CHVII Microscope électronique

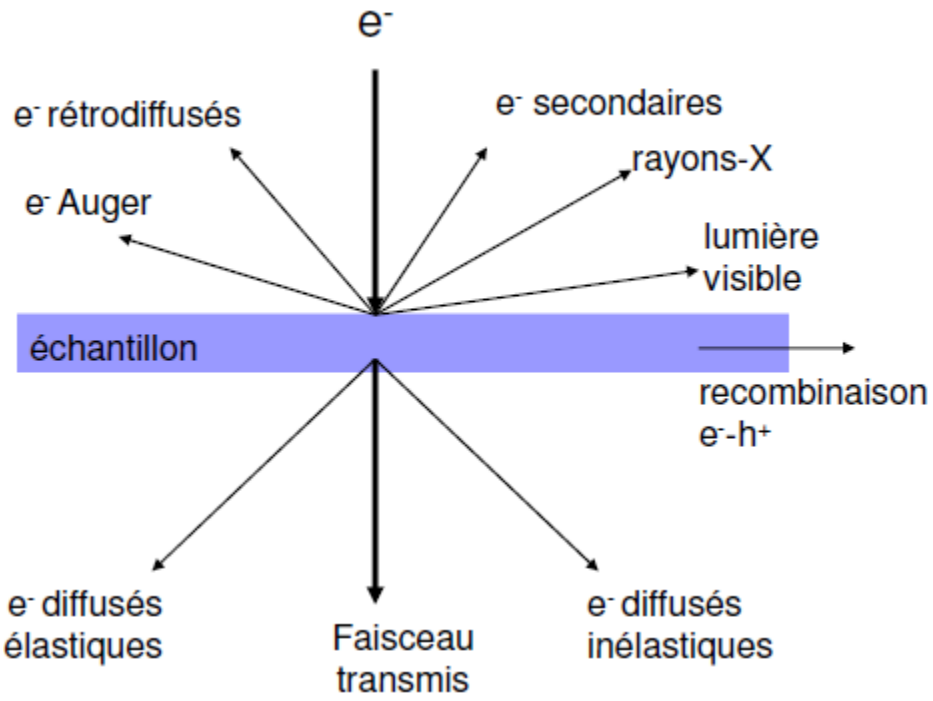
I. Introduction

La résolution d'un microscope est limitée par la diffraction à des distances de l'ordre de la longueur d'onde -donc de l'ordre de la centaine de nanomètres pour le rayonnement optique. Dans les années 1920, Ruska eut l'idée d'utiliser les électrons rapides comme source de rayonnement leur longueur d'onde étant bien plus faible (de l'ordre de quelques picomètres pour des vitesses de l'ordre de la moitié de la vitesse de la lumière). Ce qui permet d'obtenir une résolution associée excellente.

II. Principe

1. Interaction électrons-matière

Lors d'une expérience de microscopie électronique, des électrons rapides de l'ordre de 100 à 200 keV, sont envoyés sur l'échantillon. Après interaction, les caractéristiques des électrons vont être modifiées, et un certain nombre de particules et de rayonnements vont être produit. Les signaux ainsi obtenus donneront accès à des informations sur les propriétés structurales, électroniques et optiques de l'échantillon.



La majorité (80%) des électrons interagirons élastiquement avec l'échantillon, et seront soit directement transmis, soit diffractés et/ou diffusés élastiquement. Les 20% restants ont donc perdu de l'énergie par interaction avec l'échantillon.
Les atomes de l'échantillon peuvent se désexciter suivant différents modes : désexcitations des niveaux inoccupés vers les états de coeur, sous forme de photons X, désexcitations des états de la bande de conduction vers la bande de valence sous forme de photons UV visibles et infrarouge. Lors de la désexcitation, des électrons secondaires peuvent être émis. De plus, des électrons incidents peuvent être rétrodiffusés. Finalement, des paires électrons-trous peuvent être créées, et produire un courant mesurable.

2. les lentilles électromagnétiques

Tout comme un microscope optique un microscope électronique est une série de lentilles électromagnétiques. Il s'agira de lentilles magnétiques. Le principe est de former un champ magnétique le long de l'axe optique des électrons rapide. Sous l'action de la force de Lorentz, les électrons seront déviés vers l'axe optique. Tout comme les lentilles optiques, on peut définir pour les lentilles magnétiques une distance focale, mais celle-ci est forcément positive. Autrement dit, une lentille magnétique est toujours convergente.
Il est important de noter qu'un des avantages de ces lentilles est dû au fait que la valeur de la focale est liée à la valeur du champ magnétique au centre de la lentille. Ce champ est créé par une bobine, et sa valeur facilement modifiable par modification d'un courant.
Les lentilles magnétiques souffrent également d'aberrations, les plus importantes étant les aberrations de sphéricités et l'aberration chromatique. L'aberration sphérique, qui est cause que les rayons incidents formant un angle important avec l'axe optique sont focalisés avant le point image. Quant à l'aberration chromatique, elle est cause que des électrons de différentes vitesses n'auront pas les mêmes distances focales.

III. Microscope électronique :

Un microscope électronique (ME) est un type de microscope qui utilise un faisceau de particules d'électrons pour illuminer un échantillon et en créer une image très agrandie. Les microscopes électroniques ont un plus grand pouvoir de résolution que les microscopes optiques qui utilisent des rayonnements électromagnétiques. Ils peuvent obtenir des grossissements beaucoup plus élevés allant jusqu'à 5 millions de fois, alors que les meilleurs microscopes optiques sont

limités à un grossissement de 2000 fois. La résolution et le grossissement plus grands du microscope électronique sont dus au fait que la longueur d'onde d'un électron (longueur d'onde de Broglie) $\lambda = \frac{h}{m_0 v}$ est beaucoup plus petite que celle d'un photon de lumière visible.
Dans un microscope électronique, la vitesse de l'électron est donnée par :

$$v = \sqrt{\frac{2eU}{m_0}}$$

Le potentiel d'accélération est habituellement de plusieurs milliers de volts, permettant à l'électron d'atteindre une proportion appréciable de la vitesse de la lumière. À ces vitesses, les effets relativistes doivent être pris en compte. On peut démontrer que la longueur d'onde des électrons est modifiée selon :

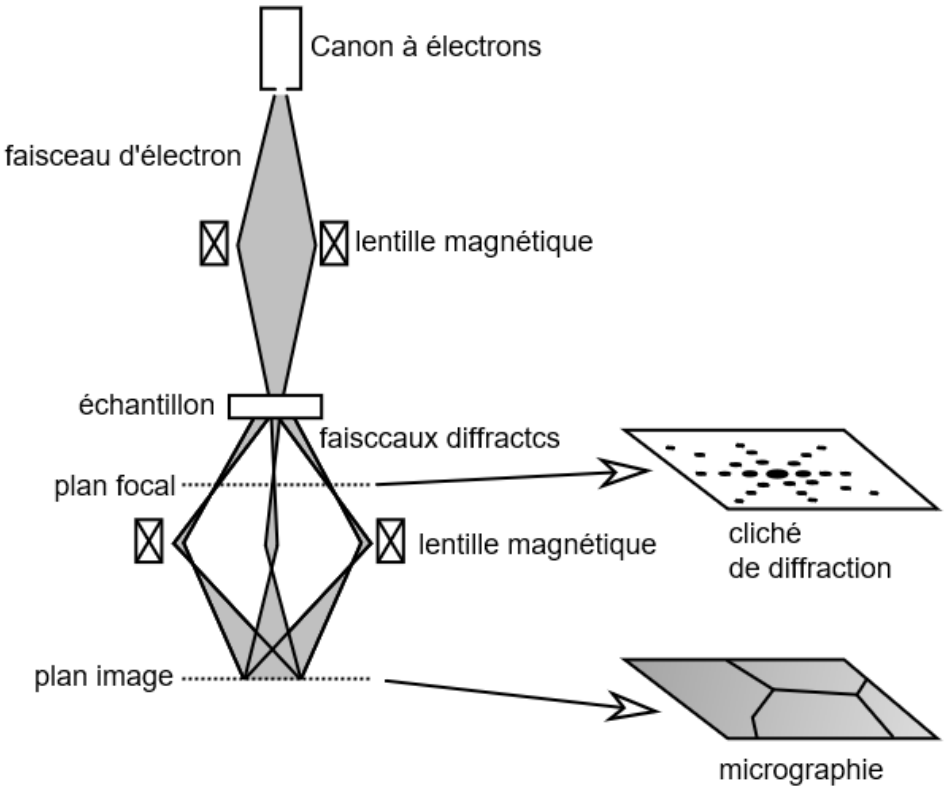
$$\lambda = \frac{h}{\sqrt{2m_0 eU}} \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{eU}{2m_0 c^2}}}$$

où c est la vitesse de la lumière. Le premier terme correspond au terme non relativiste comme décrit plus haut, le second correspond au facteur relativiste.

On distingue deux types de microscopes électroniques :

1. **Microscope électronique en transmission**

Le microscope électronique en transmission (MET) utilise un tungstène comme cathode source d'électrons. Le faisceau d'électrons est accéléré par une anode en général à 100 keV (40 à 400 keV) par rapport à la cathode, concentré par des lentilles électrostatiques et électromagnétiques, et transmis sur la cible qui est en partie transparente pour les électrons et en partie les disperse. Quand il ressort de l'échantillon, le faisceau d'électrons comporte des informations sur la structure de l'échantillon qui sont amplifiées par le système de lentilles de l'objectif du microscope. L'image peut être enregistrée photographiquement par l'exposition d'un film ou une plaque photographique directement sur le faisceau d'électrons ou une plaque phosphorée à haute résolution peut être couplée au moyen d'un système optique ou d'une fibre optique vers le capteur d'une caméra et peut être affichée sur un ordinateur.



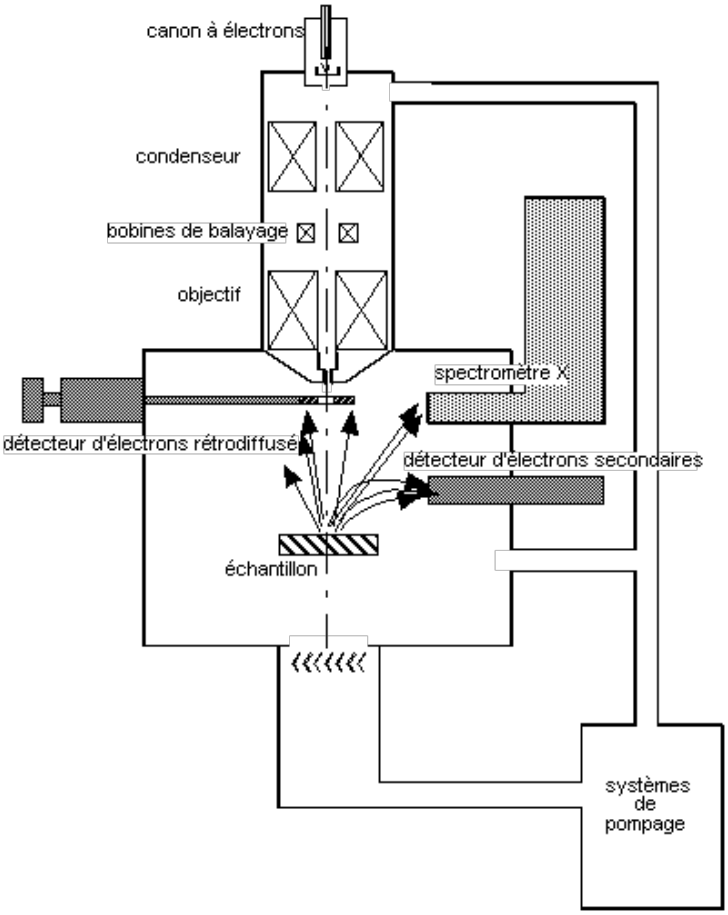
Un microscope électronique en transmission est composé des principaux éléments suivants :

- d'un canon à électrons, qui fournit le faisceau électronique ;
- de lentilles magnétiques ;
- d'un système de détecteurs d'électrons.

Ces éléments sont placés dans un vide variant de 10^{-7} mbar p à 10^{-10} mbar. Le microscope peut être équipé d'un détecteur de rayons X pour effectuer des analyses dispersives en énergie.

2. Microscope électronique à balayage

À la différence du MET, où le faisceau d'électrons à haute tension porte l'image de l'échantillon, le faisceau d'électrons du microscope électronique à balayage (MEB) produit des images par sondage de l'échantillon avec un faisceau d'électrons qui est analysé sur une zone rectangulaire de l'échantillon. Sur chaque point sur l'échantillon le faisceau d'électrons incident perd de l'énergie. Cette perte d'énergie est convertie en autres formes, comme la chaleur, l'émission d'électrons secondaires de basse énergie, l'émission de lumière ou l'émission de rayons X. L'afficheur du MEB représente l'intensité variable de l'un de ces signaux dans l'image.



La résolution de l'image d'un MEB est plus faible que celle d'un MET. Toutefois, parce que l'image du MEB repose sur les processus de surface plutôt que sur la transmission, il est en mesure de livrer des images en trois dimensions de la structure de l'échantillon.