 \text{ H}^{-1}$$

- Réductance des plots de la matrice

La perméabilité relative est approximativement  $\mu_r = 2000$  pour cette partie du circuit.

$$R_{P1} = 14.9e6 \text{ H}^{-1}$$

- Réductance de la membrane

Le calcul est analogue à celui du disque.

$$R_{M1} = 850e3 \text{ H}^{-1}$$

$$R_{M2} = 146e3 \text{ H}^{-1}$$

$$R_{M3} = 173e3 \text{ H}^{-1}$$

$$R_{M4} = 134e3 \text{ H}^{-1}$$

- Réductance du plot du capteur

$$R_{P2} = 7.12e6 \text{ H}^{-1}$$

- Réductance totale

D'après le schéma équivalent, le calcul de la réductance équivalente du circuit donne :

$$R_{\text{total}} = 3.65e9 \text{ H}^{-1}$$

### 2.3.2. Calcul du flux

Le flux total est obtenu par la relation générale :

$$R_{\text{total}} \cdot \Phi_{\text{total}} = ni$$

Le terme "ni" est le nombre d'Ampères-tours du primaire qui alimente le circuit.

$$\Phi_{\text{total}} = \frac{ni}{R_{\text{total}}}$$

Afin d'avoir des valeurs du flux assez importantes le nombre d'Ampères-tours doit être important, ceci nécessitant un courant supérieur à 100 mA. On prendra comme exemple  $i = 200 \text{ mA}$ , le nombre de tours ( $n = 10$ ) est une donnée fixée.

$$\Phi_{\text{total}} = 3.65\text{e-}9 \text{ Wb}$$

### 2.3.3. Calcul de la tension induite dans le capteur

La tension mesurée au secondaire est fonction du signal d'entrée :

$$U_i = ri + N \cdot \frac{d\Phi}{dt}$$

L'impédance élevée de l'appareillage de mesure permet de minimiser le courant  $i$ . Cette approximation permet d'écrire :

$$U_i = N \cdot \frac{d\Phi}{dt}$$

Le terme  $\frac{d\Phi}{dt}$  peut varier selon la fréquence du courant à l'entrée, ainsi la tension induite sera plus importante pour des variations brutales du courant d'entrée. Un autre facteur lié à  $U_i$  est le nombre de tours  $N$  autour du plot du capteur magnétique.

En imposant des signaux triangulaires à un microélectroaimant, on évalue, à diverses vitesses de montée et nombres de tours, la tension induite.

Les résultats des calculs sont répertoriés dans le tableau suivant :

| Tension induite<br>( en volts ) |    | Durée de la rampe |          |                   |                  |                 |          |
|---------------------------------|----|-------------------|----------|-------------------|------------------|-----------------|----------|
|                                 |    | 10 ms             | 1 ms     | 100 $\mu\text{s}$ | 10 $\mu\text{s}$ | 1 $\mu\text{s}$ | 100 ns   |
| Nombre de tours                 | 1  | 3.65e-7           | 3.65e-6  | 3.65e-5           | 3.65e-4          | 3.65e-3         | 3.65e-2  |
|                                 | 3  | 1.095e-6          | 1.095e-5 | 1.095e-4          | 1.095e-3         | 1.095e-2        | 1.095e-1 |
|                                 | 10 | 3.65e-6           | 3.65e-5  | 3.65e-4           | 3.65e-3          | 3.65e-2         | 3.65e-1  |
|                                 | 20 | 7.3e-6            | 7.3e-5   | 7.3e-4            | 7.3e-3           | 7.3e-2          | 7.3e-1   |

Pour négliger les phénomènes de bruit et limiter l'amplification, il est nécessaire de travailler à des fréquences supérieures à 100 khz.



### 3. Simulation du système a l'aide du logiciel ANSYS

Les calculs précédemment ont été fait pour une géométrie fixée, les simulations permettent de faire varier les paramètres géométriques du système ( dimension de la sonde, entrefers ). Les résultats sont qualitatifs, ils indiquent comment les lignes de flux se comportent et donc si le flux capté par la sonde est bien celui qui est généré par le microélectroaimant testé. Ceci a permis de vérifier la valeur de la géométrie préconisée, et d'estimer qualitativement les pertes en faisant varier la forme et la position du capteur. Ces simulations révèlent une limite de validité de la mesure causée par un entrefer entre sonde et microélectroaimant trop important.

#### 3.1. Théorie [4]

La formulation utilisée pour les analyses magnétiques avec ANSYS, fondée sur la théorie des éléments finis, est dérivée des équations de Maxwell appliquées aux champs magnétiques. On utilise généralement le potentiel scalaire ou vecteur pour des problèmes de champ magnétique respectivement à 2 ou 3 dimensions.

- Analyse magnétostatique

L'analyse magnétique se résout à partir du potentiel magnétique ( vecteur ou scalaire ) à chaque noeud, afin d'obtenir la densité de flux magnétique, l'intensité du champ et les forces magnétiques  $\vec{j} \times \vec{B}$  pour chaque élément raccordé à ces noeuds. Les possibilités incluent les analyses linéaires et nonlinéaires.

Les équations matricielles de base pour une analyse statique sont :

$$\begin{aligned} [K]_n \{ \Delta A \}_n &= \{ F \}_n - \{ R \}_n \\ \{ A \}_{n+1} &= \{ A \}_n + \{ \Delta A \}_n \end{aligned}$$

|                |                                         |
|----------------|-----------------------------------------|
| $[K]$          | matrice coefficient                     |
| $\{F\}$        | vecteur de charge                       |
| $\{R\}$        | vecteur de charge résiduelle            |
| $\{A\}$        | potentiel vecteur magnétique du noeud   |
| $\{\Delta A\}$ | incrément du potentiel vecteur du noeud |

Le système de n équations est résolu par une méthode itérative, l'opération se faisant en deux étapes afin d'augmenter son efficacité.

#### 3.2. Description du système simulé

Le système se compose de 4 types de matériaux différents : les parties magnétiques du capteur et des microélectroaimants ( avec des perméabilités distinctes ), les spires non-ferromagnétiques, et l'environnement d'air.

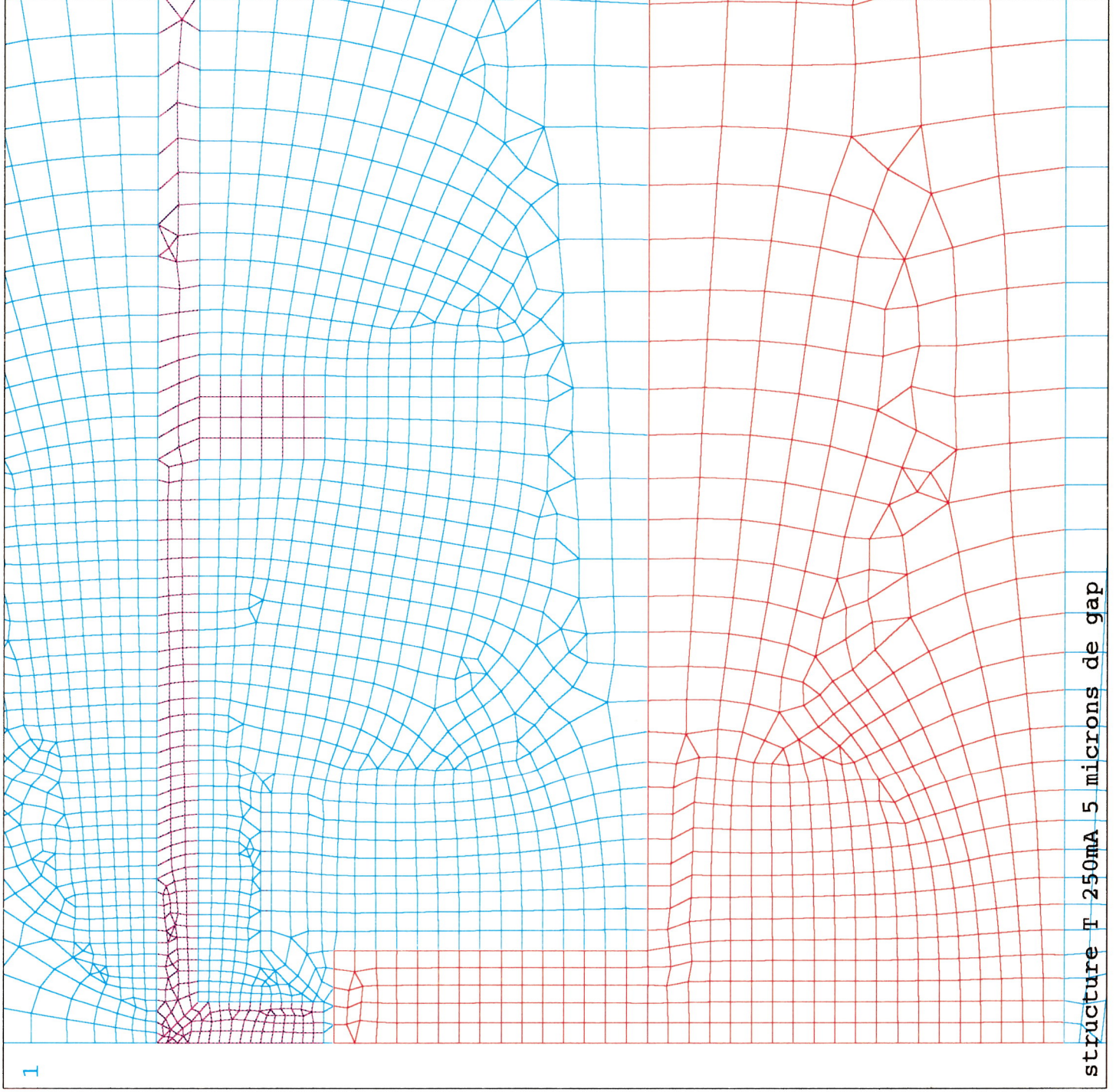
Un maillage divise ces matériaux en éléments, les parties intéressantes ayant un maillage plus fin ( cf. figure 3-1 ).

Le champ magnétique est généré par un courant électrique de 250 mA, circulant dans la bobine.

Les dimensions adoptées sont explicitées au paragraphe 4.1., l'ordre de grandeur des microélectroaimants est conservé pour le capteur ; de plus le système possède un axe de symétrie ( l'axe Z ).

ANSYS 4.4A  
AUG 25 1993  
11:04:33  
PLOT NO. 1  
PREP7 ELEMENTS  
TYPE NUM

ZV =1  
\*DIST=0.264321  
\*XF =0.242225  
\*YF =0.588766





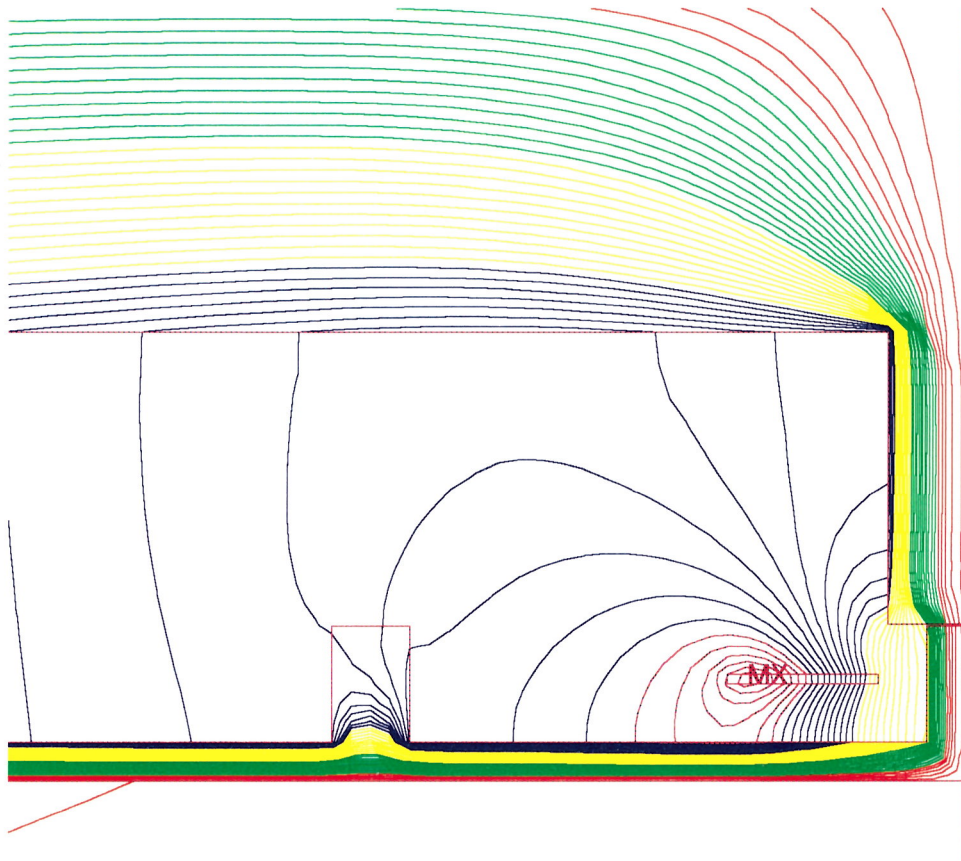
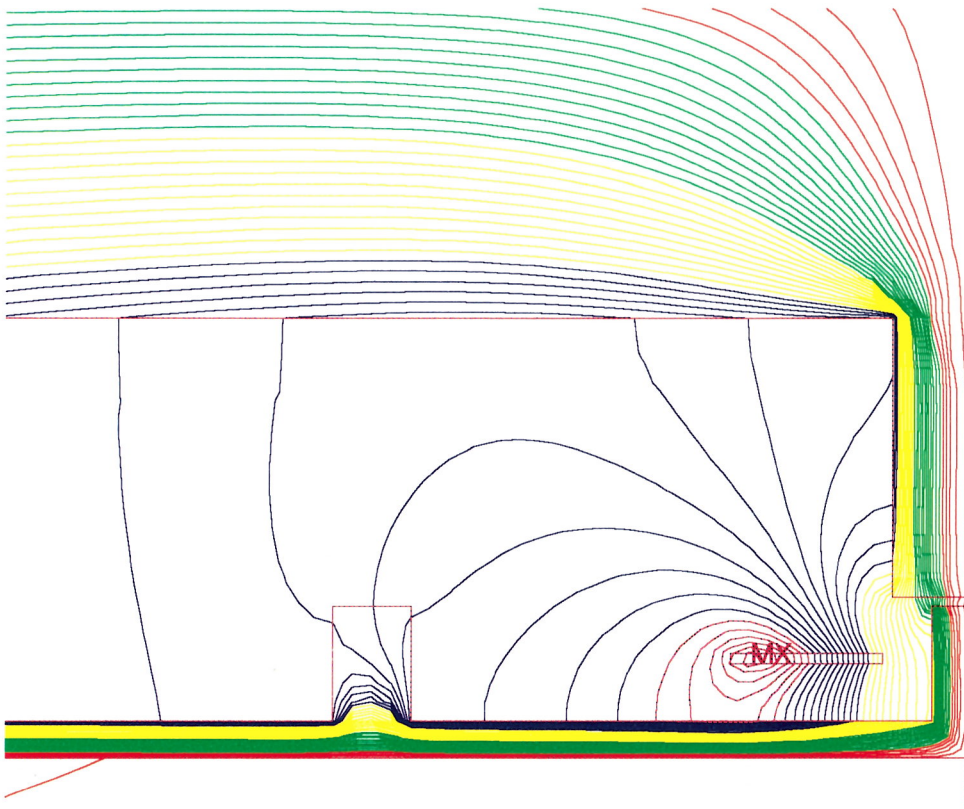


Fig. 3-2a : Lignes de flux ( Entrefer =  $1\text{ }\mu\text{m}$  )



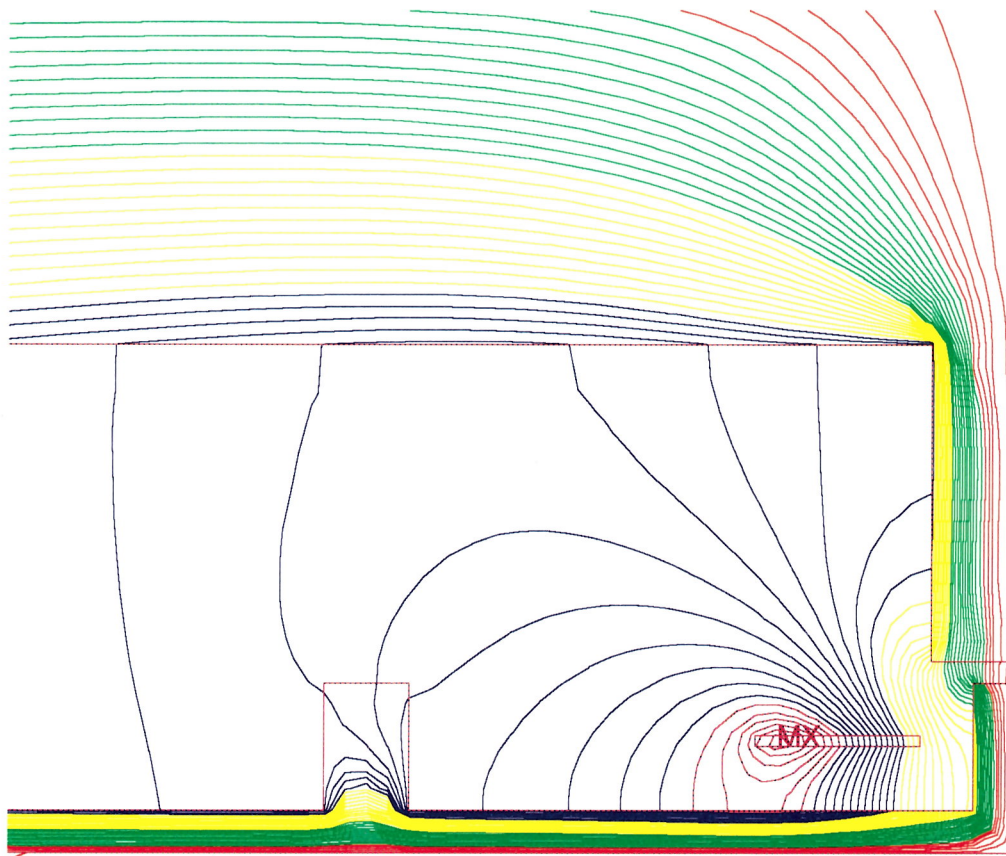
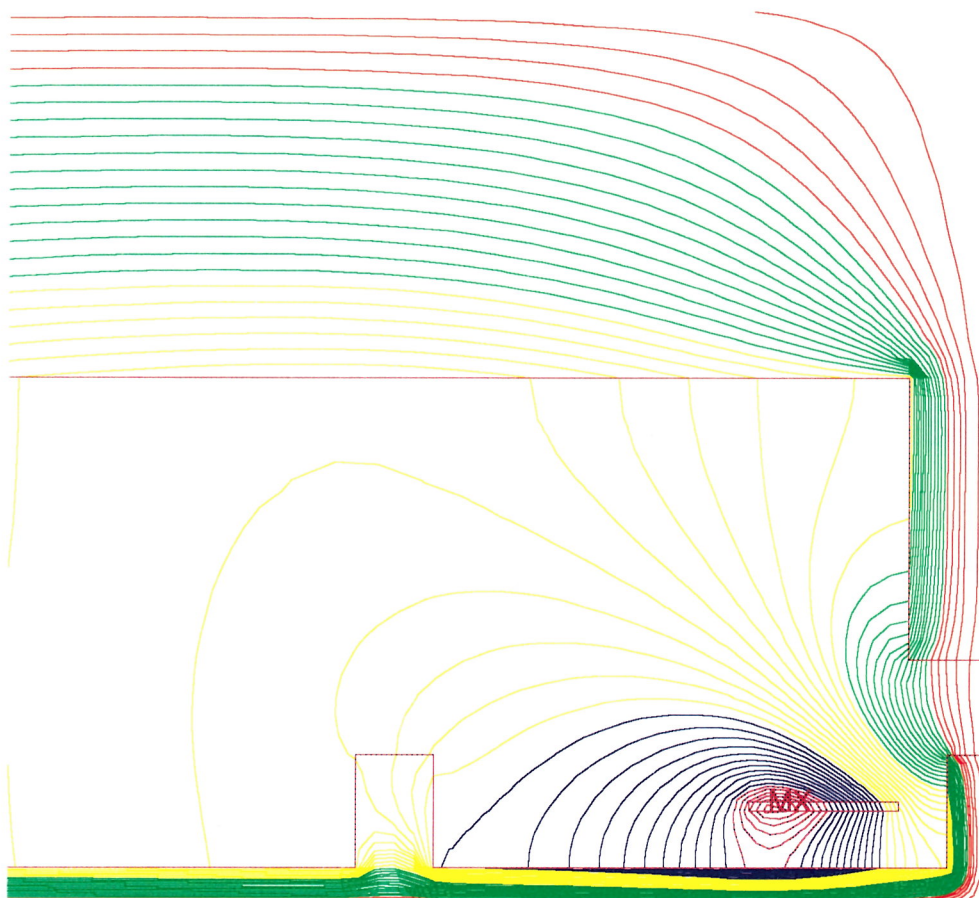


Fig. 3-2c : Entrefer = 10  $\mu\text{m}$





### 3.3. Résultats et analyse

Ces simulations permettent de visualiser l'induction sous forme de vecteurs, et les lignes de champ. La variation de l'entrefer entre les deux plots permet d'apprécier les pertes de flux, ainsi on peut juger la valeur qualitative de la mesure.

Les figures 3-2 a,b,c,d représentent les lignes de flux pour des valeurs différentes de l'entrefer. On remarque que le flux est moins bien canalisé lorsque l'entrefer augmente. En intégrant le flux dans chacun des plots et en calculant le rapport de ces quantités, on peut définir à partir de quelle épaisseur de l'entrefer la mesure devient erronée. Des simulations faites à 1, 5, 10 et 50  $\mu\text{m}$  permettent d'observer la dépendance du taux de canalisation avec l'entrefer ( figure 3-3 ).

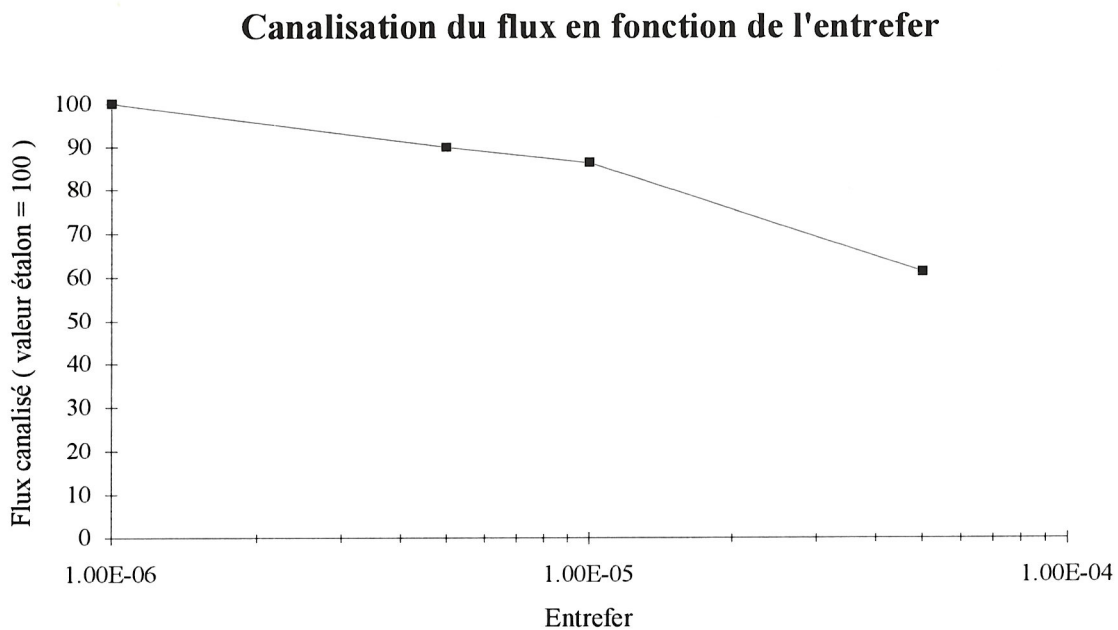


figure 3-3

## 4. Réalisation physique

Le capteur magnétique est monté sur une sonde normalement munie de pointes, qui habituellement se placent sur les plages de contact des wafers. Afin d'effectuer des mesures magnétiques sur une matrice de microélectroaimants ( cf. photos 4-1 ), le capteur sera substitué à une pointe et pourra se positionner sur un noyau de la matrice.

### 4.1. Géométrie du capteur

Le capteur magnétique est réalisé par usinage mécanique, il se compose d'un noyau en Fer-Nickel, matériau ferromagnétique, et de plusieurs enroulements de fil isolé ( cf. figure 4-2 et photo de la première page ). Le plot central ( partie 3 ), qui se positionne au-dessus d'un plot de la matrice, canalise le flux généré dans le circuit magnétique formé par les microélectroaimants et le capteur. Ce circuit est refermé par l'intermédiaire d'une plaque circulaire s'appuyant sur le plot central ( partie 2 ), sa surface permet de recouvrir les plots voisins du microélectroaimant étudié. La partie 1 est un support, elle permettra de manoeuvrer la pièce et de la fixer à un manipulateur.

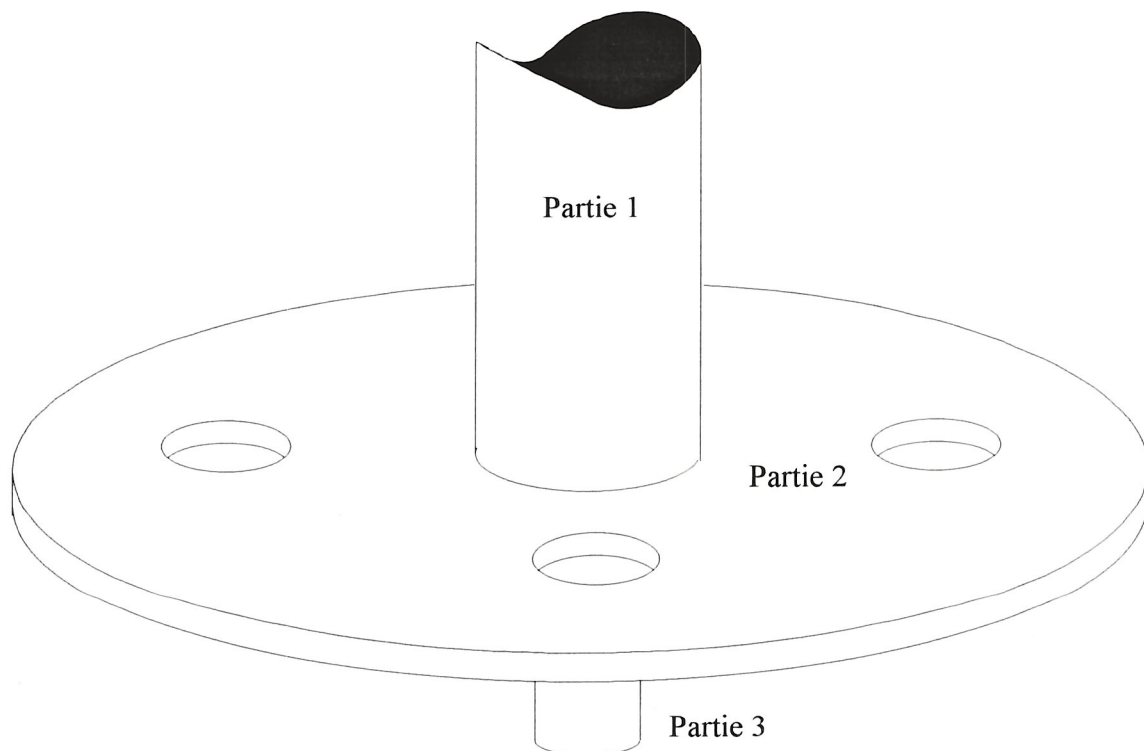


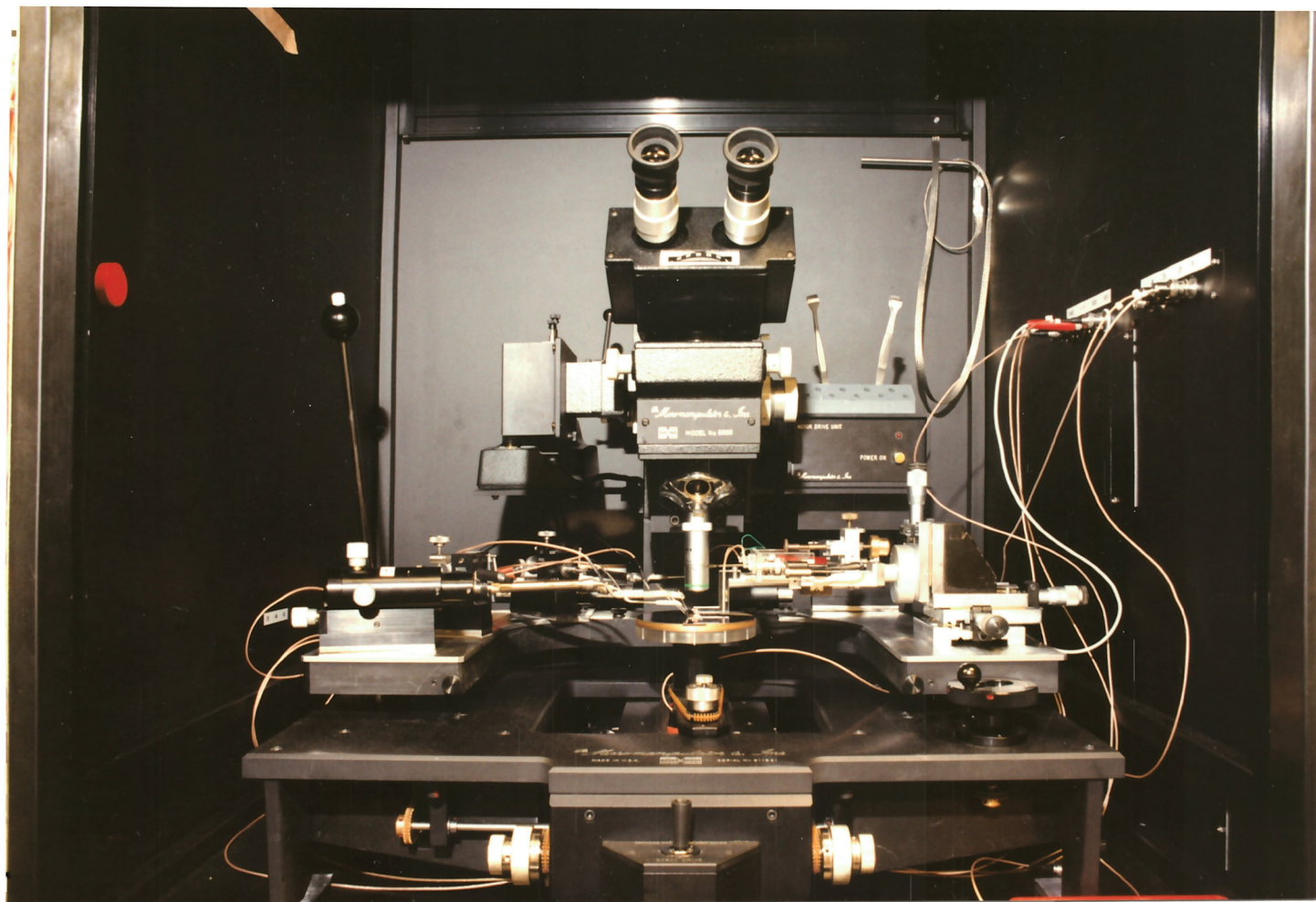
Fig.. 4-2 : Représentation de la sonde magnétique

- **Interprétation des dimensions**

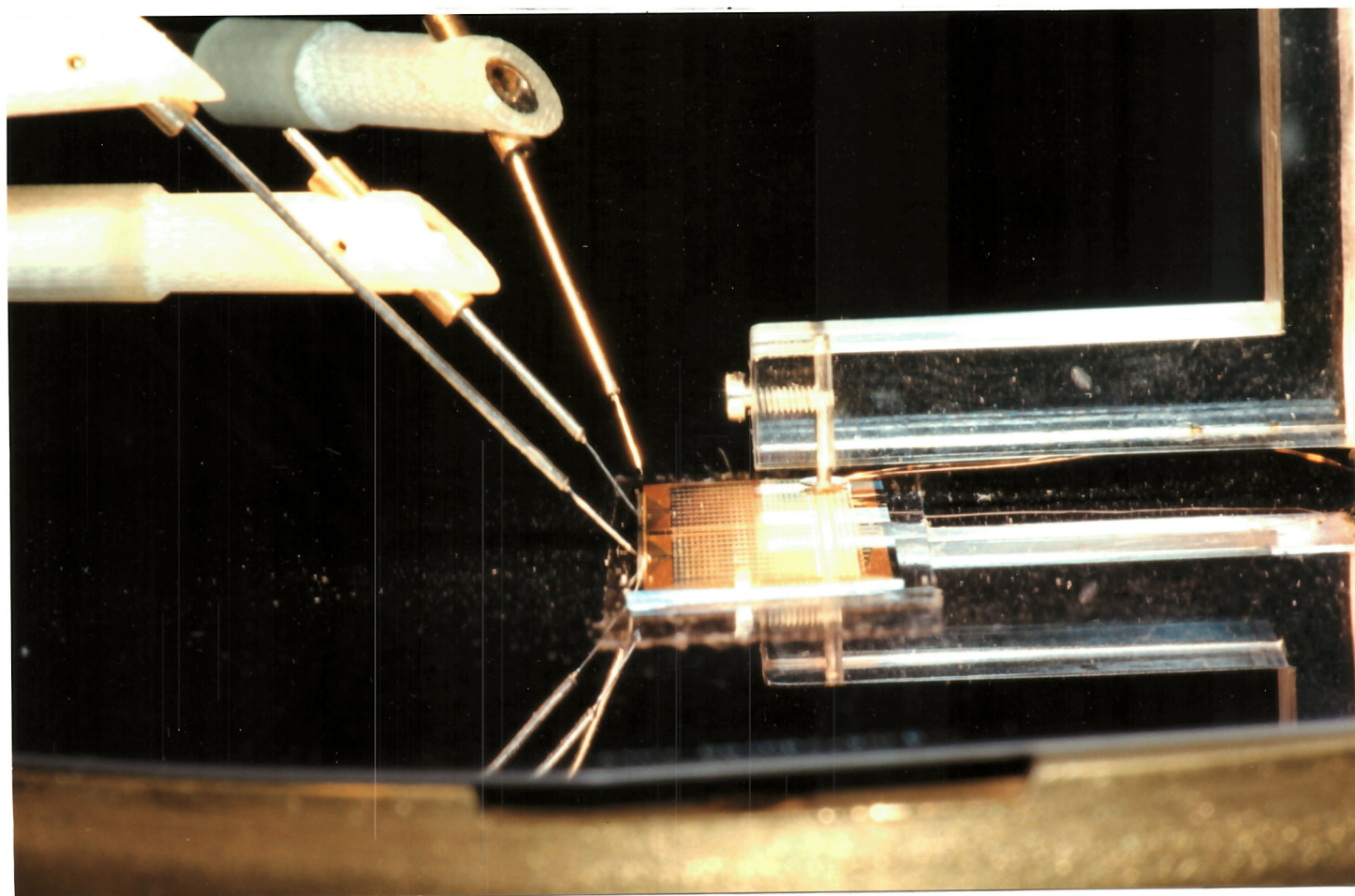
La figure 4-3 représente les vues cotées de la pièce.

- La plage de microélectroaimants présente des plots de surface  $40 \times 40 \mu\text{m}^2$ , cet ordre de grandeur est conservé pour le plot de la cellule captrice afin d'éviter la dispersion du flux magnétique. Les mesures se font indépendamment pour chaque plot.





**Photo 4-1a : Manipulateurs et microscope  
dans une cage de Faraday**



**Photo 4-1b : Pointes d'alimentation et sonde magnetique**

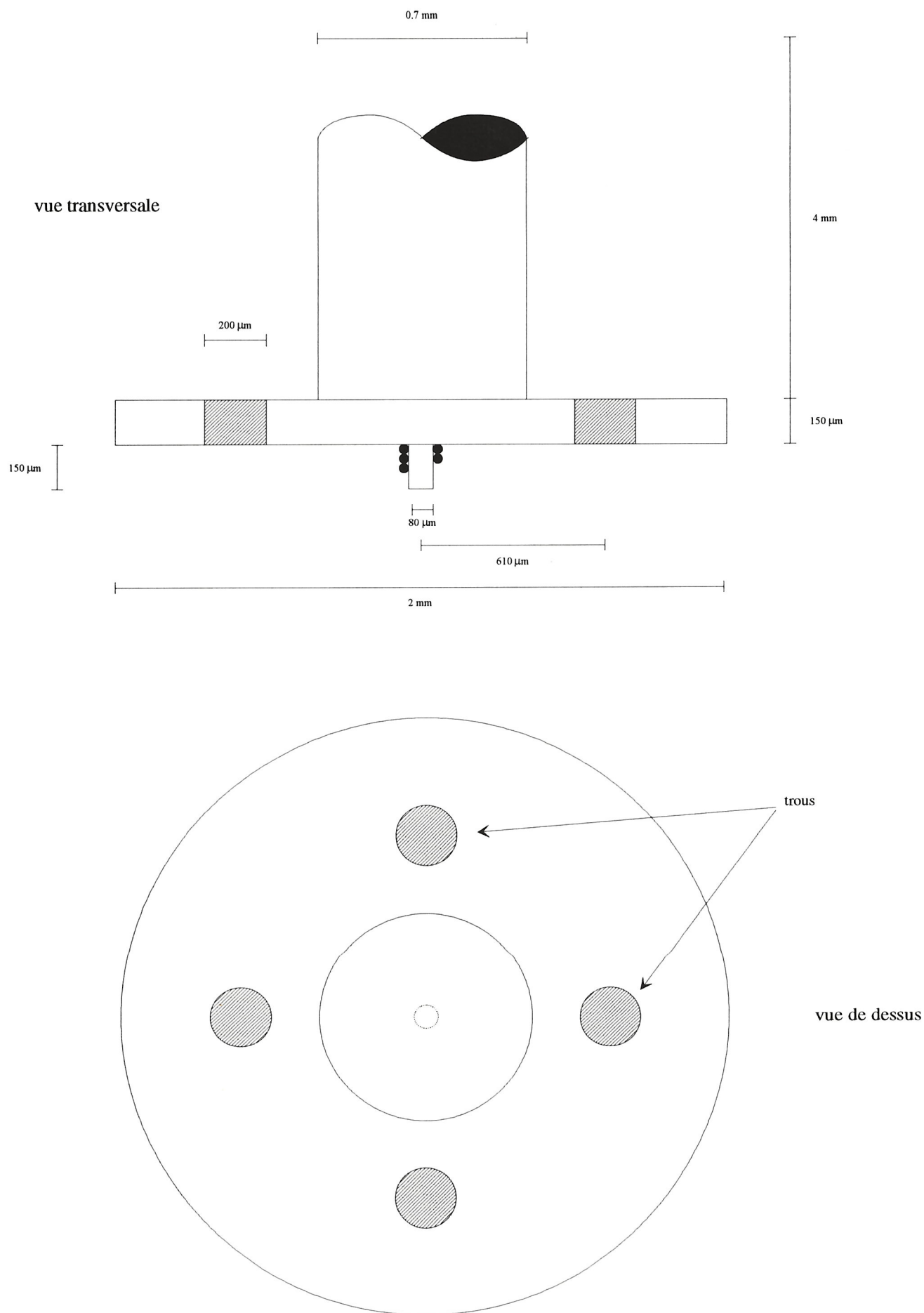


Figure 4-3 : Schéma à l'échelle du capteur



- La plaque circulaire recouvre une large surface de la matrice de microélectroaimants, ce qui facilite le bouclage des lignes de flux.
- Les microélectroaimants de la matrice ont une partie magnétique commune, qui permet de s'appuyer sur les plots voisins pour refermer le circuit magnétique. Les bords du circuit présentent alors un handicap qui peut altérer la mesure.
- La visibilité du circuit sous le capteur est partiellement préservée par les trous dans la plaque.
- La faible hauteur du plot limite le nombre de spires, donc d'Ampères-tours. Un fil isolé de  $32\mu\text{m}$  de diamètre permet d'obtenir 3 spires.

#### 4.2. Propriétés du matériau [5]

Le matériau constituant la sonde est un alliage magnétique doux appelé Supra 50, sa composition chimique en % pondéraux est la suivante :

| Ni    | Mn    | Si    | C     |
|-------|-------|-------|-------|
| 47.02 | 0.360 | 0.090 | 0.010 |

La valeur d'induction à saturation est élevée ( $B_s = 1.6$  Tesla ), ceci étant fonction de la teneur en nickel. Le champ coercitif a une valeur de 4 à 12 A/m.

Après un traitement thermique optimal, la valeur type de la perméabilité maximum en courant continu est de 100000.

Les courbes de la figure 4-4 indiquent la perméabilité à une fréquence d'excitation de 50 Hz.

- **Traitement thermique**

Après un usinage mécanique, ce matériau perd ces propriétés magnétiques, son aptitude de canalisation du flux est alors très réduite. La perméabilité du matériau est une grandeur caractéristique de ces propriétés, la tension induite mesurée dépend directement de sa valeur. Les caractéristiques magnétiques optimales des alliages à 47% de nickel sont obtenues par traitement thermique final des pièces à haute température. Ce traitement est d'abord destiné à recristalliser le métal. La figure 4-5 illustre l'influence de la température de traitement thermique entre 1000 °C et 1175 °C pendant une durée de 4 heures.





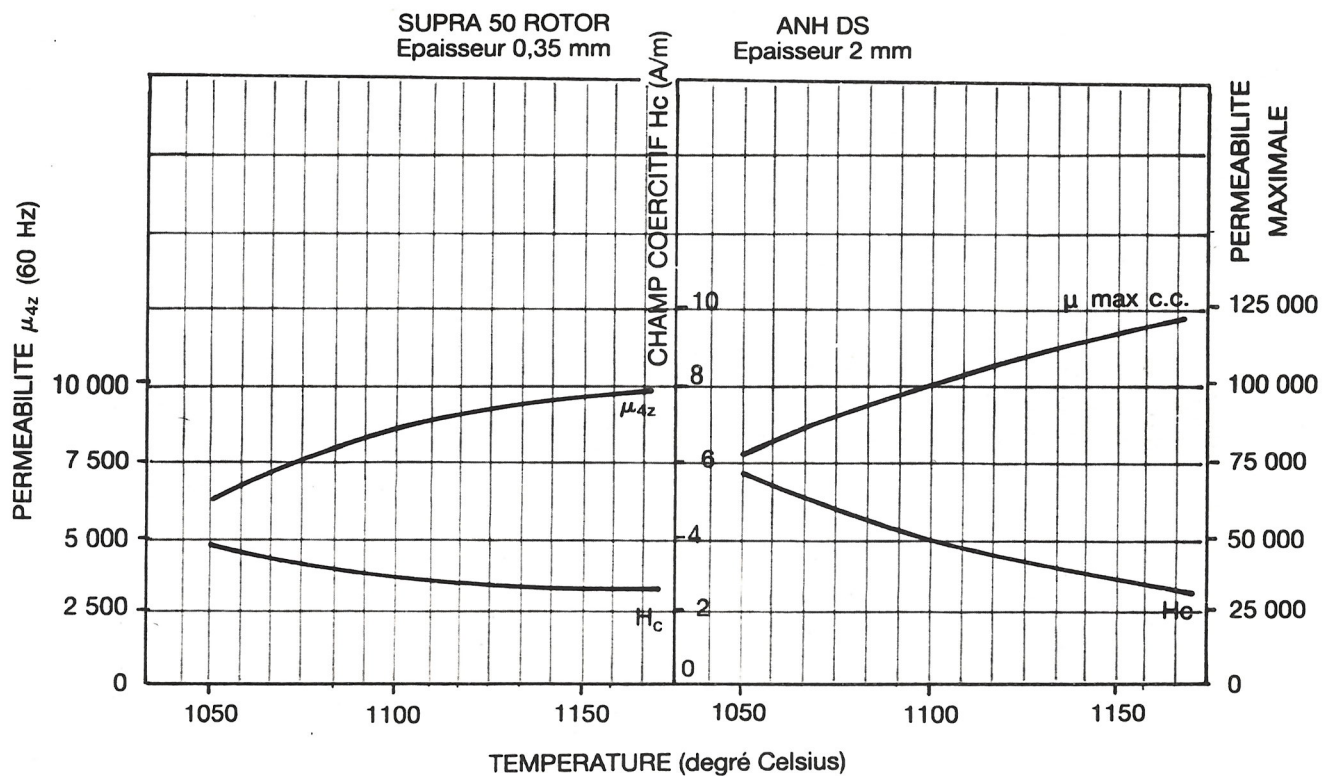
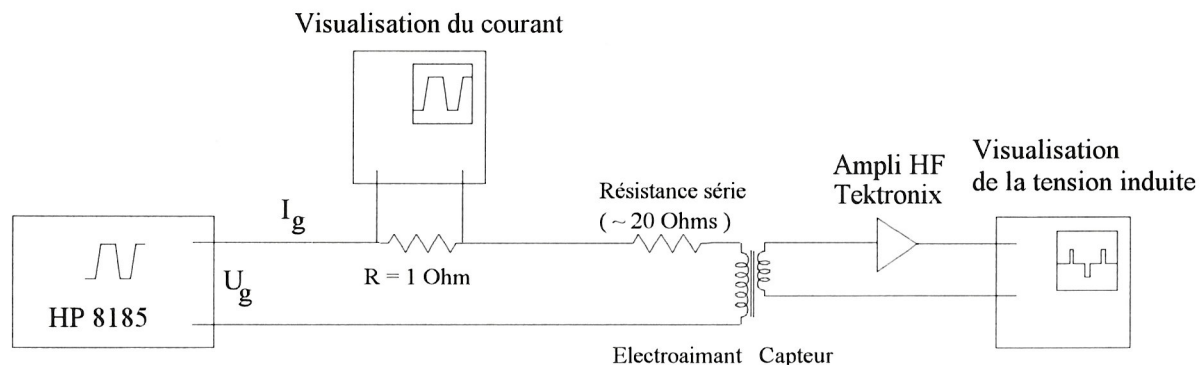


Fig. 4-5 : Evolution des caractéristiques magnétiques en fonction de la température du traitement thermique

Une température élevée favorise le grossissement du grain primaire et la purification du métal. Ceci se traduit par des perméabilités supérieures.

## 5. Système de mesure

### 5.1. Schéma bloc de l'ensemble



Générateur de courant

Figure 5-1 : schéma bloc

L'alimentation des microélectroaimants est assurée par un générateur d'impulsions débitant 200 mA, leur régime de fonctionnement normal se situe autour de 350 mA.

Un oscilloscope permet de visualiser la forme et l'intensité du courant  $I_g$  à travers une faible résistance.

La mesure de la tension induite se fait de même sur l'oscilloscope, après un étage d'amplification.

### 5.2. Appareils utilisés

- HP 8185A 50 MHz Dual Channel Pulse Generator [6]

Le HP 8185A peut générer des impulsions préalablement programmées, leur fréquence peut aller jusqu'à 50 MHz.

L'amplitude maximale disponible est de 16 Volts dans une charge de  $50 \Omega$ .

La valeur minimale pour la période est 18 ns, les rampes les plus rapides durent 5.5 ns.

Les transitions dans notre cas sont linéaires. Ce générateur d'impulsion alimente un microélectroaimant, le signal est donné sur la photo 5-2.

- Amplificateur Différentiel 7A22 Tektronix [7]

Cet amplificateur intégré à l'oscilloscope, est placé à la sortie du capteur. Les possibilités de filtre passe-bas et passe-haut étant offerte, le signal induit peut alors être détaché du bruit.

La sélection du point à 3 db permet d'avoir une bande passante de 100 Hz à 1 MHz.

Le 7A22 possède des calibres allant de  $10 \mu\text{V}$  à 10 V par division. La résistance et la capacité à l'entrée sont respectivement  $1 \text{ M}\Omega$  et 47 pF.



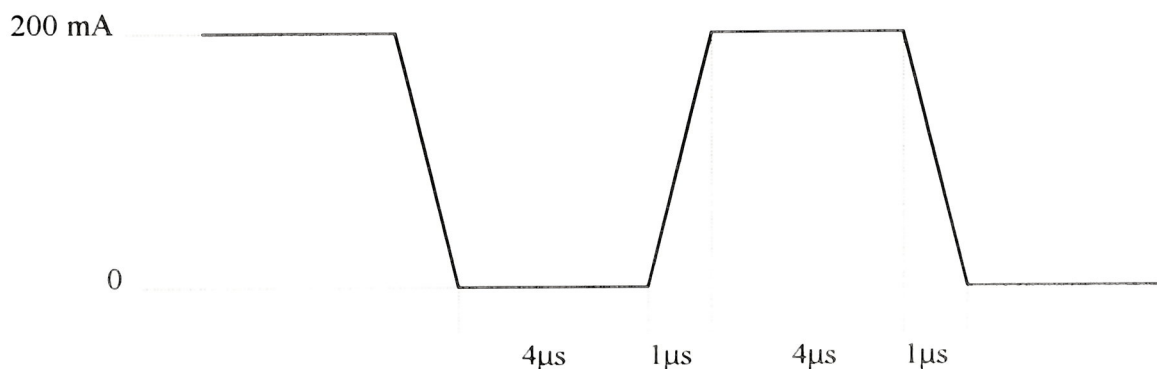
### 5.3. Signaux ( génération, forme, fréquence )

La tension induite est dépendante de l'amplitude des variations de  $I_g$ , et de la vitesse de ces variations. Les signaux alimentant les microélectroaimants doivent être à haute fréquence et de forte intensité.

La première limitation se situe au niveau du générateur qui ne peut débiter un courant important à haute fréquence. Un équilibre devra alors être trouvé entre intensité et fréquence pour un signal généré optimal. Le générateur peut fournir une intensité de 200 mA à 100 kHz, avec une déformation minimale du signal.

Le choix d'une forme trapézoïdale s'explique par ses variations linéaires, qui induisent une valeur constante du signal dérivé.

Le circuit du primaire comprend des diodes, le signal d'entrée est alors strictement positif, sa forme exacte est la suivante :



A cette fréquence le signal sur l'oscilloscope est déformé par le circuit alimenté, la photo 5-2 montre le signal réel.

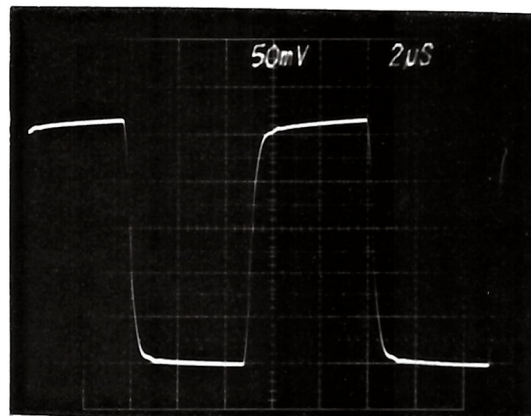


Photo 5-2 : Signal d'alimentation du microélectroaimant

#### 5.4. Mesure de la tension induite

L'amplitude du signal induit est de l'ordre de quelques millivolts, une amplification est alors nécessaire pour le distinguer du bruit. D'autres parasites peuvent troubler les mesures, en particulier des effets d'antennes présents dans le circuit, sont susceptibles de capter des signaux. Des protections sont nécessaires tels que le blindage des fils et une enceinte de Faraday, pour éviter tous brouillage néfaste.

Une autre condition nécessaire est l'impédance d'entrée du circuit de mesure élevée, afin de ne pas générer de courant et donc un flux opposé.

Ces précautions étant prises, on peut observer un signal induit tel que celui représenté sur la photo 5-3, on remarque que la tension induite suit bien la pente du signal d'entrée.

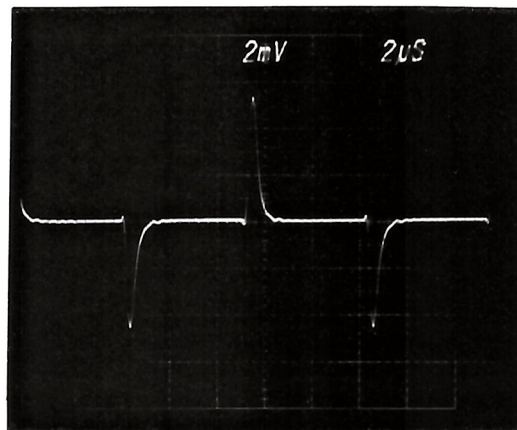
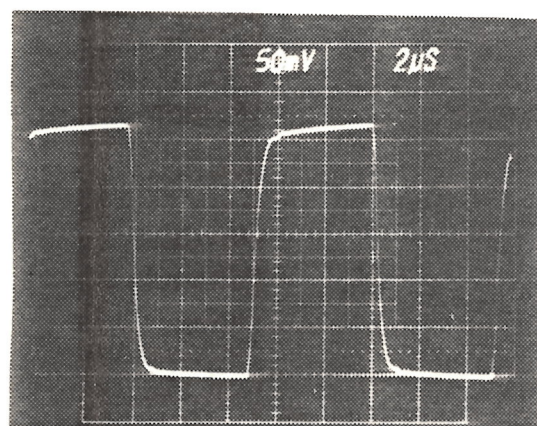
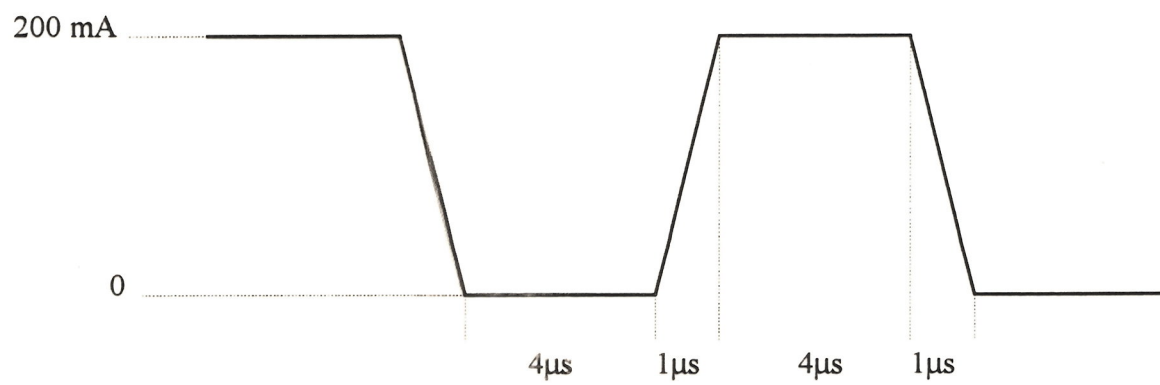
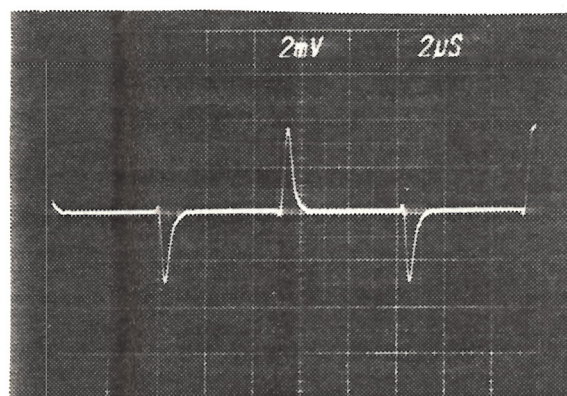


Photo 5-3 : Tension induite aux bornes  
des spires de la sonde



Signal d'alimentation du microélectroaimant



Signal capté par la sonde



## 6. Analyse des résultats

L'amplitude de la tension mesurée est d'une part en accord avec les calculs théoriques, et d'autre part chute linéairement lorsque la sonde s'éloigne du microélectroaimant alimenté. La forme de la tension induite correspond assez fidèlement à la dérivée du signal d'entrée. Les signaux visualisés sont détachés du bruit, cependant des parasites faibles mais discernables quand la sonde est très éloignée du circuit, doivent être pris en compte.

Afin d'accroître le signal par rapport aux parasites, et ainsi d'avoir une mesure plus précise, l'installation devrait subir quelques améliorations ( signaux d'entrée, protections ).

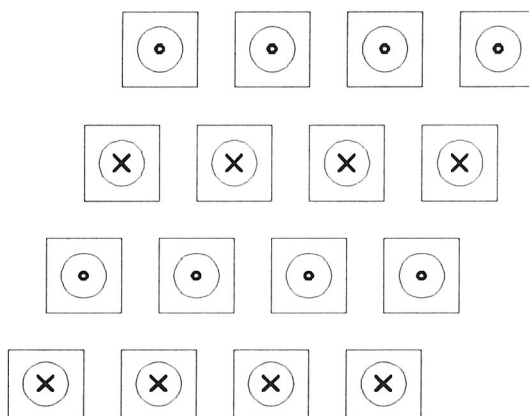
### 6.1. Problèmes de génération du signal d'entrée

Les générateurs de signaux débitant une intensité importante (  $> 200 \text{ mA}$  ) à haute fréquence sont rares. La possibilité la plus envisageable est un compromis entre haute fréquence et fort courant, en optimisant les valeurs de ces deux facteurs la tension induite pourra être assez élevée. La mesure sera d'autant plus sensible que la tension induite sera importante.

Cependant le fait de générer des signaux haute fréquence nécessite une protection consciencieuse de toute l'installation, il serait donc préférable de favoriser l'augmentation du courant par rapport à la fréquence.

### 6.2. Influences du circuit testé

Les plots de la matrice sont disposés comme suit :



Les signes  $\otimes$  et  $\odot$  donnent la direction du champ magnétique produit par chaque bobine. L'alimentation des microélectroaimants se fait par l'intermédiaire d'une matrice de diodes permettant d'avoir accès à chaque microélectroaimant. Des fuites de courant dues à ces diodes provoquent le fonctionnement de plusieurs microélectroaimants voisins.

Le champ des plots voisins peut s'opposer ou se coupler au champ généré par le plot testé, l'interprétation peut alors devenir plus complexe.

La mesure relative de la tension induite issue des électroaimants voisins par rapport à celui étudié a montré l'ampleur de ces fuites. Par la suite, une parade ayant été trouvée, les tests à l'aide de la sonde magnétique ont confirmé l'annulation des fuites.

Mais la position de la sonde au-dessus de la matrice de microélectroaimants peut avoir une influence sur la mesure, la sonde peut recouvrir un nombre aléatoire de plots, trois cas sont possibles : la sonde peut se trouver au bord , dans un coin ou au milieu de la plage de microélectroaimants.

La réluctance des entrefers du circuit magnétique global varie avec la position géographique de la sonde, ainsi la valeur tension induite est affectée.

## 7. Conclusions et extensions de la caractérisation

Afin de capter plus de flux, plusieurs transformations de la sonde sont prévisibles :

- le nombre de tours est un paramètre que l'on peut accroître, les exigences sur le courant et la fréquence pourraient alors être reconsidérés.

- l'amplification du signal induit est délicate, en particulier pour des hautes fréquences, en amplifiant très tôt ce signal les phénomènes parasites seront minimisés.

En négligeant les problèmes d'appareillages d'alimentation et de mesure, d'autres possibilités de caractérisations sont possibles avec cette méthode de test, telles que définir la saturation ou mesurer les valeurs du champ magnétique du circuit.

Dans une optique plus large, l'évolution vers des tests automatisés serait une suite logique de cette étude.

Ce stage m'a permis de suivre l'évolution d'un produit de l'idée originelle jusqu'à l'application dans des situations concrètes. Les différents domaines abordés durant cette étude, ont donné un intérêt supérieur à ces travaux, en particulier la collaboration avec un grand nombre de personnes du CSEM.



## Références

- [1] B. Saint-jean : Electrotechnique et machines électriques, Eyrolles 1976-77
  
- [2] Reboul : Cours d'électrotechnique de licence de PHYsique des Semiconducteurs et Composants Electroniques, 1992
  
- [3] D. Schneuwly, J. Berquist, S. Droz, D. Lafranchi : Rapport technique, juillet 1992
  
- [4] Swanson Analysis System Inc., Engineering Analysis System theoritical manual, Ansys 1989
  
- [5] Documentation sur les produits Imphy
  
- [6] HP 8185 A Operating and Programing Manual, Hewlett Packard, 1988
  
- [7] Tektronix, Catalog 1990