

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
République Algérienne démocratique et populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي  
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

جامعة سعد دحلب البليدة  
Université SAAD DAHLAB de BLIDA

كلية التكنولوجيا  
Faculté de Technologie

قسم الإلكترونيك  
Département d'Électronique



## Mémoire de Projet de Fin d'Études

présenté par

Kartout Warda

&

Maouchi Assia

pour l'obtention du diplôme de mater en Électronique option : Microsystème  
Microélectronique et Conception des Circuits électroniques

---

Thème

---

# ETUDE ET CARACTERISATION D'UNE TÊTE DE LECTURE (GMR) D'UN DISQUE DURE

---

Proposé par : Mr H.TAHI et Mme N. BOUGHERIRA

Année Universitaire 2015-2016

## Remerciements

---

*Nous tenons à remercier tout d'abord DIEU tout puissant qui nous a donné durant cette année la santé, le courage et la foi en nous-mêmes pour en arriver là.*

*C'est un agréable devoir pour nous d'exprimer notre très vive reconnaissance à Monsieur HAKIMA TAHI, qui a bien voulu nous encadrer et nous guider durant notre travail avec le sérieux et la compétence qui le caractérisent. Qu'il trouve ici le témoignage de notre profonde gratitude et notre grande estime.*

*Nous tenons à exprimer notre très vive reconnaissance à Madame BOUGHÉRIRA NADIA pour toute l'aide qui nous a octroyée. Qu'elle trouve ici l'expression de notre profonde reconnaissance.*

*Nous tenons à exprimer toute notre gratitude à tous nos enseignants qui ont contribué à notre travail et à tous les enseignants du département d'électronique et en particulier les membres du jury...*

*Nous tenons aussi à remercier nos familles en particulier nos parents respectifs, nos frères et sœurs sans oublier nos amis...*

*Finalement, nous remercions tous ceux qui ont participé de près ou de loin à l'achèvement de ce travail.*

---

## ملخص:

للإلكترونيات الدورانية منطقة حديثة في الامتداد الكامل . ويستخدم كل من خصائص الإلكترون ، وهي في تهمة و تداعياته . خلافا لل إلكترونيات التقليدية ( أو الكلاسيكية) أن يتجاهل تدور الإلكترونيات تعمل فقط على عهدتهم . منذ اكتشاف المقاومة المغناطيسية العملاقة ( GMR ) عن طريق ألبرت فير من المكونات الإلكترونية على أساس الملكية الكم تدور باستمرار أن ظهرت ، مثل الترانزستور تدور ، وأجهزة استشعار المجال المغناطيسي على أساس تقرير الرصد العالمي . وقد تم ذلك عملنا على توصيف القرص قراءة الرأس يدوم على أساس تقرير الرصد العالمي . كنا قادرين على الرغم من الصعوبات ذات العلاقة التصغير يميز المقاومة من الجهاز GMR تحتوي على رأس القراءة من القرص الثابت ، وتسليط الضوء تأثيره

## كلمات المفاتيح:

الإلكترونيات الدورانية, المقاومة المغناطيسية العملاقة  
رئيس القرص الثابت

---

**Résumé :** La spintronique est un domaine moderne en plein extension. Ce dernier utilise les deux propriétés d'électron, à savoir sa charge et son spin. Contrairement à l'électronique conventionnelle (ou classique) qui ignore le spin des électrons en agissant seulement sur leur charge. Depuis, la découverte de la magnétorésistance géante (GMR) par Albert Fert , des composants électronique basés sur la propriété quantique de spin ne cesse être émergé, tels que le spin transistor , les capteurs de champ magnétiques basé sur la GMR. Notre travail a été consacré sur la caractérisation de la tête de lecture de disque dure à base de GMR. Nous avons pu malgré la difficulté liés à la miniaturisation caractérise la résistance du dispositif GMR, contenant dans une tête de lecture d'un disque dure, en mettant en évidence son effet.

---

---

**Mots clés :**GMR; tête de lecture; spintronique

---

**Abstract:**

Spintronics is a modern area in full extension. It uses both electron properties, namely its charge and its spin .Unlike to conventional electronics ( or classic) that ignores the spin of electrons acting only on their charge. Since the discovery of giant magnetoresistance ( GMR) by Albert Fert of electronic components based on quantum property of spin constantly be emerged , such as the spin transistor , the magnetic field sensors based on GMR . Our work has been done on the characterization of the disk read head lasts based GMR . We were able despite the miniaturization related difficulty characterizes the resistance of the GMR device containing a read head of a hard disk , highlighting its effect.

**Keywords :** MGR, head of hard disc, spintronic

---

## Introduction Général

La spintronique est un sujet en plein développement à travers le monde. Contrairement à l'électronique classique qui est basée sur le contrôle de courants de charge, l'électronique de spin manipule des courants de spin en exploitant l'influence du spin sur le transport électronique.

La première manifestation d'effet de spintronique a été la magnétorésistance géante ou (GMR), découverte en 1988. Dans des multicouches alternant un métal magnétique et un métal non magnétique, un changement de résistance important est observé lorsque les aimantations des couches magnétiques successives basculent d'un état antiparallèle en champ nul à un état parallèle aligné en champ appliqué.

Récemment, l'exploitation de la GMR est venue accroître énormément les capacités de stockage des disques durs. La progression s'est accentuée avec l'arrivée des têtes à magnétorésistance puis confirmée avec la mise sur le marché des disques à tête de lecture GMR. Dans ce travail, nous essayons de caractériser l'effet GMR d'une tête de lecture d'un disque dur.

Notre travail se présente comme suit. Dans le premier chapitre, nous présenterons un résumé des approches bibliographiques illustrant le progrès réalisé dans la microélectronique au cours des dernières décennies. Qui permettra d'aller plus loin, et imposera de repousser les limites de fonctionnement et technologique. Nous survolerons aussi le domaine du stockage de données en évoquant les différents types de mémoires existantes avec les limitations technologiques envisagées, et en fin on introduira les premières structures étudiées dans le domaine de la spintronique.

Dans le second chapitre, nous présenterons les bases du transport de spin dans les structures magnétiques. Nous y abordons d'abord les progrès essentiels de l'électronique de spin d'un point de vue historique ainsi que les fondements de la spintronique. Nous nous intéresserons

ensuite aux phénomènes essentiels de la spintronique à savoir l'effet GMR. Nous commencerons par analyser un certain nombre de modèles concernant les jonctions

«Ferromagnétique/métal non magnétique/ferromagnétique» afin de calculer la magnétorésistance (l'effet GMR).

Le troisième chapitre est consacré à la présentation de l'expérience utilisée pour la caractérisation de la tête de lecture de disque dur à base de GMR. Dans un premier temps nous avons présenté les différents appareillages utilisés dans cette réalisation; et une deuxième étape consiste à présenter l'expérience elle-même et on terminera par une interprétation des résultats obtenus.

## **Chapitre1**

# **ETAT DE L'ART SUR LES TECHNOLOGIES : MEMOIRES EMERGENTES ET SPINTRONIQUE**

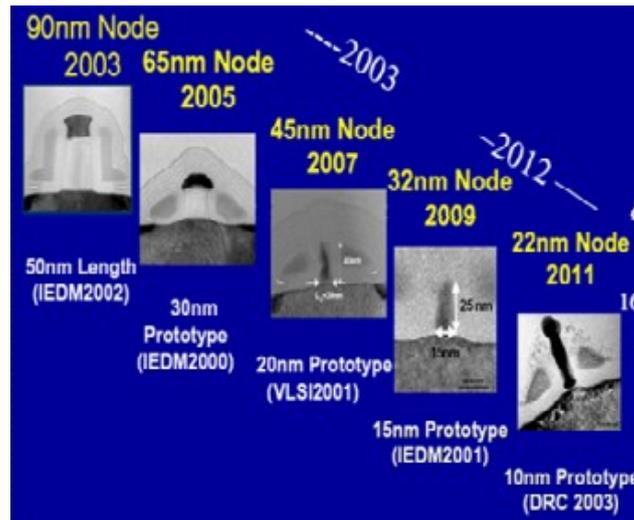
## Introduction

Dans le chapitre qui suit, nous allons présenter un résumé des approches bibliographique illustrant les progrès réalisés dans la microélectronique au cours des dernières décennies. Bien sûr cette volonté d'aller toujours plus loin, nous impose de repousser les limites de fonctionnement et technologique. Nous survolerons aussi le domaine du stockage de données en évoquant les différents types de mémoires existants avec les limitations technologiques envisagées, on introduit Les premières structures étudiées dans le domaine de la spintronique.

### I.1. Évolution de la microélectronique

Les performances de nos ordinateurs ne cessent de s'améliorer grâce aux extraordinaires progrès réalisés dans les domaines de la physique, de l'électronique et des logiciels au cours des dernières décennies.

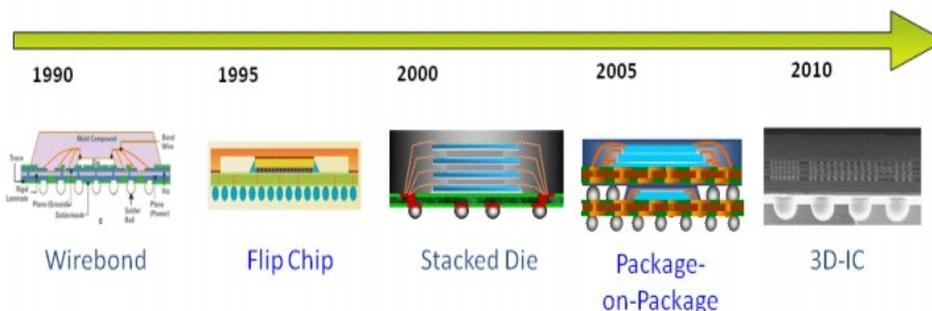
Le monde de la microélectronique et de la nanoélectronique est en évolution permanente depuis plus de 50 ans avec une évolution fulgurante. Cette évolution était déjà prédite par Gordon Moore en 1965 [1][2][3]. Ainsi le progrès dans la miniaturisation est constant environ tous les dix ans, les transistors deviennent 10 fois plus petites (**Figure. 1.**) La miniaturisation a conduit la microélectronique à l'échelle du nanomètre ouvrant l'horizon vers de formidables défis scientifiques et technologiques qui participent à faciliter la vie de tous les jours avec plus de puissance et de fiabilité [4][5] [6].



**Figure 1.1** : La complexité des circuits intégrés s'accroît d'un facteur 2  
Chaque année pour les mémoires et 1.5 pour les circuits logiques [6].

Les avantages de cette miniaturisation sont divers et ont permis entre autres (Figure. 2)[7]:

- d'augmenter les vitesses de fonctionnement des processeurs, grâce à la réduction des distances entre les composants.
- de réduire les coûts, grâce au remplacement de plusieurs circuits par un seul et la réduction du volume de matière nécessaire.
- d'augmenter la fiabilité en supprimant les connexions entre les composants du processeur en supprimant l'un des principaux vecteurs de panne.
- de créer des ordinateurs bien plus petits, mobiles et très puissants.
- de réduire la consommation énergétique avec une augmentation de la densité de puissance.



Figurel.2 : Évolution de la microélectronique vers la nanoélectronique 3D.

### **I.1.1A la poursuite de la miniaturisation**

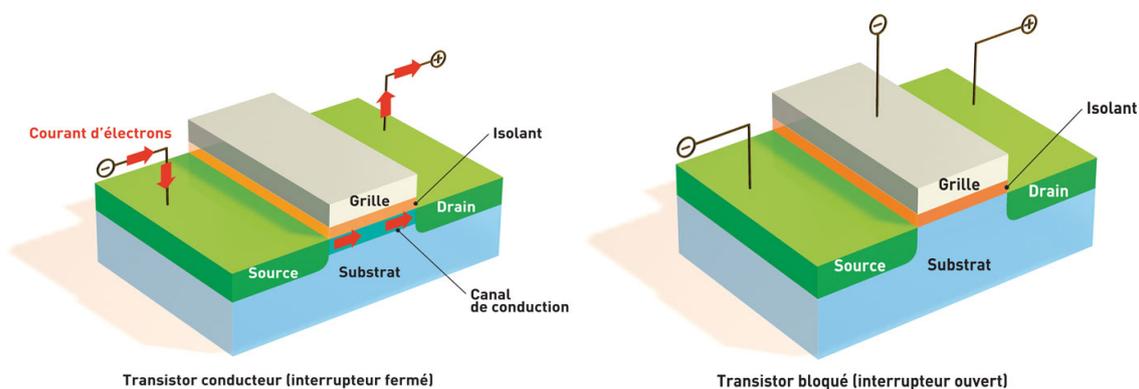
Jack Kilby a réalisé le premier circuit intégré En 1958 composé de 5 composants de 3 types : transistor, résistance et condensateur. La course à la miniaturisation fut ainsi lancée. En 1962, on peut intégrer 8 ( $= 2^3$ ) transistors sur la même puce ; 16 ( $= 2^4$ ) en 1963 ; 32 ( $= 2^5$ ) en 1964 ; 64 ( $= 2^6$ ) en 1965[8].

Le transistor (de l'anglais transferresistor, résistance de transfert), composant de base des circuits intégrés micro-électroniques, le restera mutatis mutandis à l'échelle de la nanoélectronique : adapté également à l'amplification, entre autres fonctions, il assume en effet une fonction basique essentielle de commutation : laisser passer un courant ou l'interrompre à la demande, à la manière d'un commutateur. Son principe de base s'applique donc directement au traitement du langage binaire (0 : le courant ne passe pas ; 1 : le courant passe) dans des circuits logiques (inverseurs, portes, additionneurs, cellules mémoire) [8].

Le transistor, fondé sur le transport des électrons dans un solide et non plus dans le vide comme dans les tubes électroniques des anciennes triodes, est composé de trois électrodes (anode, cathode et grille) dont deux servent de réservoirs à électrons : la source, équivalent du filament émetteur du tube électronique, le drain, équivalent de la plaque collectrice, et la grille, le « contrôleur ». Ces éléments ne fonctionnent pas de la même manière dans les deux principaux types de transistors utilisés aujourd'hui, les transistors bipolaires à jonction, qui ont été les premiers à être utilisés, et les transistors à effet de champ (en anglais FET, Field Effect Transistor). Les transistors bipolaires mettent en œuvre les deux types de porteurs de charge, les électrons (charges négatives) et les trous (charges positives), se

composent de deux parties de substrat semi-conducteur identiquement dopées (p ou n), séparées par une mince couche de semi-conducteur inversement dopée [8].

Ce sont ces derniers, sous la forme MOS (Métal Oxyde semi-conducteur), qui composent aujourd'hui la plupart des circuits logiques du type CMOS (C pour complémentaire) [On parle alors de transistor MOSFET (Metal-OxideSemiconductor Field Effect Transistor)]. Sur un cristal de silicium de type p, deux régions de type n sont créées par dopage de la surface. Appelées là aussi source et drain, ces deux régions ne sont donc séparées que par un petit espace de type p, le canal. Sous l'effet d'une tension positive sur une électrode de commande placée au-dessus du semi-conducteur et qui porte tout naturellement le nom de grille, les trous sont repoussés de sa surface où viennent s'accumuler les quelques électrons du semi-conducteur. Un petit canal de conduction peut ainsi se former entre la source et le drain(Figure.3). Lorsqu'une tension négative est appliquée sur la grille, isolée électriquement par une couche d'oxyde, les électrons sont repoussés hors du canal. Plus la tension positive est élevée, plus la résistance du canal diminue et plus ce dernier laisse passer de courant [8].



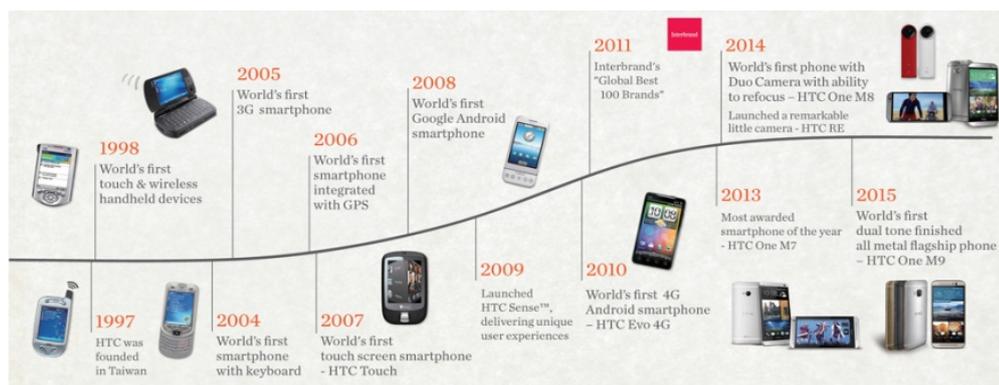
**Figurel.3:** fonctionnementd'un transistor MOS.

Il existe plusieurs de formes de transistors, selon les besoins: stockage de l'information (Flash, EPROM...), calcul rapide et à faible consommation (CMOS), contrôle de puissance, génération de hautes fréquences (RF), photosensibles, ...etc [4]

Les dimensions de ces diverses couches constitutives varient de 10-nm à 3nm (environ 5 atomes). La répétitivité de certains processus de fabrication est d'une couche atomique-: les transistors sont depuis longtemps des objets nanotechnologies. [4].

Donc L'intérêt de la miniaturisation est triple D'abord, en raccourcissant l'espace entre la source et le drain, elle accélère le passage des électrons et augmente ainsi le nombre d'opérations réalisées par seconde tout en réduisant la consommation en énergie des transistors. Ensuite, la réduction de la taille des circuits permet la fabrication collective de centaines de puces sur chaque plaquette de silicium, abaissant leur coût unitaire.

Enfin, la miniaturisation diminue l'encombrement des objets tout en multipliant leurs fonctions. L'exemple ci-dessous montrant l'évolution du téléphone portable depuis 20 ans est parlant (**Figure. 4**). [8].



Figurel.4: Évolution de la technologie du téléphone portable de 1997 à 2015[11]

Cette réduction de dimensions implique la multiplication de phénomènes quantiques de toutes sortes, ainsi les difficultés de fabrication (Figure.5), ce qui va inciter progressivement à

revisiter les bases et architectures mêmes du fonctionnement des transistors actuels. La nanoélectronique sera différente de la microélectronique. C'est pourquoi les recherches se tournent dans trois directions [4]:

- une amélioration des dispositifs existants, dans la lignée actuelle-;
- une rupture architecturale (transistors verticaux...);
- une rupture fondamentale (nanotubes, spintronique...);

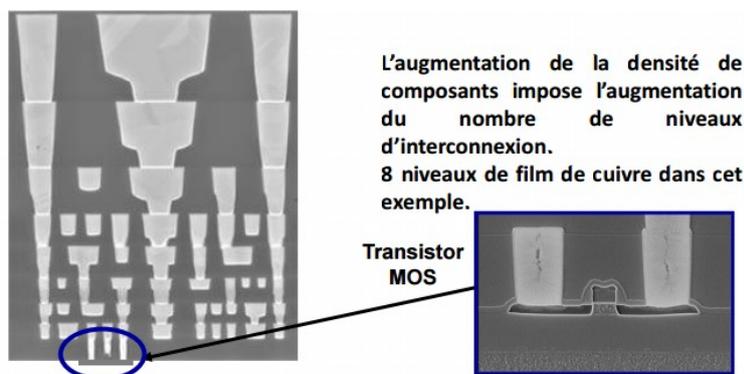
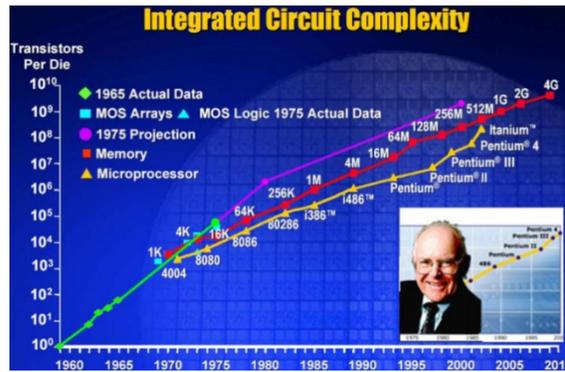


Figure 5 : Augmentation de la complexité avec des structures et des assemblages tridimensionnels.[9]

### I.1.2 Loi de Moore -Limitation physique

La loi de Moore n'est pas une théorie scientifique, mais un ensemble d'observations et de prédictions faites par le cofondateur d'Intel, Gordon Moore [1]. La prédiction essentielle de Gordon Moore, c'est que la densité des transistors, c'est-à-dire le nombre de transistors que l'on peut placer sur une matrice, double tous les deux ans, multipliant par deux la performance (Figure 6).



Figurel.6: Réduction des dimensions des grilles des transistors. [9]

Autrement dit, cela signifie que tous les 18 à 24 mois, on peut acheter un ordinateur nettement plus rapide avec la même somme d'argent. [10]

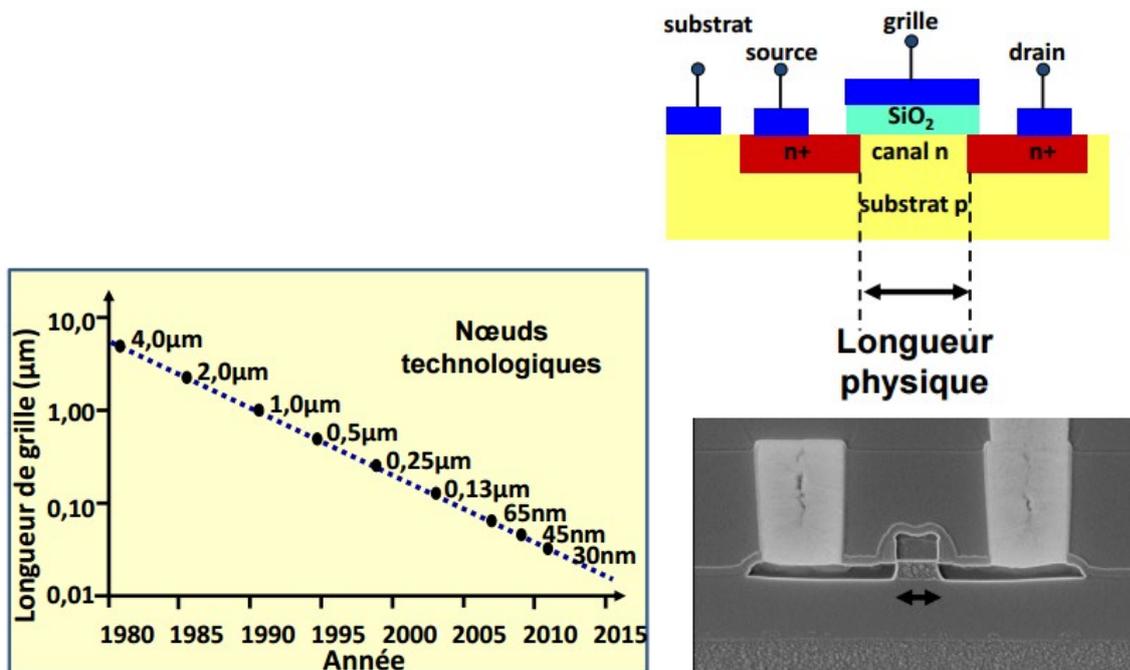


Figure I.7: Augmentation de la complexité

La loi de Moore s'approche de sa limite physique ou financièremais Il reste possible de diminuer encore la taille des transistors «au prix d'investissements colossaux et d'équipements

de production très onéreux. Ainsi, la nouvelle technique de production, si précise à élaborer, devient bien plus coûteuse que celle utilisée pour la génération précédente [12].

- **Une limite physique**

qui est envisagée autour de 2020: actuellement, dans un circuit intégré, la barrière isolante qui sépare la grille du transistor et le canal correspond déjà à une centaine de couches d'atomes.[12]]. En poursuivant la miniaturisation, elle devient si fine que l'effet tunnel quantique commence à se manifester, créant une fuite de courant lorsque le commutateur est en position fermée, fuite qui constitue une fraction significative du courant du canal quand le dispositif est en position ouverte, ce qui réduit la fiabilité des transistors [13][14].

- **Une limite économique,**

qui pourrait intervenir plus rapidement que la limite physique : le coût de développement d'une technologie augmente de 30 % par noeud technologique. Actuellement, seuls Intel, l'alliance IBM et TSMC sont capables de financer la recherche et développement pour les générations logiques 32 et 22 nm. Qu'en sera t-il pour les générations futures ?[11].

### **1.1.3 L'air de l'après silicium**

La limite de la miniaturisation dans les transistor approche et les pionniers dans ce domaine sont bien conscients de ce défi technologique et ont commencé depuis plusieurs années à explorer de nouvelles voies pour préparer l'après silicium qui permettrait de concevoir et réaliser des ordinateurs plus puissants, plus fiable et encore plus compcte.[13]

la croissance technologique dans l'industrie de l'électronique a toujours été mesurée par le nombre de transistors qui peuvent être entassés sur une seule puce . Malheureusement,

toutes bonnes choses doivent venir à une fin ; la croissance spectaculaire du nombre de transistors sur une puce nécessite une réduction spectaculaire de la taille du transistor. Pour les électrons semi-conducteurs, les lois de la mécanique quantique prennent le relais à l'échelle du nanomètre, et la sagesse conventionnelle pour le progrès doit être abandonnée. Cette prise de conscience a stimulé des recherches approfondies sur les moyens d'exploiter le spin ( en plus de l' orbite ) degré de liberté de l'électron , donnant naissance au domaine de la spintronique .

## **I-2 Histoire de spin**

L'électronique de spin est une nouvelle technologie en plein développement. Les premières structures étudiées dans ce domaine sont constituées de multi couches métalliques ferromagnétiques, séparées soit par isolants « tunnel » soit par des films métalliques non magnétique. leurs rôles principe de fonctionnement sont liés à une propriété des métaux ferromagnétiques relatives au spin des électrons : ils injectent ou collectent préférentiellement des porteurs dont le spin est polarisé suivant la direction de leurs moment magnétique .de tels que dispositifs sont déjà utilisé au niveau industriel en tant que capteurs des champ magnétique pour têtes de lectures de disque dure, ou des mémoires MRAM magnétiques.

La mise au point de la vanne de spin a suivi la découverte en 1988 de la magnétorésistance géante (GMR) des multicouches ferromagnétiques. L'influence du spin sur la mobilité des électrons dans les conducteurs ferromagnétiques est connue depuis longtemps. L'existence de courants polarisés en spin, initialement suggérée par Mott, a été démontrée par des expériences et décrite par des modèles théoriques il y a environ 30 ans, essentiellement par des chercheurs européens, initialement à Orsay puis à Strasbourg et Eindhoven. Dans des

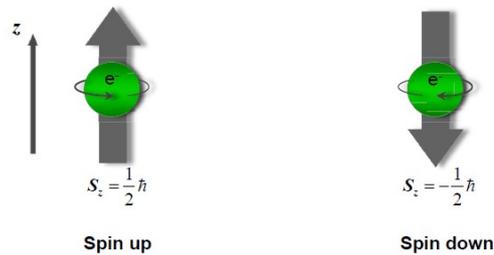
métaux ferromagnétiques comme le fer ou le cobalt, les électrons de spin « majoritaire » et de spin « minoritaire » transportent des courants qui peuvent différer de plus d'un facteur dix, essentiellement du fait de libres parcours moyens très différents. Cette différence a pour origine le décalage en énergie des bandes d'états électroniques des deux directions de spin sous l'effet de l'interaction d'échange.

Une multicouche magnétique est un empilement de couches de métaux alternativement ferromagnétiques et non-magnétiques, cobalt et cuivre par exemple. A travers les effets de transport dépendant du spin décrits ci-dessus, la résistance d'une telle multicouche dépend fortement de l'orientation relative des aimantations de couches ferromagnétiques voisines, c'est l'effet GMR. La « vanne de spin » est, quant à elle, une multicouche sophistiquée, travaillant en courant parallèle au plan des couches, et conçue pour optimiser un fonctionnement de type capteur [14].

### **1.3 définition de spin**

Les électrons ont une charge et un spin mais, pendant longtemps, charge et spin ont été utilisés séparément. L'électronique classique ignore le spin et déplace les électrons en agissant seulement sur leur charge. Le spin apparaît traditionnellement à travers sa manifestation macroscopique, l'aimantation d'un matériau magnétique, utilisée pour stocker de l'information. Sous l'impulsion de plusieurs découvertes récentes une nouvelle électronique émerge, qui associe contrôle de courants de spins et de charges dans des nouveaux dispositifs intégrables aux circuits haute densité de la microélectronique. Les mémoires RAM magnétiques en sont un premier exemple. Cette « Electronique de Spin » ou « Spintronique », aujourd'hui en pleine expansion, évolue vers les nano dispositifs hybrides associant semi-conducteurs et

ferromagnétiques, et promet des applications à l'enregistrement, l'électronique, l'optoélectronique et l'information quantique.



**Figure 1.8** : spin up (gauche) et spin down (droite) des électrons.

### **I.5. Transport de spin :**

Au-delà de l'injection de spin, le transport de spin à travers une barrière tunnel est également un challenge important. La limitation majeure dans ce cas est la qualité des interfaces et le désaccord des structures électroniques entre électrode ferromagnétique et barrière isolante.

Dans les semi-conducteurs ferromagnétiques, ou théoriquement tous les moments magnétiques sont alignés dans la même direction, le courant de conduction est théoriquement fortement polarisé en spin. Les semi-conducteurs magnétiques dilués apportent donc une double compétence, à la fois une polarisation maximale et une solution pour l'injection de spin en permettant l'utilisation exclusive de semi-conducteur comme électrode et barrière.[16]

### **I.6 Généralité sur la magnétorésistance**

La résistance électrique est liée à la « loi d'Ohm » où  $U = R.I$  : qui relie la tension  $U$  (exprimée en volts) appliquée aux bornes d'un conducteur, à l'intensité  $I$  (en ampère) du courant qui le parcourt. Moins le conducteur résiste et plus cette intensité n'est élevée. Rappelons que

l'intensité exprime le nombre de charges électriques qui franchissent toutes les secondes une section du conducteur : environ 61018 électrons par seconde franchissent une section d'un fil électrique parcouru par un courant d'un ampère.

La résistance électrique  $R$ , coefficient de proportionnalité entre  $U$  et  $I$ , est finalement une notion intuitive ( pense ) que l'on pourrait résumer ainsi : « plus la résistance est élevée, et moins il y a de courant qui passe ». Dans la mesure où un champ magnétique convenablement orienté peut courber la trajectoire des électrons, on peut concevoir qu'un tel champ puisse modifier la résistance électrique qu'offre un conducteur au passage du courant : on parle de magnétorésistance. En effet, ce phénomène a été découvert en 1857 par William Thomson (1824-1907), plus connu sous le nom de Lord Kelvin. Sachant que la résistance électrique d'un matériau peut changer de quelques pourcents en fonction du champ magnétique auquel il est soumis, il est facile d'imaginer un dispositif permettant de déterminer la valeur d'un champ magnétique à travers la mesure d'une résistance électrique. Effectivement de tels instruments de mesure, détecteurs, et capteurs ont vu le jour après la découverte de Kelvin. A la fin des années 1980, soit après 130 ans de recherches théoriques et appliquées relatives à la magnétorésistance, il était communément admis qu'aucun progrès supplémentaire ne permettrait dans un avenir proche d'améliorer les performances des capteurs à magnétorésistance. [17]

## Conclusion

Ce chapitre traite les généralités sur technologie de la microélectronique et ses limites , ce qui nous poussé à aller vers une autre alternative qui est la spintronique.

Cette dernière est une technique qui exploite la propriété quantique du spin de l'électron. on la trouve dans une des applications les plus importantes : le stockage des informations (lecture et écriture) via les disques dure dont la tête contient la GMR .

Dans ce qui va suivre, nous allons exposer le principe de fonctionnement d'une GMR du point de vue théorique et expérimental.

## **Chapitre2**

# **ETUDE THEORIQUE ET EXPERIMENTALE DE LA GMR**

## **II.1 Introduction**

Dans le chapitre qui suit, nous présentons les bases du transport de spin dans les structures magnétiques. Nous y abordons d'abord les progrès essentiels de l'électronique de spin d'un point de vue historique ainsi que les fondements de la spintronique. Nous nous intéressons ensuite aux phénomènes essentiels de la spintronique à savoir l'effet GMR. Nous analysons un certain nombre de modèles concernant les jonctions «Ferromagnétique/métal non magnétique/ferromagnétique» afin de calculer la magnétorésistance (l'effet GMR).

## **II.2 Fondements de la spintronique :**

Les dispositifs qui utiliseraient le spin seront nécessairement petits, et nécessitent une très faible énergie pour leur maintien. Par ailleurs, la nature quantique du spin permet d'envisager des utilisations purement quantiques telles que les ordinateurs quantiques cet aspect est détaillé par A.Oumsallem [16]

Dans la spintronique nous avons besoins de prendre connaissance de quatre bases fondamentales citées ci-dessous.

### **II.2.1 Asymétrie de spin des porteurs du courant**

Dans un matériau non magnétique, qu'il soit métallique, isolant ou semi-conducteur, le nombre d'électrons de spin up et de spin down est le même. Dans un matériau magnétique, ce nombre est différent. C'est justement cette différence qui donne lieu à l'apparition d'un moment magnétique macroscopique non nul. Dans les métaux magnétiques usuels (fer, cobalt, nickel et

leurs alliages), les électrons responsables du magnétisme sont ceux-là mêmes qui participent au transport électrique. L'asymétrie de spin des porteurs est la première brique de base de la spintronique.

### **II.2.2 Approximation de Mott [17]**

Dans un métal, le mouvement des électrons est freiné par la diffusion due aux impuretés du réseau, aux défauts (dislocations, joints de grains, ...) et aux excitations collectives (phonons,) : c'est l'origine de la résistance électrique. En première approximation, lors des collisions et autres diffusions subies par les électrons, la probabilité de diffusion avec retournement du spin est négligeable. En d'autres termes, le spin des électrons est, en première approximation, conservé. On peut donc considérer que les électrons des spin up et des spin down conduisent le courant en parallèle: c'est l'approximation de Mott [17], deuxième brique de base de la spintronique.

### **II.2.3 Diffusion dépendant du spin :**

Dans un métal magnétique, puisque le nombre d'électrons est différent pour les électrons de spin up et de spin down, la probabilité de diffusion (qui est liée à la densité d'états) va être différente selon que le spin des électrons conducteurs du courant est parallèle ou antiparallèle à l'aimantation macroscopique locale. Cette propriété, appelée diffusion dépendant du spin, est la troisième brique de base de la spintronique.

### **II.2.4 Accumulation de spin :**

Enfin, lorsque le courant est injecté d'un matériau magnétique vers un matériau non magnétique, un désaccord apparaît à l'interface puisque le nombre d'électrons de spin up et de spin down est différent dans le métal magnétique alors qu'il est identique dans le métal non

magnétique. Il apparaît alors une zone tampon dans laquelle l'asymétrie de spin décroît progressivement. Cependant puisque la probabilité de diffusion avec renversement du spin est très faible, la dimension de cette zone tampon, appelée longueur de diffusion de spin, est importante. Cet effet d'accumulation de spin est la quatrième brique de base de la spintronique.

### **II.3 Phénomènes de la spintronique**

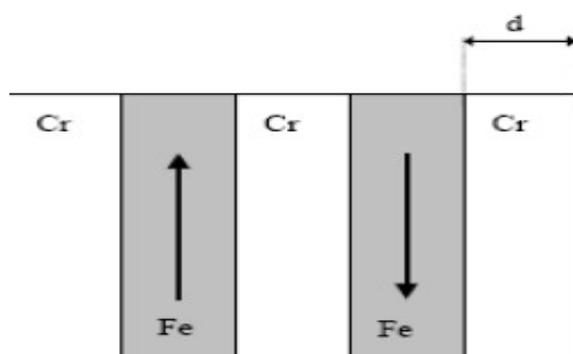
L'effet magnétorésistance : la GMR est le phénomène par excellence de la spintronique, nous pouvons définir ce dernier du point de vue théorique et expérimental.

#### **II.3.1 Définition de la magnétorésistance théoriquement:**

Du point de vue théorique, la magnétorésistance est la variation de la résistance d'un matériau sous l'action d'un champ magnétique. Celui-ci peut agir directement sur les électrons de conduction ou indirectement en affectant l'aimantation, la résistance dépendant alors de l'état magnétique du système. Dans les métaux ferromagnétiques massifs, on distingue la magnétorésistance normale des métaux qui est la conséquence directe de l'effet du champ magnétique sur la résistivité, et l'AMR (Anisotropic Magneto Resistance) qui résulte de la variation de la résistance avec l'angle entre le courant et l'aimantation du matériau. Une nouvelle forme de magnétorésistance, a été découverte en 1988 par l'équipe du Pr. Fert au Laboratoire de Physique des Solides à Orsay sur des multicouches Fe/Cr [18]. Cette dernière a été qualifiée de géante car la réduction de la résistivité est importante. Les multicouches présentant des propriétés de MRG sont obtenues en déposant alternativement sur un substrat des couches ultraminces de métaux magnétiques (Fe, Co..) et non magnétiques (Cr, Cu, Ag...).

- **II.3.2 Définition la magnétorésistance expérimentalement(GMR) :**

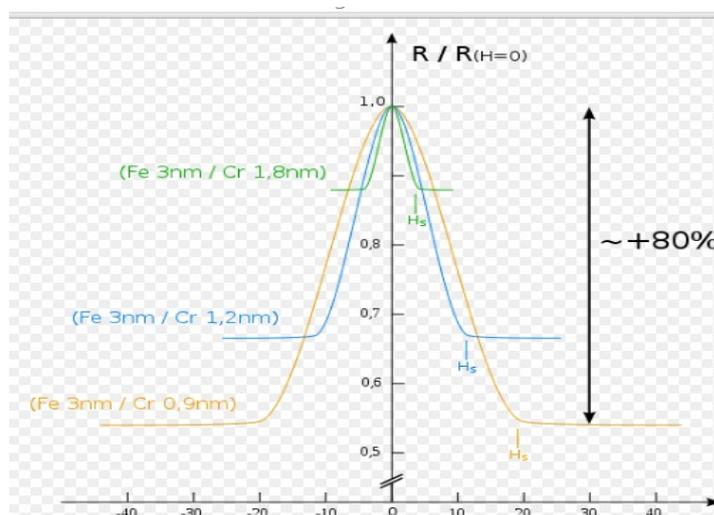
L'effet GMR a été mis en évidence expérimentalement en 1988 dans des empilements de couches Fe/Cr. Il se manifeste par une variation de la résistivité électrique du système en fonction des orientations des différentes aimantations de chaque couche. Les premières études Réalisées sur des systèmes constitués de 50 bicouches Fe/Cr ont montré que la différence de résistivité  $\frac{\Delta\rho}{\rho}$  entre la configuration où les aimantations de toutes les couches sont alignées parallèlement et antiparallèlement [18].



**Figure II.1** : Multicouches Fe/Cr, dans les quelles existe un couplage antiferromagnétique  
Entre les couches de Fe (d représente l'épaisseur des couches Cr).

Suivant l'épaisseur de la couche séparatrice de Cr, il peut y avoir un couplage, ferromagnétique ou antiferromagnétique, entre les couches de Fe. Lorsqu'un couplage antiferromagnétique est obtenu entre les couches magnétiques, l'application d'un champ magnétique provoque une diminution de la résistance électrique (figure II.2). Cette diminution est suivie d'une saturation pour le champ  $H_s$  qui correspond au champ de saturation de l'aimantation globale de l'échantillon. Lorsque l'épaisseur des couches de Cr atteint 0,9 nm, une chute de la résistance de 50 % est observée lors de l'application du champ magnétique. L'amplitude de cette variation (magnétorésistance) est bien supérieure à celles mesurées, avant

cette découverte, sur d'autres systèmes [18]. C'est pourquoi cette magnétorésistance a été qualifiée de géante.



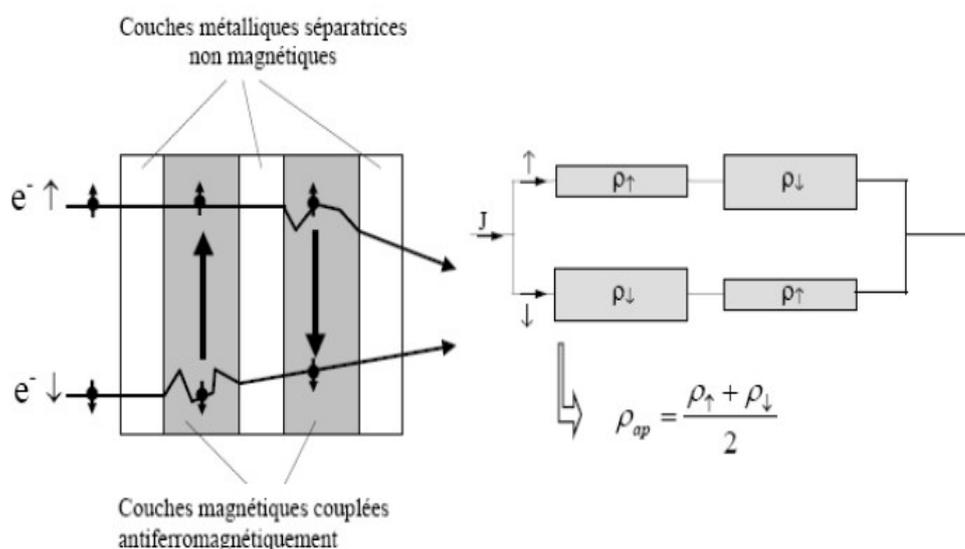
**Figure 2 :** variation de la résistivité électrique en fonction d'un champ magnétique

Pour des multicouches  $(Fe/Cr)_n$ , où  $n$  représente le nombre de périodes de la multicouche. L'épaisseur  $d$  des couches de Cr varie de 0,9 nm à 1,8nm. Mesure effectuée avec le courant appliqué dans le plan des couches (géométrie CIP : current in to the plane) [18]. La chute de résistivité est corrélée à la réorientation des moments magnétiques lors de l'application du champ magnétique. En effet, du fait du couplage antiferromagnétique, les moments magnétiques des couches de Fe passent d'une configuration antiparallèle en champ nul à une configuration parallèle en champ fort.

Dans les couches magnétiques, la diffusion des électrons de conduction étant dépendante du spin la réorientation des moments magnétiques provoque le changement de

l'état résistif de la structure. L'origine de la magnétorésistance géante se trouve donc dans le mécanisme de conduction des électrons dépendant du spin.

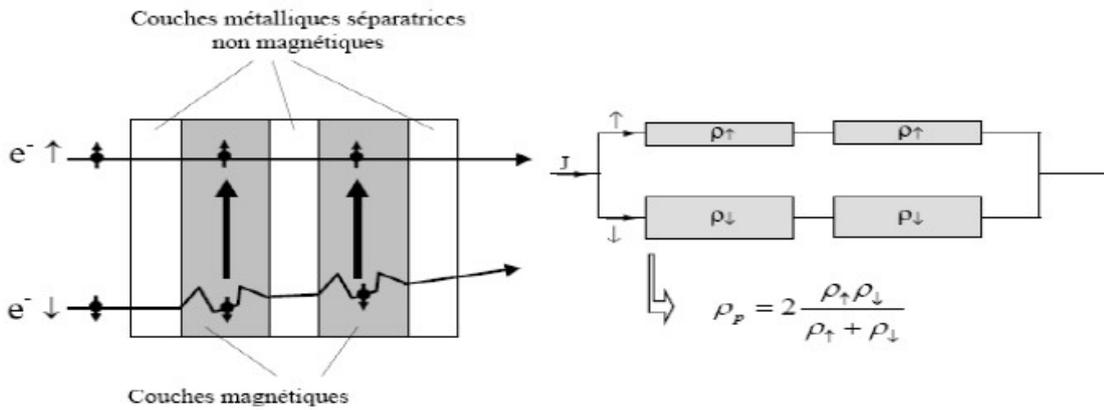
Considérons une couche Cr/Fe, on applique le modèle à deux courants de conduction, C'est-à-dire que le courant est transporté par 2 canaux indépendants d'électrons : le canal d'électrons de spin up et le canal d'électrons de spin down. Le mécanisme de conduction dans la structure multicouche du type Cr/Fe/Cr/Fe, est schématisé sur la figure suivante pour une configuration antiparallèle et pour une configuration parallèle.



**Figure II .3:** Mécanisme de conduction dans une structure multicouche périodique, et circuit équivalent en configuration magnétique antiparallèle.

En configuration antiparallèle, les deux canaux d'électrons ont globalement les mêmes résistivités et la résistivité globale  $\rho_{ap}$  de la structure dans cette configuration magnétique peut se déduire à l'aide d'un circuit équivalent. On a alors :

$$\rho_{ap} = \frac{\rho^{\uparrow} + \rho^{\downarrow}}{2} \quad (II.1)$$



**Figure II.4 :** Mécanisme de conduction dans une structure multicouche périodique, et circuit équivalent en configuration magnétique parallèle.

En configuration parallèle, un des deux canaux d'électrons subit un nombre d'événements de diffusion beaucoup plus élevée. Les résistivités globales des deux canaux ne sont donc plus égales. La résistivité globale de la structure est alors

$$\rho_p = 2 \frac{\rho^{\uparrow} \rho^{\downarrow}}{\rho^{\uparrow} + \rho^{\downarrow}} \quad (II.2)$$

On montre alors que la résistivité en configuration parallèle  $\rho_p$  est inférieure en configuration antiparallèle  $\rho_{ap}$ .

$$\rho_p < \rho_{ap} \quad R_{ap} > R_p \quad (II.3)$$

$$\rho_{ap} = \frac{\rho^{\uparrow} + \rho^{\downarrow}}{2} \quad \Rightarrow \quad R_a = \frac{R^{\uparrow} + R^{\downarrow}}{2} \quad (II.4)$$

$$\rho_p = 2 \frac{\rho^{\uparrow} \rho^{\downarrow}}{\rho^{\uparrow} + \rho^{\downarrow}} R_p = 2 \frac{R^{\uparrow} R^{\downarrow}}{R^{\uparrow} + R^{\downarrow}} \quad \Rightarrow \quad (II.5)$$

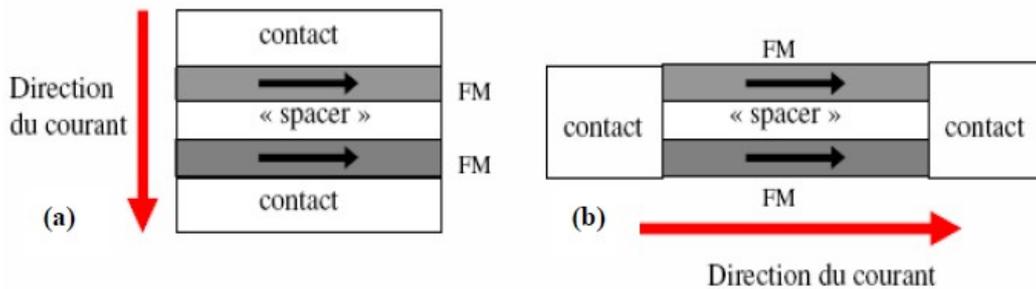
La variation normalisée de résistance, c'est-à-dire la magnétorésistance, s'écrit alors :

$$GMR = \frac{\Delta R}{R_{AP}} = \frac{R_{AP} - R_p}{R_{AP}} \quad (II.6)$$

On voit donc plus les situations  $\uparrow$  et  $\downarrow$  sont différentes, plus l'effet GMR est visible et mieux il pourra être exploité.

- **II.3.3 Description phénoménologique de l'effet GMR : modèle à deux courants :**

Deux types de configurations peuvent être utilisées afin d'étudier l'effet GMR, elles sont schématisées dans la figure (II.5):



**Figure II.5 :** Schématisation des deux configurations de mesure. En gris sont représentées les couches ferromagnétique (FM) et en blanc les couches métalliques non magnétique.

La première configuration (Figure II.5.a) correspond au cas où le courant traverse la structure perpendiculairement au plan des couches. Cette configuration est appelée « Current Perpendicular to Plane » (CPP). La seconde, (Figure II.5.b), correspond quant à elle à un courant traversant la structure parallèlement au plan des couches. Cette configuration est appelée « Current In Plane » (CIP).

Expérimentalement, cette dernière est plus facile à obtenir avec les techniques de lithographie usuelles. Cependant, en configuration CPP, l'amplitude de l'effet est plus importante.

Les phénomènes physiques régissant l'effet GMR, dans l'une ou l'autre des deux configurations, reposent globalement sur les mêmes principes.

Tous les modèles décrivant l'effet GMR ont pour « briques » élémentaires les

Hypothèses de travail suivantes :

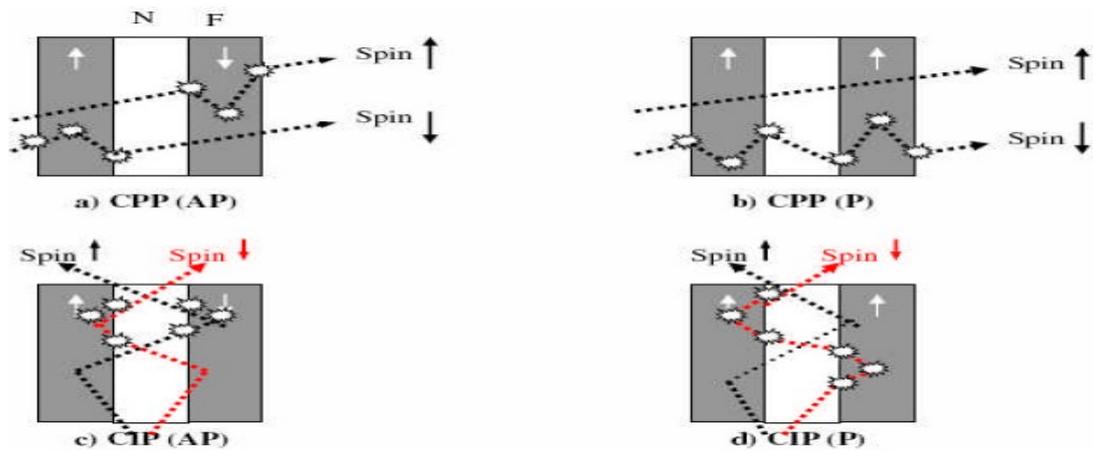
- La première correspond au « modèle à deux courants » décrit par Mott en 1936 [18]. Celui-ci repose sur le fait que dans la majorité des processus de collisions, élastiques et inélastiques, que subissent les électrons dans un métal, l'information de spin est conservée. Ainsi, si l'on néglige les processus susceptibles de « retourner » le spin d'un électron, on peut considérer que dans un métal le courant est porté par deux types de porteurs indépendants, les électrons ayant un spin « up » et les électrons ayant un spin « down » suivant les aimantations, qui se comportent en première approximation comme deux circuits en parallèle. Ceci pousse à considérer une longueur sur laquelle le spin de l'électron est conservé. Cette distance, appelée la longueur de diffusion de spin, sera notée  $\lambda_{sd}$ . Cette longueur est de l'ordre de quelques dizaines de nm dans les métaux et est plus grande que le libre parcours moyen des électrons. Elle constitue le paramètre pertinent dans le transport CPP.

- La seconde correspond à la prise en compte de la différence de probabilité de diffusion de chaque type de porteur dans un métal ferromagnétique. En effet, la probabilité de diffusion d'un électron est directement proportionnelle au nombre d'états disponibles autour du niveau de Fermi (dans une gamme énergétique de l'ordre de kT). Or on connaît que cette densité d'état

est dissymétrique pour les spins up et pour les spins down. Ceci implique une différence des libres parcours moyens, et par conséquent des conductivités, pour chaque type de porteur (le libre parcours moyen étant inversement proportionnel au taux de diffusion).

- Enfin la dernière hypothèse repose sur le fait que lorsqu'un courant traverse une interface entre un métal ferromagnétique et un métal normal, un déséquilibre des populations de spin est créé dans les deux métaux. Ceci provient du fait que les nombres d'électrons de spin up et down sont différents dans les métaux ferromagnétiques et égaux dans les métaux normaux. Le système doit donc passer d'un état de déséquilibre de spin vers un état d'équilibre de spin, ce qui induit l'apparition d'une zone de transition dans laquelle l'asymétrie de spin décroît progressivement [19 ,20].

Pour expliquer qualitativement l'effet GMR, il nous faut expliquer la différence de résistance globale du système lorsque les couches sont alignées parallèlement et antiparallèlement. Il nous faut également expliquer les différences expérimentales observées entre configuration CIP et CPP telles que l'amplitude de l'effet. Nous allons désormais donner une vision simple de l'effet GMR basée sur le modèle du « réseau de résistance » [21]. Ce modèle permet de comprendre de manière intuitive les mécanismes sous-jacents à l'effet GMR. Commençons par représenter le parcours des électrons dans les différentes configurations de mesure (figure II.6).

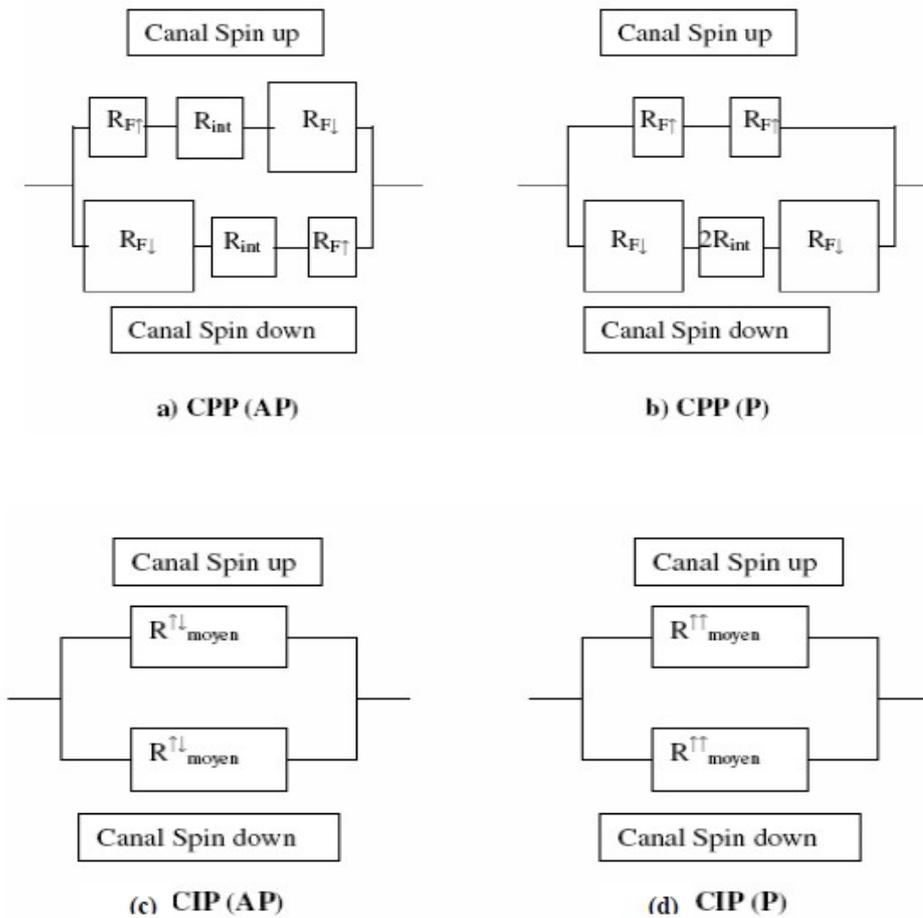


**Figure II.6 :** Modélisation du parcours de chaque type de porteur en configuration CPP et CIP (c,d).

La figure suivante explique la Modélisation du parcours de chaque type de porteur en configuration CPP et CIP (c,d). Les termes Pet AP correspondent à des aimantations Parallèles et Anti parallèles. Les processus de collisions dépendants du spin sont représentés par des étoiles.

L'effet GMR s'explique, quelle que soit la configuration de mesure, par le taux de diffusion subi par chaque type de porteur sur son parcours. Nous allons montrer que ce taux est dépendant de l'orientation de la projection de spin de l'électron sur l'aimantation locale.

Dans la figure (II.6), nous avons représenté par des étoiles les processus de diffusion dépendant du spin. Il en existe différents types que nous allons détailler par la suite. Pour expliquer qualitativement les différences de résistivité entre les configurations parallèles et antiparallèles, représentons le parcours de chaque porteur par un modèle de résistance.



**Figure II.7 :** Modèle résistif du parcours de chaque type de porteur dans les mêmes configurations que la figure (II.6)

La figure montre un Modèle résistif du parcours de chaque type de porteur dans les mêmes configurations que la figure (II.6). (La dénomination F est pour les couches Ferromagnétiques et  $R_{int}$  est pour la résistance à l'interface entre le ferromagnétique et le métal normal).

Nous allons décrire ce qui se passe en configuration CPP. La question à laquelle nous devons répondre est comment construire ce réseau de résistances, c'est à dire quelles sont les valeurs des résistances pour chaque canal, et quels sont les effets physiques mis en jeu.

### **II.3.3.1 Cas du transport en CPP :**

Pour obtenir un effet GMR, il faut que les deux canaux de spin restent indépendants l'un de l'autre sur toute la longueur du parcours des électrons afin de répondre au critère de Mott.

On peut comprendre cette nécessité très simplement. Considérons que chaque couche ferromagnétique agisse comme un filtre pour les électrons de spin down. nous entendons qu'un électron de spin down ne puisse pénétrer une couche ferromagnétique. Lorsque les deux couches ferromagnétiques sont alignées parallèlement, les électrons de spin up traversent toute la multicouche et « aucun » électron de spin down ne la traverse. Dans le cas où les deux couches sont alignées antiparallèlement, aucun des deux types de porteur « ne sortira » de la structure. Ainsi, on comprend que la résistivité du multicouche est différente en configurations parallèle et antiparallèle.

Considérons à présent le cas pour lequel nous permettons à une partie des électrons de spin up de changer leur direction avant d'arriver à la deuxième couche. On comprend de manière évidente que moins d'électrons traverseront la structure lorsque les aimantations seront parallèles et que désormais une partie des électrons pourront quand même la traverser lorsque les aimantations seront alignées antiparallèlement.

Bien que ce modèle soit très approximatif, il nous permet de comprendre qu'il est absolument nécessaire que la longueur de diffusion de spin soit plus grande que l'épaisseur de la structure dans le cas d'une mesure en CPP et que l'amplitude de l'effet GMR sera décroissante pour des couches (ferromagnétiques ou non) de plus en plus épaisses, ce qui est vérifié expérimentalement [21].

La différence des densités d'états au niveau de Fermi permet de définir un coefficient phénoménologique. Appelé « BulkScatteringAsymmetry » qui rend compte de la différence des résistivités pour les spins up et down dans chaque couche :

$$\beta = \frac{\rho_{F\uparrow} - \rho_{F\downarrow}}{\rho_{F\uparrow} + \rho_{F\downarrow}} \quad (II.7)$$

B : est le coefficient phénoménologique.

Où  $\rho_{F\uparrow}$  et  $\rho_{F\downarrow}$  correspondent aux résistivités des porteurs de spin up et down respectivement dans la couche ferromagnétique. Les résistances correspondantes dans la figure (II.7) peuvent ainsi être définies de la façon suivante :

$$R_{F\downarrow} = \frac{\rho_{F\downarrow} \times M}{S} = \frac{2 \times M}{S} \times \frac{\rho_{FM}}{1 - \beta} \quad (II.8)$$

$$R_{F\uparrow} = \frac{\rho_{F\uparrow} \times M}{S} = \frac{2 \times M}{S} \times \frac{\rho_{FM}}{1 + \beta} \quad (II.9)$$

Dans les équations (II.8) et (II.9), nous avons défini la résistivité de la couche

Ferromagnétique  $\rho_{FM}$  donnée par :

$$\rho_{FM} = \frac{1}{\rho_{F\uparrow}} + \frac{1}{\rho_{F\downarrow}} \quad (II.10)$$

Ainsi que le nombre de plans atomiques M, et la surface du métal ferromagnétique S. Notons que le signe de  $\beta$  dépend du matériau étudié, par exemple, dans le cas du cobalt  $\beta$  est positif alors qu'il est négatif dans le cas du fer.

Il existe un autre type de diffusion dépendant du spin correspondant aux diffusions aux interfaces. Elle est représentée par le terme  $R_{int}$  sur la figure (II.7). Cette diffusion a plusieurs origines :

- Le désaccord entre les bandes énergétiques du métal ferromagnétique et du métal normal suivant la direction de spin de l'électron.

- Les atomes magnétiques qui ont diffusé vers le métal non magnétique lors de la synthèse des matériaux. Notons que ces atomes peuvent aussi amener des processus de spin, ce qui est au détriment de l'effet GMR.

Dans le premier cas, des calculs de structures de bandes permettent de définir les potentiels de diffusion dépendants du spin à l'interface. En revanche, la contribution due aux atomes magnétiques dans le métal normal est plus difficile à quantifier. Elle dépend de la rugosité de surface et des processus de croissance des couches. Ainsi, de la même façon que l'on a défini  $\beta$ , on est amené à définir un coefficient phénoménologique de diffusion d'interface  $\gamma$  « InterfacialScatteringAsymmetry »

$$\gamma = \frac{\rho_{\uparrow}^{interface} - \rho_{\downarrow}^{interface}}{\rho_{\uparrow}^{interface} + \rho_{\downarrow}^{interface}} \quad (II.11)$$

On peut ainsi définir les résistances d'interfaces pour chaque type de porteur sous la forme suivante :

$$R_{\uparrow}^{interface} = S \times \rho_{\uparrow}^{interface} = 2 \times S \times \frac{\rho_{F-N}}{1+\gamma} \quad (II.12)$$

$$\rho_{F-N} = \frac{1}{\rho_{\uparrow}^{interface}} + \frac{1}{\rho_{\downarrow}^{interface}} \quad (II.13)$$

$\rho_{F-N}$  Étant la résistivité totale de l'interface entre le métal ferromagnétique et le métal normal.

Dans le cas du transport CPP, si l'on ne considère que la vitesse de dérive due au champ électrique appliqué, chaque type de porteur traverse les couches les unes après les autres.

Ainsi, chaque couche et chaque interface agissent comme des résistances en série.

Ceci permet de calculer la résistance totale du système en fonction des différentes configurations des aimantations :

$$\frac{1}{R_{\uparrow\uparrow}^{total}} = \left(\frac{1}{R_{\uparrow}}\right)_{\uparrow\uparrow} + \left(\frac{1}{R_{\downarrow}}\right)_{\uparrow\uparrow} \quad (II.14)$$

$$\frac{1}{R_{\uparrow\downarrow}^{total}} = \left(\frac{1}{R_{\uparrow}}\right)_{\uparrow\downarrow} + \left(\frac{1}{R_{\downarrow}}\right)_{\uparrow\downarrow} \quad (II.15)$$

$$\left(\frac{1}{R_{\uparrow}}\right)_{\uparrow\uparrow} = \frac{1}{2R_{F\uparrow} + R_{spacer} + 2R_{\uparrow}^{interface}} \quad (II.16)$$

$$\left(\frac{1}{R_{\downarrow}}\right)_{\uparrow\uparrow} = \frac{1}{2R_{F\downarrow} + R_{spacer} + 2R_{\downarrow}^{interface}} \quad (II.17)$$

$$\left(\frac{1}{R_{\uparrow}}\right)_{\uparrow\downarrow} = \frac{1}{R_{F\uparrow} + R_{spacer} + R_{F\downarrow} + R_{\uparrow}^{interface} + R_{\downarrow}^{interface}} \quad (II.18)$$

$$\left(\frac{1}{R_{\downarrow}}\right)_{\uparrow\downarrow} = \frac{1}{R_{F\uparrow} + R_{spacer} + R_{F\downarrow} + R_{\uparrow}^{interface} + R_{\downarrow}^{interface}} \quad (II.19)$$

$R_{spacer}$  est la résistance de la couche de métal normal.

A partir de ces équations, il est possible d'évaluer le ratio  $\frac{R_{\uparrow\downarrow} - R_{\uparrow\uparrow}}{R_{\uparrow\downarrow}} = \frac{R_{ap} - R_p}{R_{ap}} \times N$

Notons qu'une mesure en configuration CPP permet de mesurer  $\gamma$  et  $\beta$  [22]

### II.3.3.2 Cas du transport en CIP :

Dans le cas d'une mesure en configuration CIP, la situation est quelque peu plus compliquée. En effet, ici les électrons se déplacent au travers de toutes les couches de manière aléatoire en fonction des processus de diffusions subis dans chaque couche (voir figure II.7 c et d). Ainsi, deux cas sont à considérer :

Le premier correspond au cas où le libre parcours moyen des électrons dans chaque couche est plus petit que l'épaisseur de la couche. On peut alors considérer que les électrons se répartissent équitablement dans chaque couche et que les électrons présents dans une couche n'atteignent pas les autres. Ainsi, la résistance de chaque canal sera calculée en mettant en parallèle les résistances de chaque couche :

$$\left(\frac{1}{R_{\uparrow\uparrow}}\right) = \frac{2}{R_{F\uparrow}} + \frac{1}{R_{spacer}} \quad (\text{II.20})$$

$$\left(\frac{1}{R_{\downarrow\uparrow}}\right) = \frac{2}{R_{F\downarrow}} + \frac{1}{R_{spacer}} \quad (\text{II.21})$$

$$\left(\frac{1}{R_{\uparrow\downarrow}}\right) = \frac{1}{R_{F\uparrow}} + \frac{1}{R_{spacer}} + \frac{1}{R_{F\downarrow}} \quad (\text{II.22})$$

$$\left(\frac{1}{R_{\downarrow\downarrow}}\right) = \frac{1}{R_{F\downarrow}} + \frac{1}{R_{spacer}} + \frac{1}{R_{F\uparrow}} \quad (\text{II.23})$$

Dans les configurations parallèle (équations 20 et 21) et antiparallèle (équations 22 et 23) respectivement. En injectant ces deux équations dans l'équation 14 et 15 respectivement, on constate qu'il n'y a pas de différence de résistance totale entre les configurations parallèle et antiparallèle, c'est-à-dire pas d'effet GMR.

$$\left(\frac{1}{R_{\uparrow}}\right)_{\uparrow\uparrow} = \frac{(2M+N+2I)^2}{2MR_{F\uparrow}+NR_{spacer}+2IR_{\uparrow}^{interface}} \quad (II.24)$$

$$\left(\frac{1}{R_{\downarrow}}\right)_{\uparrow\uparrow} = \frac{(2M+N+2I)^2}{2MR_{F\downarrow}+NR_{spacer}+2IR_{\downarrow}^{interface}} \quad (II.25)$$

$$\left(\frac{1}{R_{\uparrow}}\right)_{\uparrow\downarrow} = \frac{(2M+N+2I)^2}{MR_{F\uparrow}+NR_{spacer}+IR_{\uparrow}^{interface}+MR_{F\downarrow}+IR_{\downarrow}^{interface}} \quad (II.26)$$

$$\left(\frac{1}{R_{\downarrow}}\right)_{\uparrow\downarrow} = \frac{(2M+N+2I)^2}{MR_{F\downarrow}+NR_{spacer}+IR_{\downarrow}^{interface}+MR_{F\uparrow}+IR_{\uparrow}^{interface}} \quad (II.27)$$

$M$  est le nombre de couches atomiques du métal ferromagnétique,  $N$  est le nombre de couches atomiques du métal normal,  $I$  est le nombre de plans atomiques correspondant à l'interface ferromagnétique/normal.

Ces équations traduisent le fait que la résistance de chaque canal fait intervenir la moyenne des différents processus de diffusions que subissent les électrons sur l'ensemble de leur parcours. De par la valeur de la résistance totale du système donnée par les équations (14) et (15), on voit aisément la différence entre les cas où les aimantations sont parallèles ou antiparallèles. Nous pouvons exprimer la GMR en configuration CIP dans le cas où  $\gamma = 0$  :

$$GMR = \frac{\Delta R}{R_{ap}} = \frac{R_{ap}-R_p}{R_{ap}} = \frac{R_{\uparrow\downarrow}-R_{\uparrow\uparrow}}{R_{\uparrow\downarrow}} = \frac{(1-\beta)^2}{4\left(1+\frac{N\rho_{spacer}}{M\rho_{F\uparrow}}\right)\left(\beta+\frac{N\rho_{spacer}}{M\rho_{F\uparrow}}\right)} \quad (II.28)$$

Notons que cette expression, ne rend pas compte de certains phénomènes observés expérimentalement [22] tels que la décroissance de l'amplitude de l'effet GMR lorsque les couches ferromagnétiques deviennent de plus en plus épaisses. Pour mettre en évidence ce dernier, il faut tenir compte de la diffusion aux interfaces.

Nous venons de montrer que dans le cas du transport en configuration CIP le paramètre pertinent est le libre parcours moyen des électrons et non la longueur de diffusion de spin comme dans le cas CPP. Ce libre parcours moyen est de l'ordre de la dizaine de nanomètres dans les métaux usuels (ex : le libre parcours moyen est de 10 à 30 nm pour le cuivre à 300°K)[21].

Le modèle de résistance présenté ci-dessus permet d'expliquer de manière qualitative les résultats expérimentaux obtenus [22]. Pour cela, nous avons introduit les paramètres  $\beta$  et  $\gamma$  comme des paramètres phénoménologiques permettant de rendre compte des propriétés physiques des couches ferromagnétiques et des interfaces. Cependant, il est possible de donner une description plus quantitative de l'effet GMR basée sur un modèle microscopique prenant en compte les structures de bandes réelles des matériaux présents. Ceci permet de tenir compte de tous les effets mentionnés ci-dessus et de faire apparaître les coefficients phénoménologiques  $\gamma$  et  $\beta$ .

#### **II.4 Magnétorésistance Tunnel (TMR):**

La structure utilisée est celle d'une couche isolante comprise entre deux Ferromagnétiques. Contrairement à l'aimantation de la première couche, la seconde n'est pas imposée. L'aimantation dans la première couche est prédéfinie et un champ externe permet de changer facilement la direction de l'aimantation de la seconde couche. Quand le courant traverse la première couche ferromagnétique, seuls les électrons dont le spin est orienté dans la direction de l'aimantation peuvent passer. Il en résulte un courant polarisé en spin, où tous les spins des électrons ont le même sens. Deux cas sont alors à considérer : si la seconde couche possède une aimantation dans le même sens que la première, alors les électrons traversent l'isolant par effet tunnel quantique (figure 12.a). Dans le cas contraire, le courant tunnel est

bloqué (figure 12.b). Quelques électrons pourtant parviennent à traverser la barrière, l'effet tunnel est réduit : le courant qui circule est faible.

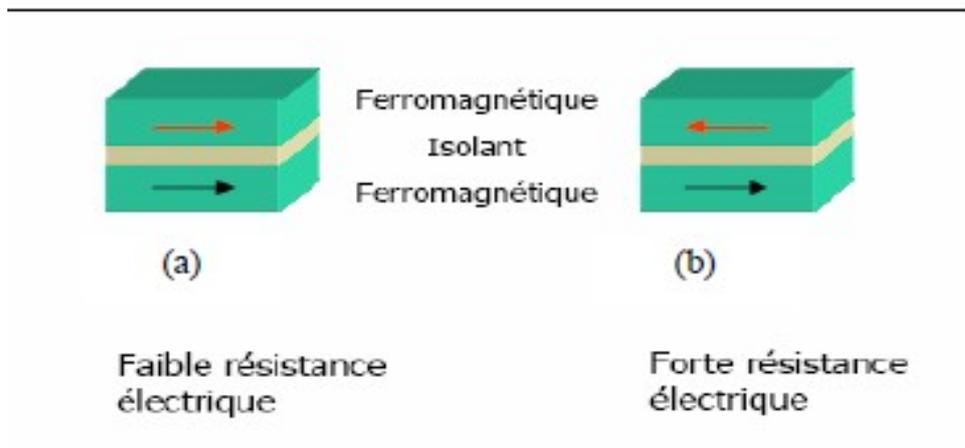


Figure II.12 : états parallèle et antiparallèle, dans une jonction tunnel magnétique.

### Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons exposé les quatre fondements de la spintronique à savoir la asymétrie de spin des porteurs, approximation de Mott, diffusion dépendant du spin et accumulation de spin. Ensuite, nous avons détaillé le principe de fonctionnement de l'effet GMR dans les deux configurations Current Perpendicular to Plane (CPP) et Current In Plane, ainsi que la magnéto-résistance à effet tunnel (TMR).

## **Chapitre3**

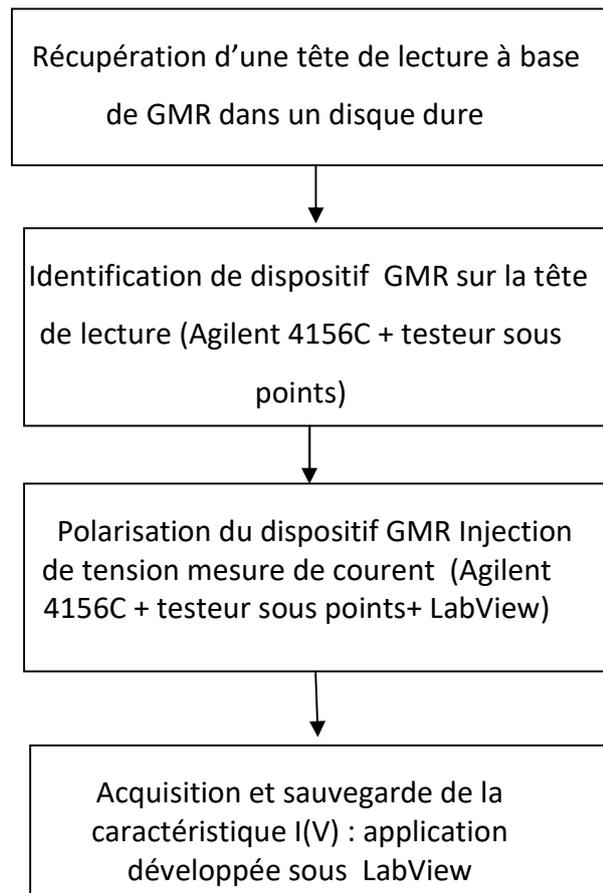
# **LA CARACTERISATION DE LA TÊTE DE LECTURE ET L'INTERPRETATION**

### **III .1Introduction :**

Ce chapitre a pour but d'expliquer l'expérience que nous avons effectuée pour caractériser une tête de lecture à base de GMR. Pour cela nous allons présenter dans un premier temps les différents appareillages utilisés dans cette réalisation, une deuxième étape consiste à présenter l'expérience elle-même on terminera par une interprétation.

### III.2 Présentation de l'appareillage de la salle de caractérisation :

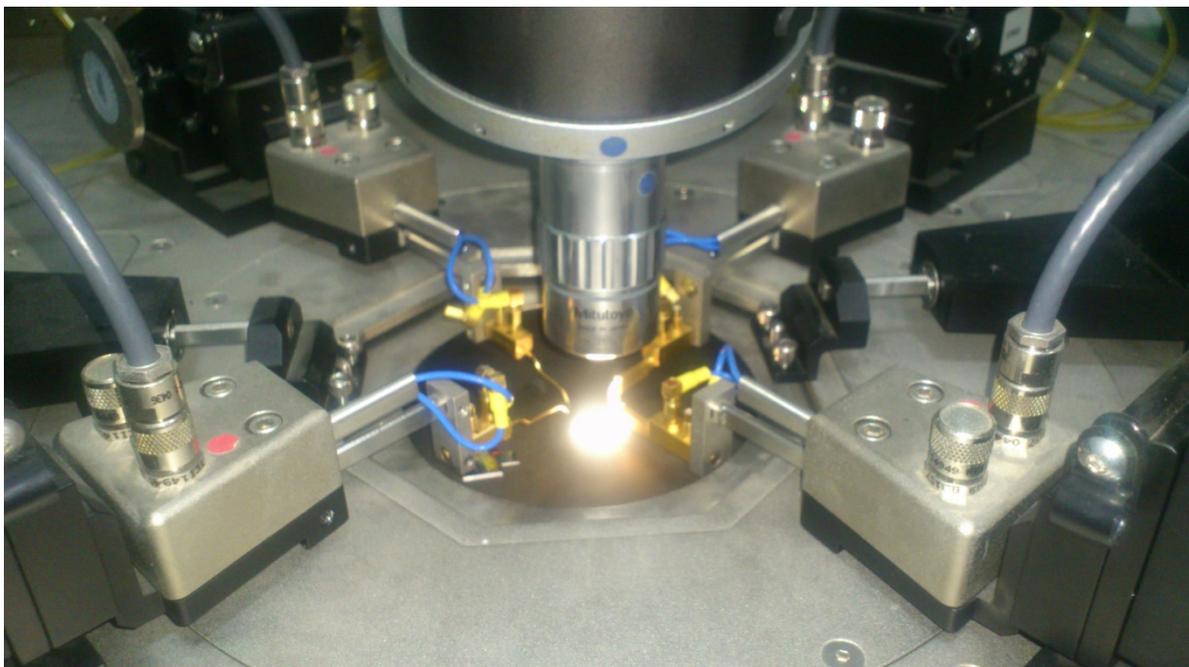
Notre travail consiste à effectuer un certain nombre de manipulations expérimentales pour caractériser une tête de lecture d'un disque dur. L'organigramme de la figure qui résume les différentes étapes. L'appareillage utilisé dans ce travail sont : un analyseur des paramètres à semi-conducteurs (Agilent 4156C) , testeur sous points (cascade), logiciel LabView et un disque dur.



**Figure III.1** Etapes d'expérimentation pour caractérisation la tête de lecture d'un disque dur.

- **III.2.1 Présentation du Test sous pointes :**

Testeur sous pointes ou Cascade Microtech RF, C'est un appareil qui est constitué des aiguilles triaxiales et un microscope optique. Cascade Microtech RF est piloté par un PC. Cette station est généralement, utilisée pour les caractérisations électriques du dispositif électronique (semi-conducteur) directement sur wafer ou dispositifs non encapsulés.



**Figure III.2 :** Testeur sous pointe ou CascadeMicrotech automatique

### • III.3.2 Présentation Agilent 4156C

L'Agilent 4156C, illustré dans les figures (III.3) et (III.4), est une solution pour plusieurs domaines d'analyse des paramètres des semi-conducteurs. Il est considéré comme étant six instruments embarqués dans le même boîtier.

- Analyseur de paramètres à semi-conducteur : caractérisation DC de dispositifs
  - Générateur d'impulsion : stress sur les dispositifs pour les tests de fiabilité
- Alimentation : préservation des états logiques et des conditions de polarisation
- Compteur : prolongation de la période d'échantillonnage pour le test de fiabilité
- Traceur de courbe : caractérisation des dispositifs en temps réel
- Contrôleur : mesure personnalisée et analyse

Le 4156C est ciblé par les technologies à base de semi-conducteurs avancées. Sa résolution de courant plus élevée (1fA), sa précision améliorée, et ses connexions Kelvin.

Les fonctionnalités du 4156C peuvent être facilement élargies en lui connectant d'autres instruments notamment lorsqu'il est utilisé avec le 41501 SMU (Source Measure Unit) et le générateur d'impulsion (Pulse Generator Expander). L'Expander a une masse (Ground Unit GNDU) et accepte deux canaux d'unité générateurs d'impulsions (Pulse Generator Unit PGU) et deux canaux SMU moyenne puissance (MeansPower SMU) ou une SMU haute puissance (High Power SMU).

Les avantages majeurs du 4156C sont :

- Faible courant : deux gammes de courant faible supplémentaires donnent une résolution de 1fA et une précision de 20fA.

- Faible résistance : une connexion Kelvin est ajoutée pour éliminer l'erreur de la résistance plomb.

Le HPSMU a été spécialement conçu pour les dispositifs à base de semi-conducteurs. Il est utilisé pour sa haute capacité tension/courant.

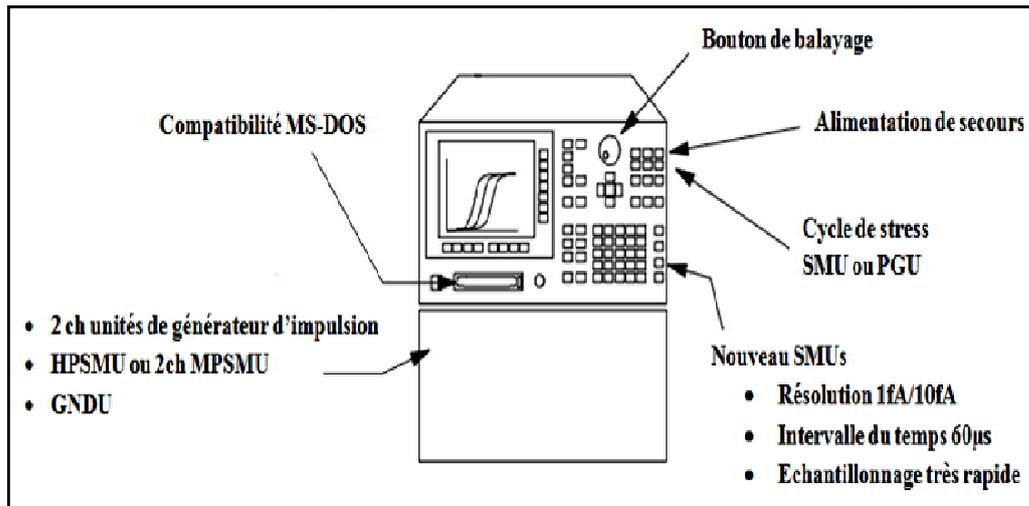
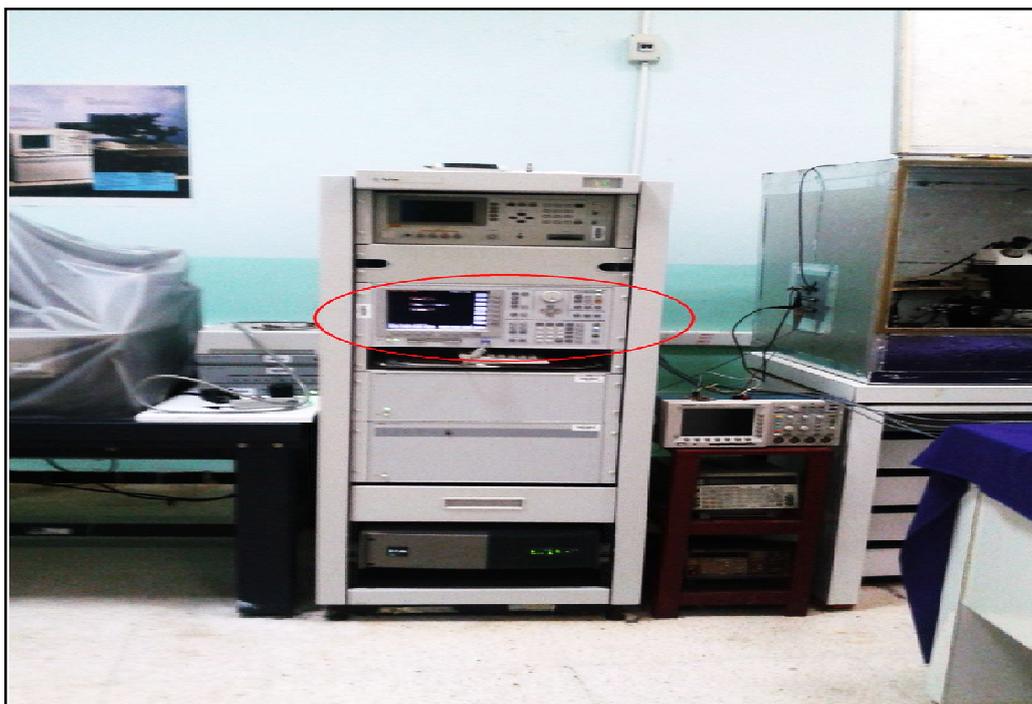


Figure III.3 : Schéma de l'analyseur des paramètres semi-conducteur Agilent 4156C



**Figure III. 4:** photo réel de l'analyseur des paramètres à semi-conducteur Agilent 4156C

### III.3 Présentation de l'expérience de caractérisation :

Dans la suite de ce mémoire les étapes de caractérisation de l'effet GMR, d'une tête de lecture d'un disque dur commercial, rapportées dans organigramme de la figure III.1

- **III. 3 .1Récupération d'une tête de lecture à base de GMR :**

Pour disposer d'une tête de lecture base sur l'effet GMR, nous avons over un disque dur de un qui contient double tête de lecture. Les figure montrent, respectivement , l'ouverture de digue dure et le support des tête de lecture.



**Figure III.5** l'ouverture d'un disque dur Récupération sa tête de lecture

- **Tête de lecture**

La tête de lecture récupérée est montrée dans la figure. Cette tête de lecture est de forme rectangulaire avec les dimensions suivantes : largeur :2mm, longueur :1mm et épaisseur :500 $\mu$ m. La tete présente quatre contacts ( bronche) deux pour la bobine d'écriture

et les deux autres pour la lecture ( dispositifs GMR). Les contacts de dispositif GMR doivent être identifiés pour permettre la caractérisation de l'effet GMR.



Figure III.6.b tête de lecture récupérée sous un microscope optique

- **III. 3 .2 Identification de dispositif GMR sur la tête de lecture**

Pour mettre en évidence la borne (contacte) du dispositif GMR. Nous avons disposé deux points de testeur sur les contacts du dispositif GMR, voir la figure III.7. Pour chaque dépôt de points (sur les deux contacts choisis) un champ magnétique est appliqué via un aimant permanent, dans le but de vérifier la modification de la résistance avec le champ magnétique.

Alors, les contacts qui présentent une variation de la résistance avec l'application de champ magnétique, correspondent au dispositif GMR (bien entendu les autres correspondent à ceux de la bobine d'écriture).



- **III.3.3 Polarisation du dispositif GMR**

Un fois que les contacts du dispositif GMR sont identifié. Les Points de testeurs sont branchées sur deux SMU de l'Agilent 4156C, l'un est configuré comme une masse et l'autre en mode I (application d'une tension et mesurer d'un courant). Notons que l'application d'une tension et la mesure de courant peuvent être effectués par un seul SMU. L'Agilent 4156C est contrôlé par une application développée sous LabView via une interface GPIB (*General Purpose Interface Bus*). Pour obtenir l'effet GMR nous avons mesuré la caractéristique courant-tension  $I(V)$  avec et sans l'application de champ magnétique. La figure montre un schéma illustratif du montage utilisé pour la mesure de l'effet GMR d'une tête de lecture d'un disque dur

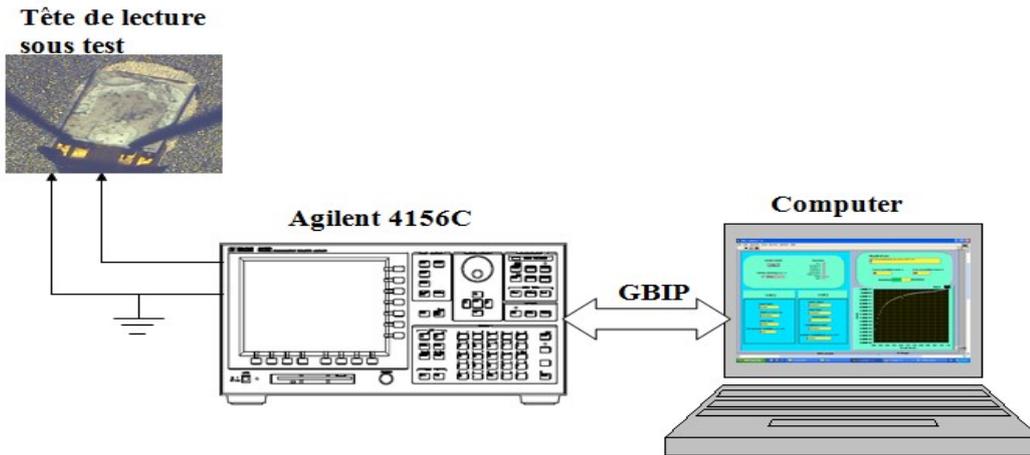


Figure III.8 Illustration de l'expérimentation utilisée pour la mesure de l'effet GMR d'une tête de lecture d'un disque dur.

### • III.2.3 Acquisition et sauvegarde de la caractéristique I(V)

La caractéristique I(V) est obtenue automatiquement par une application développée sous labView. Cette dernière permet le contrôle et la configuration de l'Agilent 4156C, ainsi qu'elle permet de sauvegarder les données de la caractéristique I(V). Par la suite les données sont tracées à l'aide de logiciel Origin. La figure III.9 montre l'interface graphique de l'application développée sous LabVIEW.

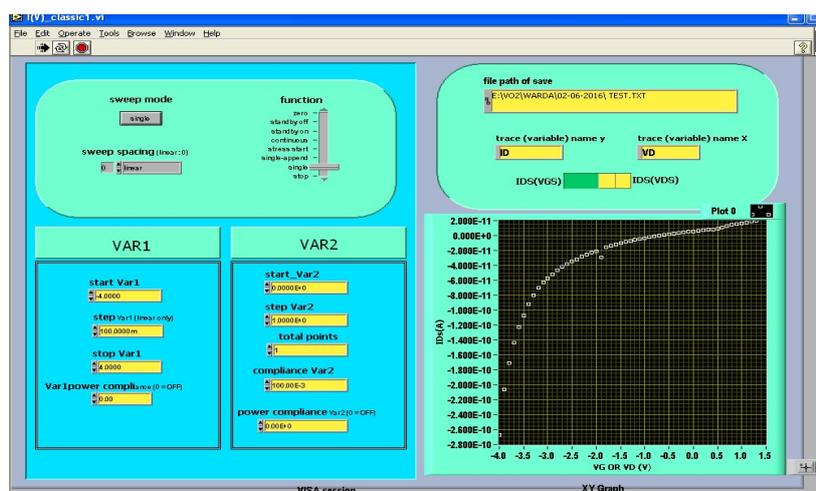


Figure III.9 Interface graphique de l'application de contrôle de l'Agilent 4156C, développée sous LabView

### III .4 Résultat obtenus

La figure montre la caractéristique I(V) obtenus sans application du champ magnétique pour la GMR d'une tête de lecture d'un disque dure. Des très faible courant ( $< 5 \cdot 10^{-11}A$ ) peuvent être constaté sur la figure III.10. Ces faibles courants montrent le caractère très résistif du dispositif GMR sans l'application de champ magnétique.

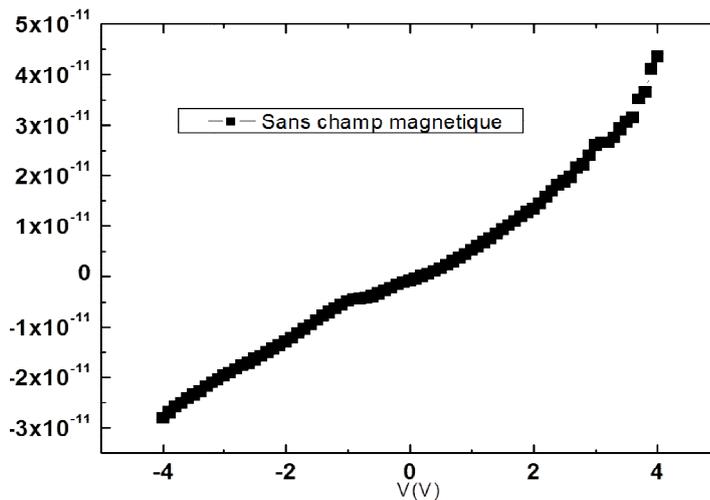


Figure III.10 : Caractérisation d'un capteur GMR sans champ magnétique.

Avec l'application du champ magnétique le courant mesuré augmente, voir figure III.11. le courant augmente, approximativement de quatre ordre de grandeur. Ce qui conduit à la diminution de la résistance GMR. En effet, la figure III .12 présente la résistance calculé à partir des caractéristique I(V) sans et avec l'application du champ magnétique. Il est nettement clair que la résistance diminue fortement avec l'application du champ magnétique (l'effet GMR).

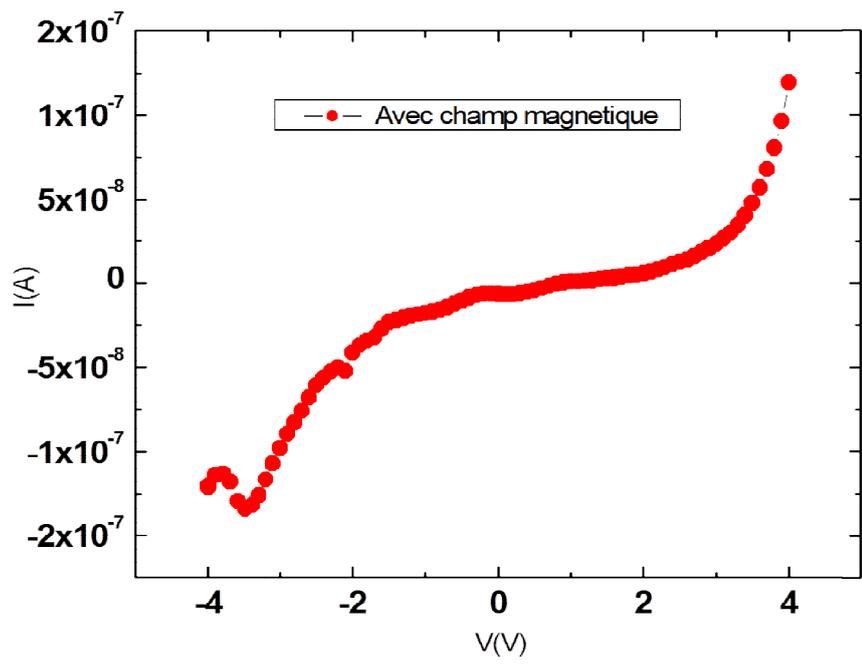


Figure III.11: Caracterisation d'un capteur GMR avec champ magnetique

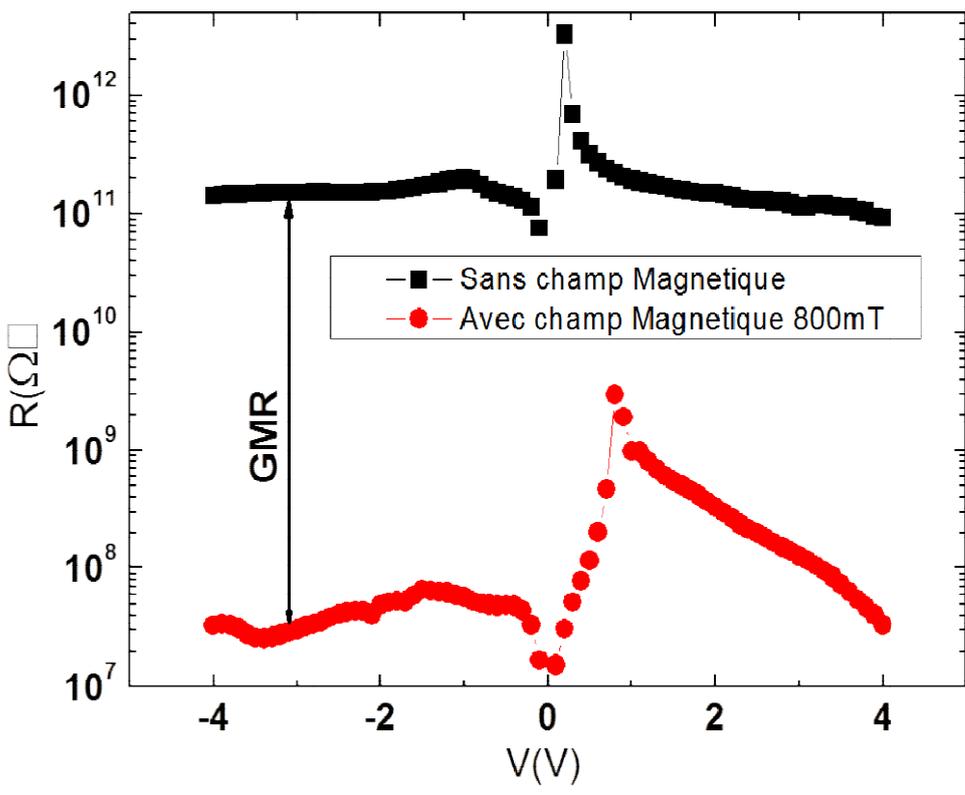


Figure III.12 : montre l'effet GMR

**Remarque** : ils très difficile d'interprété les allures des courbes figures (III.10,11 ,12) vu la complexités du dispositifs GMR et les phénomènes associes à l'effet GMR .

- **Conclusion**

Dans ce chapitre nous récupéré et caractériser l'effet GMR une tête de lecture d'un disque dure. Nous avons pu malgré la difficulté liés à la miniaturisation (fiable dimension lies à la tête de lecture) caractérise la résistance du dispositif GMR, contenant dans une tête de lecture d'un disque dure, en mettant en évidence son effet.

## Conclusion General

- familiarisé avec les dispositifs spintronique à savoir l'effet GMR.
- A savoir notre étude bien détaillée, nous avons pu mettre en évidence plusieurs mécanismes pour arriver à l'effet GMR.
- Une phase expérimentale de caractérisation de la GMR était nécessaire pour validé notre étude.
- Ce travail est approfondi en étudiant et caractérisant la courbe expérimentale courante tension obtenue.

## Références bibliographiques

- [1] Gordon E. Moore Electronics, Volume 38, Number 8, April 19, 1965.
- [2] G. E. Moore, "Progress in Digital Integrated Electronics." © 1975 IEEE. Reprinted, with permission, from Technical Digest 1975. International Electron Devices Meeting, IEEE, 1975, pp. 11-13.
- [3] O. Bonnaud, Lyon, 12 février 2014, Le réseau national de formation CNFM dans le contexte de la microélectronique vers la nanoélectronique.
- [4] Laurent Gouzènes, *Directeur du Plan et Programmes d'Etude STMicroelectronics*, "La micro et la nano-électronique" N o v e m b r e 2 0 0 5.
- [5] Disco, Cornelius; van der Meulen, Barend (1998). Getting new technologies together. New York: Walter de Gruyter. pp. 206–207. ISBN 3-11-015630-X. OCLC 39391108. Retrieved August 23, 2008.
- [6] Théo Cabaret. Étude, réalisation et caractérisation de memristors organiques électro-greffés en tant que nanosynapses de circuits neuro-inspirés. Autre [cond-mat.other]. Université Paris Sud- Paris XI, 2014. Français. <NNT : 2014PA112168>. <tel-01196515>.

[7] Kevin Vermast ; "Management de l'innovation. Miniaturisation des composants et évolution de la micro-informatique; © Laboratoire de Recherche sur l'Industrie et l'Innovation Université du Littoral Côte d'Opale, mars 2012.

[8] M. CLAUDE SAUNIER, Sénateur; RAPPORT sur sur l'évolution du secteur de la micro/nanoélectronique ; du 25 juin 2008.

[9] Robert Pezzani ,10èmes ENTRETIENS PHYSIQUE-INDUSTRIE," Composants semi-conducteurs de puissance La réduction des pertes conduit leur évolution" STMicroelectronics.

[10] <http://www.lemondeinformatique.fr/actualites/lire-ce-qu-il-faut-retenir-des-50-ans-de-la-loi-de-moore-60935.html>.

[11] <https://www.htc.com/fr/about/>

[12] <http://www.lefigaro.fr/sciences/2014/04/20/01008-20140420ARTFIG00169-les-puces-electroniques-flirtent-avec-leurs-limites.php>.

[13] <http://www.rtflash.fr/loi-moore-va-bientot-atteindre-ses-limites-spintronique-se-prepare-prendre-releve/article>.

[14] Article proposé par : *Claude Chappert, [claud.chappert@icf.u-psud.fr](mailto:claud.chappert@icf.u-psud.fr), Institut d'électronique fondamentale, CNRS/Université Paris-Sud Albert Fert, [albert.fert@thalesgroup.com](mailto:albert.fert@thalesgroup.com), Unité mixte de physique CNRS/Thales*

[15] Djelloul-Berkane Lalia Thèse de Magistère en Electronique Option : Nanotechnologie ,*Transport de spin dans les nanomatériaux : Application à la spintronique*soutenue à chlef le 17 /12/ 2008.

[16]<https://www.google.dz/search?q=%5Btransport+de+spin+dans+les+nanomat%C3%A9riaux%3A+application+aux+ordinateurs+quantiques%5D&oq=%5Btransport+de+spin+dans+les+nanomat%C3%A9riaux%3A+application+aux+ordinateurs+quantiques%5D&ags=chrome..69i57.1123i0j7&sourceid=chrome&ie=UTF-8>

[17] Kamil Fadel pour Science.gouv.fr novembre 2007 GMR Magnétorésistance Géante

[18] N. Mott, Proc. Roy. Soc. 156, 368, 1936

[19]:M. N. Baibich, J. M. Broto, A. Fert, F. N. Van Dau, F. Petroff, P. Eitenne, G. Creuzet, A. Friederich, and J. Chazelas. "Giant magnetoresistance of (001) Fe / (001) Cr magnetic superlattices." Phys. Rev. Lett. 61(21)(1988) 2472-2475.

[20]: Jhonson and R.H. Silsbee, Physical Review B, 35, 4959, 1987.

[20]: Von Son, H. Van Kempen, and P. Wyder, Physical Review Letters, 58 , 2271, 1987.

[21]: Spin Electronics, M. Ziese and M.J. Thornton, Springer ed., 2001.

[22]: Valet, A. Fert, Physical Review B, 48, 7099, 1993.

[23]:Sim-JAP-63 J.G. Simmons, « Generalized formula for the electric tunnel effect between similar electrodes separated by a thin insulating film », J. Appl, Phys., 34, p1793, (1963). [7]: Valet, A. Fert, Physical Review B, 48, 7099, 1993

# SOMMAIRE

---

Introduction Général.....	1
Introduction .....	4
I.1. Évolution de la microélectronique .....	4
I.1.1 A la poursuite de la miniaturisation.....	6
I.1.2 Loi de Moore -Limitation physique.....	9
• Une limite physique .....	11
• Une limite économique,.....	11
I.1.3 L'air de l'après silicium .....	11
I-2 Histoire de spin .....	12
I.3 définition de spin .....	13
I.5. Transport de spin : .....	14
I.6 Généralité sur la magnétorésistance .....	14
Conclusion .....	15
Chapitre2 .....	17
II.1 Introduction .....	18

II.2 Fondements de la spintronique :.....	18
II.2.1 Asymétrie de spin des porteurs du courant.....	18
II.2.2 Approximation de Mott [17] .....	19
II.2.3 Diffusion dépendant du spin : .....	19
II.2.4 Accumulation de spin : .....	19
II.3 Phénomènes de la spintronique.....	20
II.3.1 Définition de la magnétorésistance théoriquement : .....	20
• II.3.2 Définition la magnétorésistance expérimentalement(GMR) : .....	20
• II.3.3 Description phénoménologique de l'effet GMR : modèle à deux courants :.....	25
II.3.3.1 Cas du transport en CPP : .....	30
II.3.3.2 Cas du transport en CIP : .....	34
II.4 Magnétorésistance Tunnel (TMR): .....	36
Conclusion :.....	37
III .1 Introduction : .....	38
III.2 Présentation de l'appareillage de la salle de caractérisation :.....	39
• III.2.1 Test sous pointes :.....	39
• III.3.2Agilent 4156C.....	41
III.3 Présentation de l'expérience de caractérisation : .....	43
III. 3 .1 Récupération d'une tête de lecture à base de GMR : .....	43
Tête de lecture.....	43
III. 3 .2 Identification de dispositif GMR sur la tête de lecture .....	44

III.3.3 Polarisation du dispositif GMR .....	45
III.2.3 Acquisition et sauvegarde de la caractéristique I(V).....	46
III .4 Résultat obtenus .....	47
Conclusion .....	49
Conclusion General .....	50
Références bibliographies .....	51