



UNIVERSITE M'HAMED BOUGARA BOUMERDES
FACULTE DES SCIENCES – DEPARTEMENT DE PHYSIQUE
Option : InfoTronique (Master 1)
Module : Electronique Moléculaire

Chapitre 3

Effet Hall Quantique

Mme R.Soukhal Haroun

1- Effet classique

Avant d'aborder l'effet Hall quantique, il est utile de rappeler les ingrédients physiques de l'effet Hall "classique", découvert un siècle auparavant par Edwin Hall (1879). Pendant sa thèse de doctorat, E. Hall essayait de répondre à une question soulevée par Maxwell, de savoir si la résistance était affectée par le champ magnétique.

Il montre expérimentalement que sous champ magnétique un courant induit une tension dans la direction perpendiculaire et que ce courant est proportionnel au champ magnétique appliqué (figure 1). Ce phénomène ne sera compris que 50 ans plus tard par la théorie des bandes et la notion de trou.

La tension Hall apparaît sur les faces latérales du barreau, elle est proportionnelle à la vitesse de déplacement des porteurs de charge.

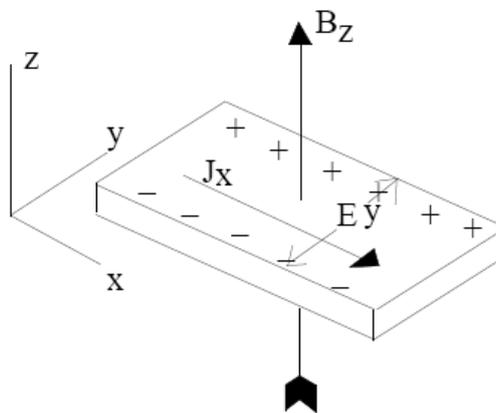


Figure 1 : Effet Hall classique

La physique classique de l'effet Hall

Le principe de l'effet Hall repose sur deux forces : **force magnétique de Lorentz** et **force électrique de Hall** dans un conducteur parcouru par un courant et soumis à un champ magnétique.

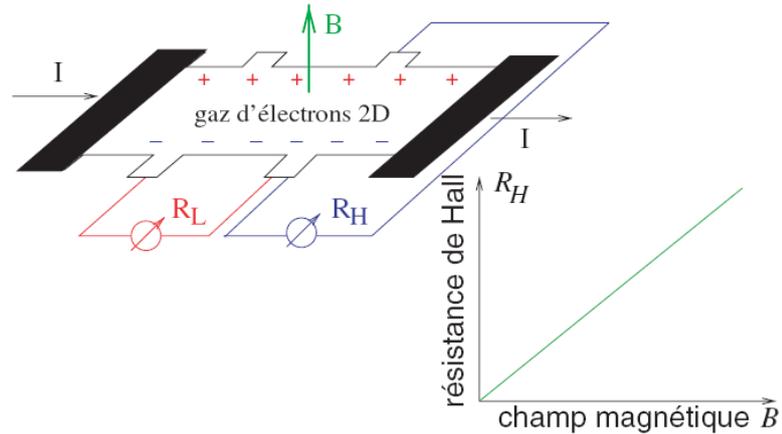
On sait qu'un champ magnétique agit sur les charges en mouvement. Le courant qui traverse le matériau conducteur est produit par des charges (les électrons libres) qui se déplacent avec une vitesse que l'on notera \vec{v} .

Ces électrons sont donc soumis à une force $\vec{F}_m = -e \cdot \vec{v} \wedge \vec{B}$, où $-e$ correspond à la charge d'un électron. Il en découle un déplacement d'électrons et une concentration de charges négatives sur l'un des côtés du matériau ainsi qu'un déficit de charges négatives du côté opposé. Cette distribution de charge donne naissance à la tension Hall V_{Hall} ainsi qu'à un champ électrique E_H .

Ce champ électrique est lui même responsable d'une force électrique qui agit sur les électrons : $\vec{F}_e = -e \cdot \vec{E}_H$. L'équilibre est atteint lorsque la somme des deux forces est nulle (deuxième loi de Newton). On peut alors écrire $\vec{E}_H = -\vec{v} \wedge \vec{B}$.

Resistance de Hall

Il s'agit simplement du ratio de la tension de Hall sur le courant circulant dans l'échantillon. Noter que la résistance de Hall varie linéairement avec le champ B (figure 2).



R_L : résistance longitudinale

R_H : résistance de Hall.

Figure 2 : Variation de la résistance de Hall en fonction de B

2- Effet hall quantique

En 1980, Klaus Von Klitzing, découvrit dans le cas de semi-conducteurs à très basse température plongés dans un champ magnétique intense que la résistance Hall R_H variait par paliers en liaison avec un multiple entier de h/e^2 , où e est la charge électrique élémentaire et h la constante de Planck (figure 3).

La résistance de Hall est donc quantifiée en unités de h/e^2 divisé par un entier. C'est ce qu'on appelle l'effet hall quantique (EHQ).

$$R_H = \frac{h}{n \cdot e^2}$$

où h est la constante de Planck et e la charge de l'électron et n est un entier naturel.

Ceci est appelé l'effet Hall quantique entier (EHQE). Klaus Von Klitzing a eu le prix Nobel en 1985 pour cette découverte.

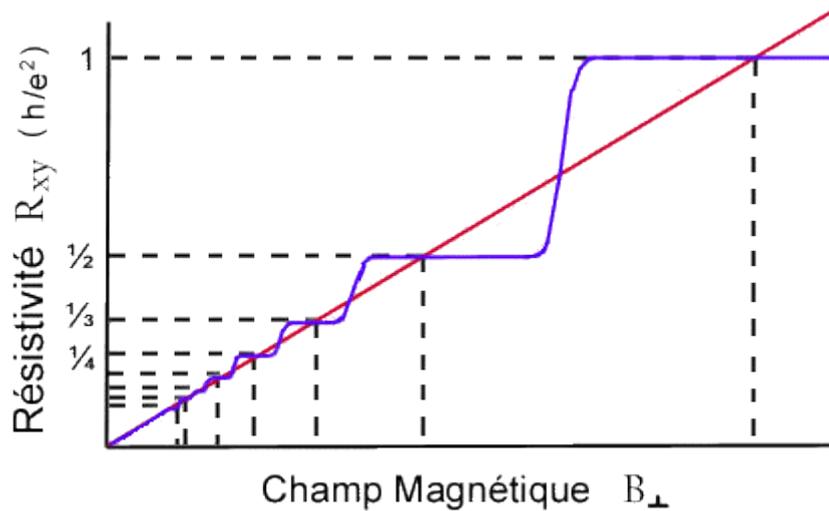


Figure 3 : Variation de la résistance de Hall en fonction de B pour EHQE

Cette découverte a eu d'importantes applications dans le développement des semi-conducteurs et en métrologie.

La constante R_K est appelée **constante de Von Klitzing**, elle est défini comme :

$$R_K = \frac{h}{e^2}$$

L'effet Hall quantique est maintenant utilisé pour déterminer l'étalon de résistance et le rapport h/e^2 constitue une nouvelle unité de résistance, le Klitzing

$$R_K = h/e^2 = 25812,807\Omega.$$

La compréhension de cet effet remarquable nécessite la description quantique de la dynamique des électrons en présence d'un champ magnétique.

Le *Comité international des poids et mesures* a recommandé aux laboratoires d'utiliser, à partir de 1990, par convention, la valeur $R_{K-90} = 25\,812,807\,\Omega$ pour exprimer leurs résultats.

On dispose donc d'une représentation de l'Ohm, stable et reproductible à 10^{-8} près, qui permet, par exemple, de suivre avec précision la dérive des résistances étalons.

3- Effet hall quantique fractionnaire

Pour des champs plus forts, on parle de l'effet Hall quantique fractionnaire (EHQF) (figure 4) au cas où n est fractionnaire (Des plateaux correspondent à $i=1/3$ et $i=2/3$, ...). Ce dernier fut découvert par Tsui, Störmer et Gossard peu après la première observation de l'EHQE. Cette quantification, mesurée à 10^{-9}

près, a permis la meilleure définition de la constante universelle h/e^2 , qui est désormais utilisée comme unité de la résistance.

La découverte de ces effets, qui a ouvert un nouveau domaine de recherche, autant théorique qu'expérimental, a été récompensée par deux Prix Nobel : en 1985, cette distinction fut attribuée à K.V. Klitzing pour la découverte de l'EHQE, et Tsui, Störmer et Gossard partagèrent ce prix en 1998 pour leurs travaux respectivement expérimentaux et théoriques sur l'EHQF.

Aujourd'hui, de nombreux autres plateaux fractionnaires ont été observés : $4/3$, $5/3$, $7/3$, $8/3$, $2/5$, $1/5$, etc, ce qui correspond à des nombres de la forme p/q , p et q étant des entiers, q impair. Les valeurs fractionnaires de ces plateaux sont extrêmement précises. Enfin, il faut savoir que les plateaux fractionnaires peuvent être vus, ou ne pas être vus, selon la température ou le degré d'impureté de l'échantillon.

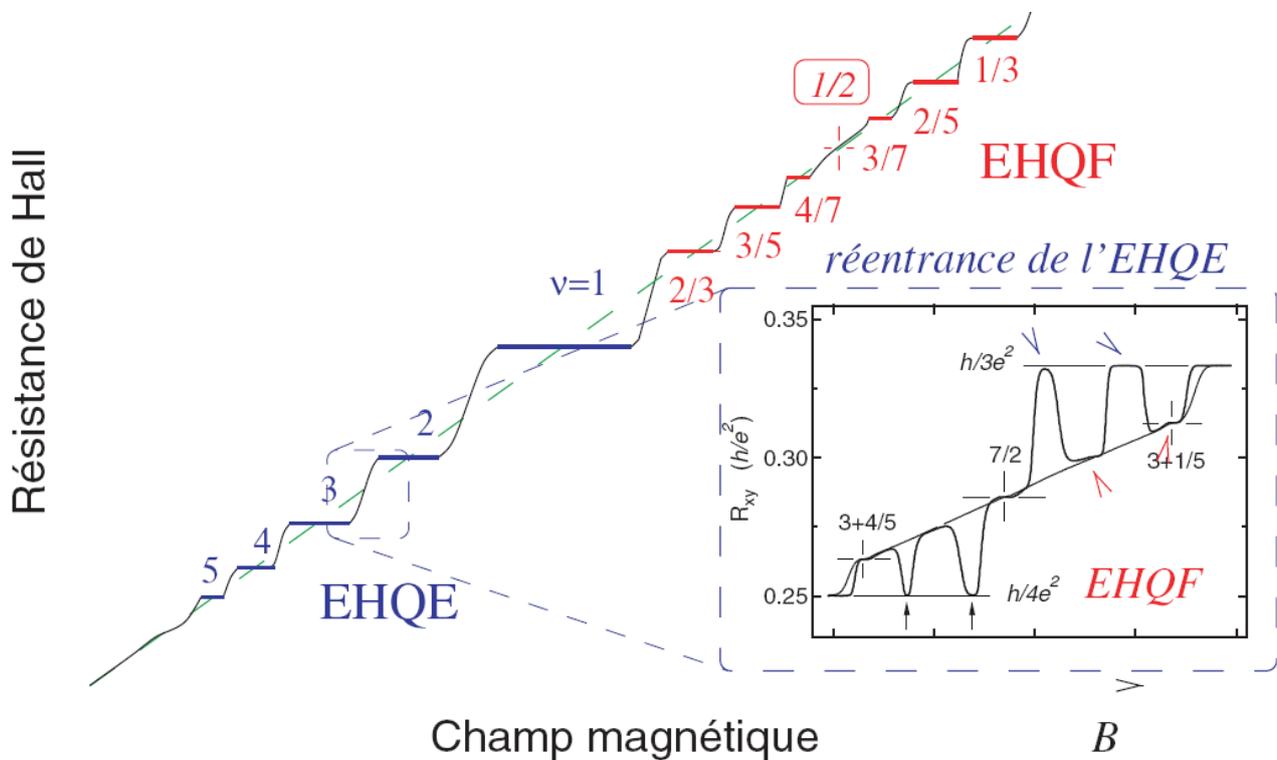


Figure 4 : Variation de la résistance de Hall en fonction de B pour EHQF

4- Conclusion

Rarement en Physique la connexion entre expérience et théorie n'aura été aussi forte que dans l'étude de l'effet Hall quantique. Depuis la découverte de Von Klitzing en 1980, les théoriciens ont constamment été mis à l'épreuve de résultats expérimentaux déroutants, comme par exemple les plateaux fractionnaires.

Ce défi maintes fois renouvelé a permis la naissance de théories toujours plus élaborées et profondes, et qui font qu'aujourd'hui l'Effet Hall quantique est assez bien compris. Celui-ci a dorénavant d'importantes applications en métrologie, puisqu'il permet d'obtenir des étalons de résistance de grande qualité. On espère aussi qu'il pourra bientôt permettre une détermination d'une précision inégalée de la constante de structure fine. Néanmoins, l'observation récente de plateaux correspondant à des valeurs paires du dénominateur démontre que le sujet est loin d'être clos, puisque ceux-ci ne s'expliquent pas à l'aide des théories actuelles. Sans doute l'effet d'Edwin Herbert Hall n'a-t-il pas encore livré tous ses secrets...