



LANGUY Fabian

Physique des capteurs

Travail sur une galette de microcanaux

Professeur : S. LUCAS

Table des matières

1. Introduction.....	3
2. Description et spécifications.....	4
2.1. Description générale.....	4
2.2. Optique électronique.....	5
2.2.1. Lentille objective	5
2.2.2. Appareil de contraste.....	5
2.2.3. Stigmator/deflector.....	6
2.2.4. Lentilles projectives.....	6
3. La galette de microcanaux.....	7
3.1. Mise en garde.....	7
3.1.1. Channeltron, marque déposée.....	7
3.1.2. Le MPC, un détecteur fréquent.....	7
3.2. Introduction au MCP.....	7
3.2.1. Un peu d'histoire.....	7
3.2.2. Utilité du MCP.....	7
3.2.3. Description générale.....	7
3.3. Les microcanaux.....	9
3.3.1. Génération d'électrons secondaires.....	9
3.3.2. Le gain.....	9
3.4. Application pratique.....	11
3.4.1. MCP imaging detector.....	11
3.4.2. Les canaux multiplicateurs d'électrons courbés.....	13
3.4.3. Le Chevron ou V-stack.....	13
3.5. Données et caractéristiques techniques.....	15
3.5.1. Proportion de surface utile.....	15
3.5.2. Capacité de détection.....	15
3.5.3. Le courant maximum.....	16
3.5.4. Temps mort (dead time).....	16
3.5.5. Résolution spatiale.....	17
3.5.6. Temps de réponse – résolution temporelle.....	17
3.5.7. Le coup sombre (dark count).....	17
3.6. Données du MCP du LPME.....	17
4. Application expérimentale concrète avec le PEEM.....	18
5. Conclusion.....	19
6. Sources.....	20
6.1. Provenance des images.....	20
6.2. Adresses web.....	20
6.3. Bibliographie.....	20

1. Introduction

De nos jours, la déduction de phénomènes macroscopiques se fait de plus en plus grâce à l'étude microscopique des matériaux. Des moyens de détection de plus en plus précis sont donc nécessaires pour l'obtention de résultats qui doivent l'être tout autant. Mais tout comme le résultat, les interprétations qui en découlent ont leur importance. Il est donc nécessaire de connaître un minimum le principe de fonctionnement de la machine qu'on utilise pour déterminer les erreurs sur la mesure, ou bien pour déterminer la cause de résultats improbants.

Les FUNDP sont reconnues pour leurs études de surfaces. Parmi les techniques d'analyse plusieurs nécessitent de pouvoir détecter des signaux d'électrons. Ces techniques font alors appel à des microcanaux permettant l'amplification des signaux dus aux électrons, plus précisément, ils permettent de multiplier les électrons qui passent en leur sein.

Ce moyen d'amplification est notamment utilisé au LPME pour le PEEM (Photoemission Electron Microscope). Contrairement à certaines techniques comme le XPS et l'AFM qui se retrouvent dans plusieurs laboratoires, le LPME est le seul laboratoire à posséder un PEEM. Voilà pourquoi j'ai décidé de m'intéresser à cette machine de sorte à pouvoir mieux comprendre comment elle fonctionne et donc de mieux interpréter les résultats mais aussi les erreurs qui les accompagnent. Ce choix a de plus été motivé par les membres de l'équipe qui m'entourent pour le mémoire car ceux-ci désiraient également en savoir plus sur le moyen de détection qui se cachait au coeur du PEEM ce qui permet d'offrir à ce travail l'opportunité de sortir du cadre personnel.

Bien que le sujet du travail porte uniquement sur la partie « capteur » des techniques d'analyses, j'ai préféré replacer le détecteur dans son contexte en commentant très brièvement le PEEM et la manière dont les électrons sont conduits pour finalement aboutir dans le détecteur et fin de parcours.

Je tiens à remercier l'équipe du LPME et tout particulièrement Jacques DUMONT pour ses précieux conseils et surtout pour m'avoir aiguillé dans mes recherches.

2. Description et spécifications

Le PEEM (Photoemission Electron Microscope) permet d'étudier des échantillons placés sous vide. Cette étude consiste en une analyse par microscopie de photoélectrons.

2.1. Description générale

Le PEEM consiste essentiellement en un système d'imagerie fonctionnant grâce à des lentilles électrostatiques. Les électrons utilisés dans ce système de lentilles sont excités par une source de lumière rendant possible la création de photoélectrons par photoémission.

Une source lumineuse (UV ou rayons-X, UV dans le cas du LPME) fait parvenir des photons sur l'échantillon causant une excitation du matériau. L'énergie ainsi fournie est légèrement supérieure au travail d'extraction des métaux (~5eV). Les éléments ainsi excités vont alors se désexciter en émettant des photoélectrons qui passeront dans plusieurs systèmes de lentilles avant d'arriver sur une plaque multicanaux et finalement sur un écran fluorescent permettant l'observation directe ou via une camera CCD¹.

Comparée à beaucoup d'autres, la technologie PEEM ne nécessite pas de balayage par rayon puisque la surface de l'échantillon est illuminée de manière homogène, ce qui permet d'éviter la dégradation de la surface due à de fins rayons.

L'image amplifiée de la surface peut être observée en temps réel (pour autant que l'intensité du faisceau soit suffisante) sur l'écran fluorescent.

Le principe de base de fonctionnement du PEEM est semblable à celui d'un microscope optique ; cependant, dans notre cas, la résolution n'est plus limitée par la longueur d'onde du rayon lumineux.

$$Résolution_{lum} = 1,22 \frac{\lambda}{d} \quad \text{Équation 1}$$

Dans le cas du PEEM, un champ électrostatique fort accélère les électrons issus de l'échantillon qui atteindront des énergies de 10 à 16 keV.

Si on calcule classiquement la vitesse des électrons :

$$E = 10\text{keV} = \frac{1}{2} mv^2 \quad \text{Équation 2}$$

$$v^2 = \frac{20 \cdot 10^3 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19}}{9,11 \cdot 10^{-31}} = 3,51 \cdot 10^{15} \quad \text{Équation 3}$$

$$v = 5,9 \cdot 10^7 \quad \text{Équation 4}$$

Ce qui nous donne une longueur d'onde de De Broglie de l'ordre de 10^{-11} m.

La résolution effective quant à elle est de l'ordre de 5 à 40nm.

L'image finale obtenue par le PEEM est une image en contraste présentant des variations

¹ Les détecteurs CCD (charge coupled device) : il s'agit de détecteurs basés sur la technologie des semi-conducteurs pour les domaines visible, infrarouge et proche UV.

spatiales et temporelles. Ces variations sont dues à des variations du travail d'extraction, du champ électrique qui possède une certaine distribution en énergie, de la vibration de l'échantillon et de la topographie de la surface.

Les variations de la fonction d'extraction peuvent d'être d'origine chimique : les liaisons à l'intérieur de l'échantillon sont différentes de celles en surface ; cristallographique : en fonction de l'orientation, des marches et des défauts du cristal.

Le contraste topographique provient du shadowing, des angles d'émission différents, etc.

2.2. Optique électronique

La focalisation au sein du PEEM est réalisée grâce à trois systèmes de lentilles électrostatiques : un système d'objectif et deux systèmes de lentilles de projection.

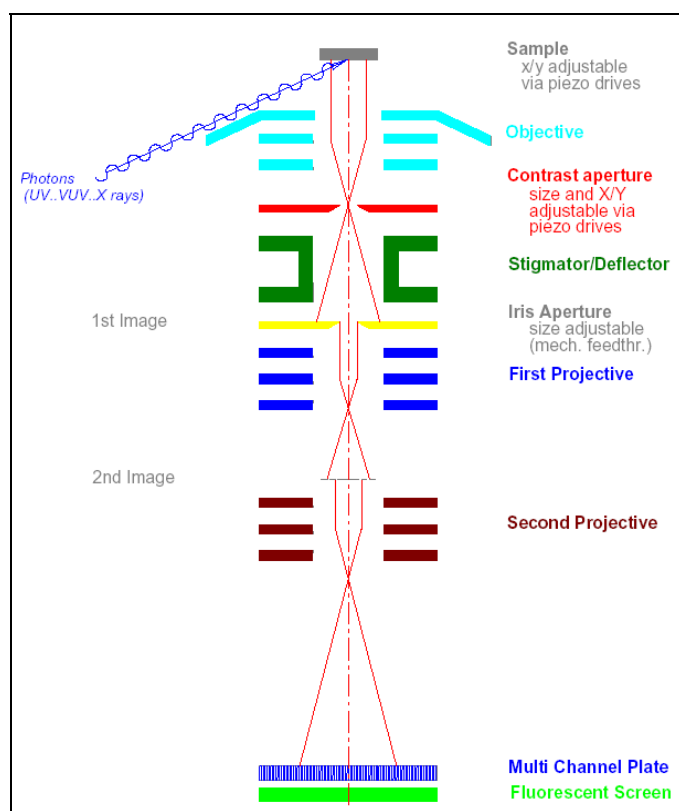


Illustration 1:

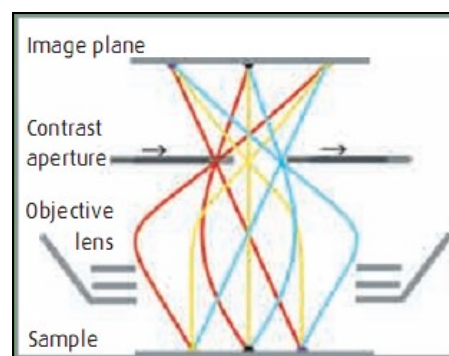


Illustration 2:

Ci-dessus à gauche un schéma général comportant les principaux éléments du PEEM. A droite, un zoom permet de mieux visualiser ce qu'il se passe au début de la trajectoire des électrons.

2.2.1. Lentille objective

[Objective lens] Les lentilles objectives sont constituées de deux outils : le premier ne constitue pas à proprement parler de lentilles mais il s'agit en réalité d'un extracteur. Porté à un potentiel élevé, il permet d'arracher les électrons de l'échantillon à analyser. Le deuxième outil, le focus, permet de focaliser le faisceau.

2.2.2. Appareil de contraste

[Contrast aperture] Règle le contraste et la résolution par la suppression des rayons marginaux (en dehors du point de focalisation).

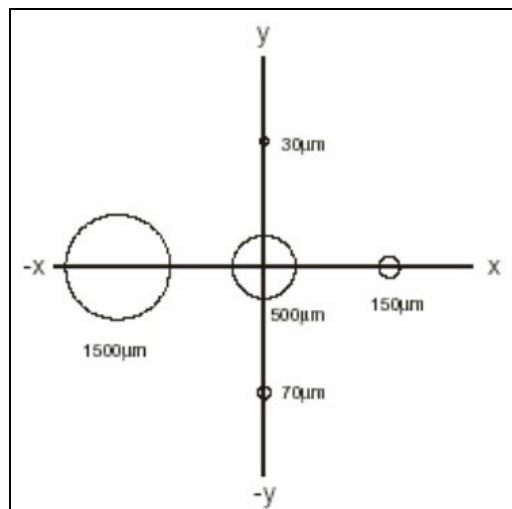


Illustration 3:

Une plaque mobile percée de trous permet de choisir le diamètre de la zone qu'on veut sonder.

2.2.3. Stigmator/deflector

Le stigmator permet encore d'augmenter la résolution en réduisant l'astigmatisme.

Le déflecteur permet de recentrer le faisceau de telle sorte que si on modifie le zoom, l'image ne se décentre pas. Autrement dit, le déflecteur permet d'ajuster la position du faisceau au centre de toutes les lentilles.

2.2.4. Lentilles projectives

[Projective lenses] Elles règlent l'agrandissement de l'image. Les lentilles projectives vont toujours par paire afin que la seconde lentille compense l'aberration chromatique de la première.

Finalement, avant d'arriver sur un écran fluorescent, l'image est intensifiée par un détecteur multicanaux et c'est ce dernier que nous allons étudier plus profondément.

3. La galette de microcanaux

3.1. Mise en garde

3.1.1. Channeltron, marque déposée

Le « microchannel plate » (MCP) est souvent traduit en français par « Channeltron® ». Cependant, il faut savoir que ce terme est une marque déposée et qu'il est dès lors à éviter. De plus, un channeltron désigne un canal alors que la MCP en est composée de plusieurs millions. Même si on emploie généralement (ce sera d'ailleurs le cas dans ce document) la dénomination MCP, dans certains ouvrages francophones par contre, on trouve le terme correct « galette de microcanaux ».

3.1.2. Le MPC, un détecteur fréquent

Le microchannel plate est un dispositif permettant la détection de divers types de particules (ions, photons, électrons...), il trouve donc son application dans plusieurs machines d'analyse telles que le PEEM, le XPS, le ToF-SIMS...

Puisque le PEEM est la seule machine utilisant ce détecteur à disposition du LPME, je me contenterai de détailler le MCP spécifique au PEEM.

3.2. Introduction au MCP

3.2.1. Un peu d'histoire...

L'idée d'utiliser des multiplicateurs d'électrons date des années 1930. Cependant, il fallut attendre 1958 avant de voir le premier multiplicateur faire son apparition grâce à Goodrich et Wiley.

Les premiers modèles étaient conçus spécialement pour des applications spatiales ; leur petite taille et leurs faibles besoins en énergie en faisaient des détecteurs idéaux pour étudier les atmosphères planétaires et l'exploration du système solaire.

3.2.2. Utilité du MCP

Les électrons en provenance de l'optique électronique vont pénétrer dans les canaux de la MCP qui amplifieront environ d'un facteur 10^4 le signal d'électrons grâce à la génération d'électrons secondaires. Ceci a pour but de rendre le signal arrivant sur un écran fluorescent perceptible par une caméra CCD. Sans ce dispositif, il nous faudrait percevoir le signal d'un seul électron, ce qui est quasiment impossible.

3.2.3. Description générale

Généralement, un MCP se présente sous la forme d'un fin cylindre épais de quelques dixièmes de millimètres et ayant un diamètre allant de 25 à 60mm. La MCP a pour constituant principal le SiO_2 . Pour éviter la dégradation du MCP, il est nécessaire de travailler sous vide de sorte à ce que les vapeurs d'eau et la poussière ne viennent pas endommager le dispositif facilement contaminé.



Illustration 4:

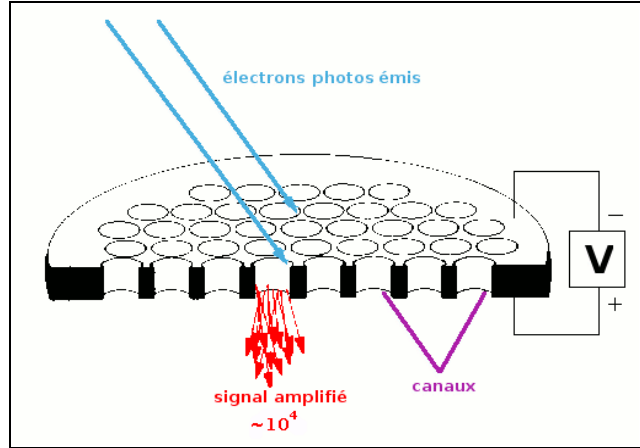


Illustration 5:

Une première prise de vue de la surface permet d'observer une structure hexagonale périodique, tel un nid d'abeilles :

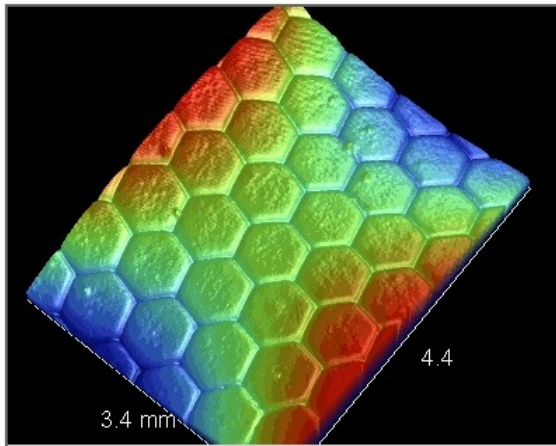


Illustration 6:

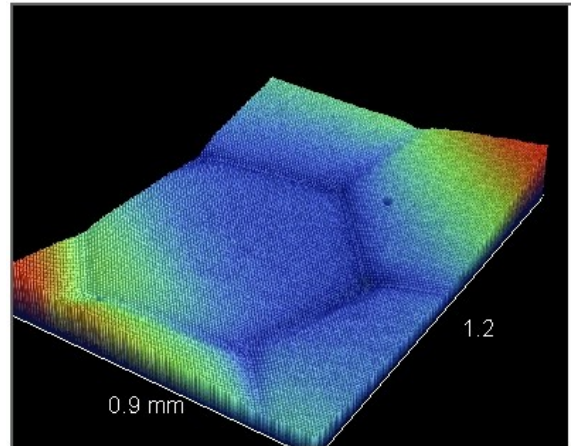


Illustration 7:

Des zooms plus prononcés permettent quant à eux de repérer les microcanaux larges de 10 à 15 μm :

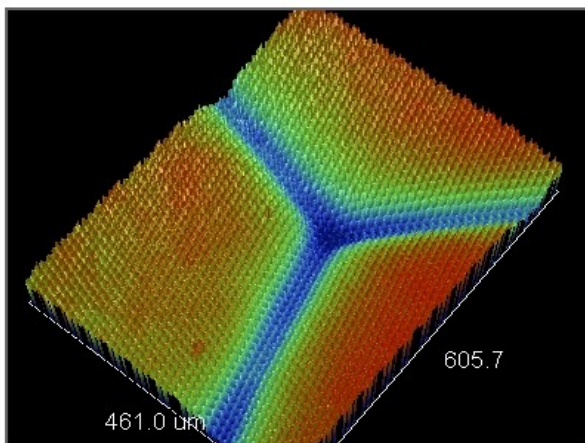


Illustration 8:

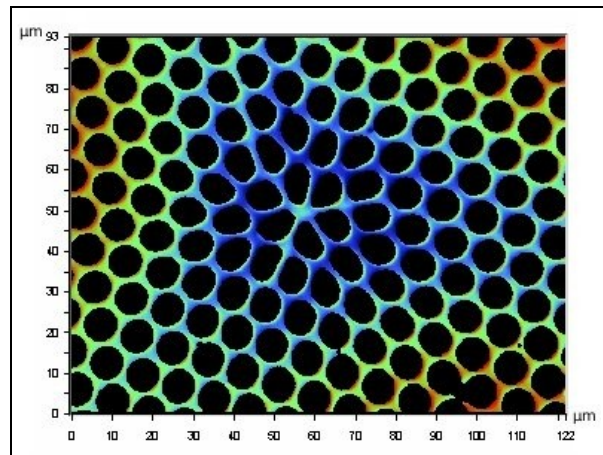


Illustration 9:

3.3. Les microcanaux

Un MCP contient plusieurs millions de microcanaux parallèles entre eux et indépendants les uns des autres. Leur conception s'apparente très fortement à celle des fibres optiques puisqu'ils sont tous deux fabriqués en dioxyde de silicium (SiO_2), plus communément appelé la silice, un semi-conducteur de gap élevé : 9eV. Ce type de matériau est traité spécifiquement afin de favoriser l'émission d'électrons secondaires. Les matériaux permettant la génération d'électrons secondaires sont appelés « dynodes ».

3.3.1. Génération d'électrons secondaires

Pour qu'il y ait émission d'électrons secondaires, il faut que les électrons entrent en contact avec la paroi interne des microcanaux et ce avec une énergie suffisante. Les microcanaux jouant le rôle de la dynode doivent être soumis à une forte différence de potentiel pour pouvoir amplifier. Pour que les électrons entrent en contact avec les parois des canaux, l'axe normal à MCP est légèrement de biais ($\sim 10^\circ$) par rapport à l'axe des électrons incidents. Une fois en contact avec la dynode, les électrons provoquent le mécanisme d'émission secondaire, qui ressemble à l'effet photoélectrique mais avec des électrons comme particules incidentes. L'électron qui arrive ainsi avec plusieurs centaines d'eV va générer des électrons secondaires de beaucoup plus faible énergie (approximativement 1eV), lesquels, grâce au champ électrique régnant, vont être accélérés et, à leur tour, vont pouvoir engendrer de nouveaux électrons secondaires.

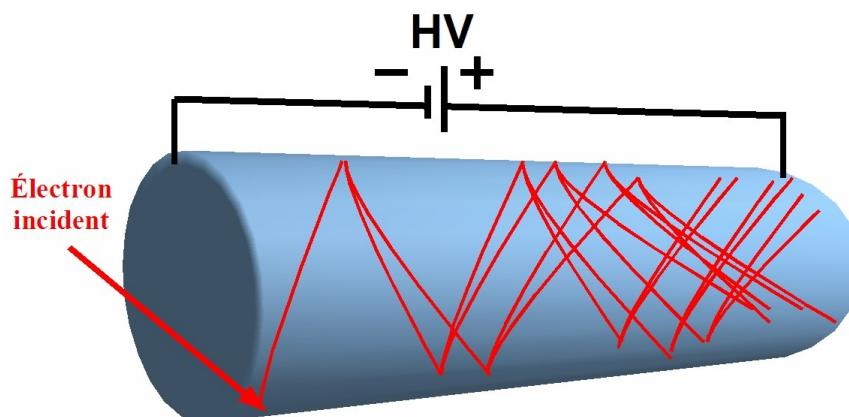


Illustration 10: Canal multiplicateur d'électron

Au départ nous avons donc un électron qui vient frapper la paroi du canal. Nous aurons alors n_1 électrons secondaires, ensuite n_2 électrons secondaires produits...

Si après la première étape nous avons δ_1 électrons au total, à la deuxième δ_2 , puis δ_3 etc. Alors, le gain total, défini comme étant le rapport du courant de sortie sur le courant entrant, après la $n^{\text{ième}}$ étape sera δ_n .

3.3.2. Le gain

Physiquement, il est logique que le gain (G) soit proportionnel à la longueur du canal (L) et à la tension appliquée aux bornes du canal mais inversement proportionnel au diamètre du tube (d). Il est donc courant de rencontrer comme gain :

$$G = \exp\left(C \frac{L}{d}\right) \quad \text{Équation 5}$$

où C est fonction de la tension et des électrons secondaires.

La littérature² nous donne une expression plus complexe mais plus explicite du gain pour autant que l'émission des électrons secondaires soit normale à la surface du canal :

$$G = \left(\frac{AV}{2\alpha V_0^{1/2}} \right)^4 \frac{V^{\alpha^2}}{V} \quad \text{Équation 6}$$

où V est la valeur de la haute tension ;

V_0 l'énergie initiale d'un électron secondaire émis ;

α est le rapport L/d ;

A est la constante de proportionnalité de la relation $\delta = AV_c^{1/2}$ qu'on admet ;

V_c représente l'énergie de collision de l'électron en eV et $A \approx 0,2$.

Quand V augmente, alors les collisions au sein du canal se feront à une énergie V_c plus élevée. Mais, en même temps, le nombre total de collisions doit diminuer, ce qui devrait entraîner un maximum du gain en fonction de la tension. Voici deux courbes expérimentales :

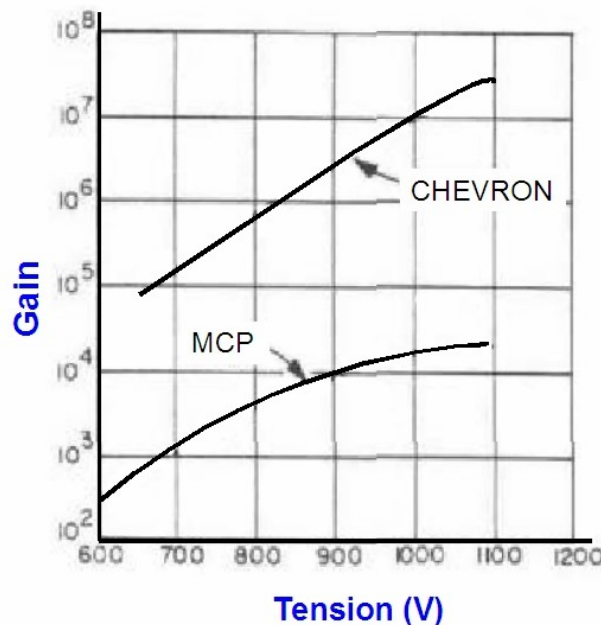


Illustration 11:

On remarque qu'on n'atteint pas de maximum, mais que le gain reste constant à partir d'une certaine tension. Ceci est dû au fait que les électrons secondaires ne sont pas émis perpendiculairement à la surface.

Le gain typique d'un MCP est de l'ordre de 10^4 à 10^6 . Pour le Chevron, un autre type de modèle qu'on expliquera plus tard, le gain monte entre 10^7 et 10^9 .

² Nuclear Instruments and Methods, Vol. 162, 1979, page 588, par J. LADISLAS

Le schéma ci-dessus datant de 1979, les gains ont augmenté depuis lors.

L'Équation 6 nous permet de trouver le α_M (le rapport offrant un gain maximum) grâce à l'annulation de la dérivée du logarithme de G par rapport à α :

$$\frac{d(\ln G)}{d\alpha} = 0 \quad \text{Équation 7}$$

$$\alpha_M = \frac{AV}{3.3 V_0^{1/2}} = \frac{V}{16.5} \quad \text{Équation 8}$$

De manière générale, les tensions vont de 1000 à 1500kV et α prend des valeurs comprises entre 40 et 80.

Le gain est donc de l'ordre de 10^4 , c'est-à-dire que pour un seul électron, près de dix mille autres sont créés sur moins d'un dixième de millimètre, ce qui peut engendrer certains problèmes liés à la densité d'espace de charge.

En effet, si le gain augmente, alors la probabilité de produire des ions positifs au bout du canal, là où la densité de charge est très élevée, augmente aussi. Ces ions sont produits par des collisions avec des molécules provenant soit de gaz résiduels, soit du « bombardement » de la paroi. Ces ions, puisque chargés positivement, vont remonter à l'entrée du canal et perturberont les mesures.

Les perturbations peuvent se situer à plusieurs niveaux : en retournant vers l'entrée du tube, l'ion pourrait entrer en collision avec la paroi et régénérer de l'émission secondaire. Il pourrait également capter un électron qu'on ne pourrait alors détecter. Enfin, les ions peuvent faire dévier les électrons de leur trajectoire, de sorte qu'ils atteignent un autre canal, ce qui s'avère gênant si l'on désire mesurer leur énergie (XPS).

Il est évident que le problème de production d'ions diminue lorsque le vide devient de plus en plus poussé. Il faut donc impérativement travailler avec un vide inférieur à 10^{-6} torr. Ce qui ne pose plus de problème de nos jours. Dans les faits, le LPME travaille à une pression d'environ 10^{-9} torr.

3.4. Application pratique

Cette partie a pour but de donner un aspect plus pratique sur l'utilisation du MPC. Nous verrons donc comment, en fonction de l'analyse souhaitée, paramétrer le MCP et nous nous attarderons bien entendu sur le cas du PEEM.

Nous venons donc de décrire la génération d'électrons secondaires dans les microcanaux. Bien entendu, une fois le faisceau d'électrons détectable, il faut le détecter. C'est ce qui sera fait à l'aide d'un écran fluorescent ou d'un écran de phosphore aluminé.

3.4.1. MCP imaging detector

Le microchannel plate imaging detector (MCPID) est le détecteur le plus simple. Il est réalisé à l'aide d'un seul MCP suivi d'un écran permettant de rendre visible le faisceau d'électrons.

Les écrans utilisés sont soit phosphorescents (phosphore aluminé, ce qui est le cas du XPS ou des oscilloscopes) soit fluorescents (Nd-YAG). C'est ce dernier type qui est utilisé dans le

PEEM.

Il est préférable dans le cas du PEEM d'obtenir une résolution temporelle aussi bonne que possible, voilà pourquoi on utilise un écran fluorescent, qui, contrairement aux écrans fluorescents, déchargent directement la radiation absorbée mais ceci implique une moins bonne information spatiale. Pour remédier à ce problème, on peut faire en sorte que ce soit la caméra CCD qui intègre l'information. Ce qui fait que le PEEM permet d'obtenir une bonne résolution temporelle et une bonne information temporelle.

Dans ce type de dispositif, bien que la direction principale de propagation des électrons ne soit pas parallèle à la normal du MCP, certains électrons passeront quasiment sans heurter la paroi des canaux. Le gain n'est donc pas homogène mais s'avère être une exponentielle. Voici donc ce qu'on appelle la « charge pulse height distribution ».

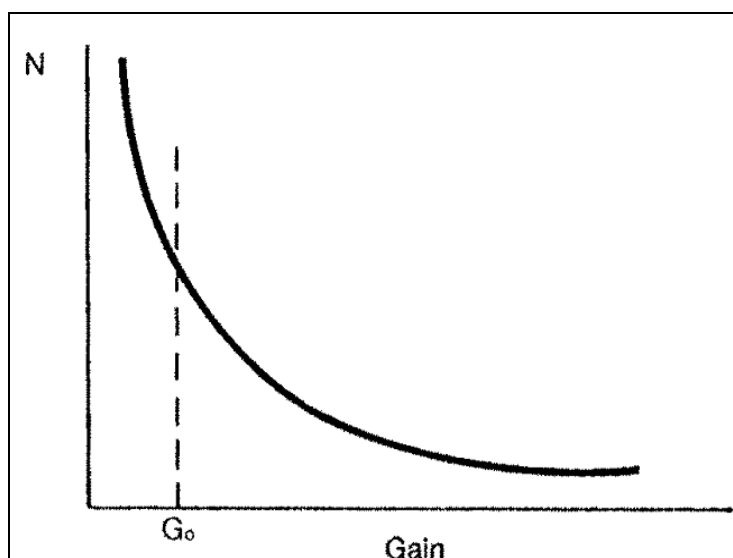


Illustration 12:

G_0 représente le gain moyen.

Il en va de même pour l'énergie de sortie des électrons : l'allure de la courbe de distribution est aussi une exponentielle décroissante avec une valeur moyenne de 35eV mais un nombre non-négligeable d'électrons ont une énergie supérieure à 100eV.

Si les électrons ne sont pas assez énergétiques, ils ne seront pas détectés, et ceux qui le sont trop risquent d'endommager le dispositif.

Enfin, pour que les électrons arrivent avec une énergie cinétique suffisante sur l'écran, on applique une DDP de l'ordre de 3kV (pour les écrans fluorescents) à 6kV (pour les écrans phosphorescents) entre l'écran et la sortie du MCP.

Voici un schéma du MCP imaging detector :

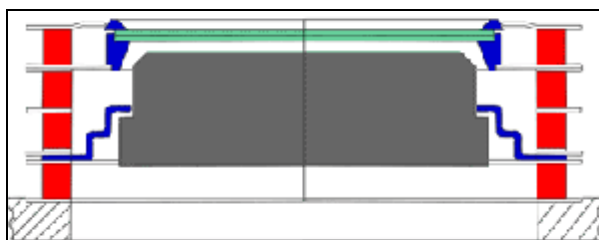


Illustration 13:

On distingue sur le schéma ci-dessus le MCP (en vert), l'écran fluorescent (en gris), les connexions permettant d'appliquer une DDP entre le MCP et l'écran (en bleu) et enfin des anneaux isolateurs en céramique (en rouge) afin d'éviter les claquages électriques.

Ce type de montage relativement simple, bien qu'ayant un gain de l'ordre de 10^4 , n'est cependant pas toujours assez performant : il est parfois nécessaire d'avoir une meilleure distribution en énergie des électrons sortant du MCP et/ou un gain plus élevé (mais augmenter le gain par une quelconque technique engendrerait les problèmes dont on a parlé plus haut).

Pour éviter ces problèmes, deux possibilités existent : courber les canaux ou la technique du V-stack (également appelé Chevron)

3.4.2. Les canaux multiplicateurs d'électrons courbés

Pour éviter les problèmes d'ion, on peut simplement courber les canaux, ce qui permet de pouvoir atteindre des gains plus élevés. De plus, la « charge pulse height distribution » qui auparavant ressemblait à une exponentielle décroissante ressemble maintenant fortement à une gaussienne avec un fwhm (full width at half maximum) de l'ordre de $50\%^3$.

Ceci s'explique par le fait que lorsque la densité de charge électronique en sortie de canal est importante, elle va entraîner une réduction de l'énergie cinétique des électrons en arrière interagissant avec les parois du canal, si bien que le rendement δ va diminuer jusqu'à atteindre l'unité. Si la densité de charge diminue l'effet s'inverse, ce qui entraîne une auto-régulation, un équilibre dynamique. Pour ce type de détecteur le gain est donc supérieur à celui d'un MCPID et atteint typiquement 10^6 . Le gain étant limité par la densité de l'espace de charge qui est régie par la géométrie des canaux ainsi que la tension qu'on leur applique.

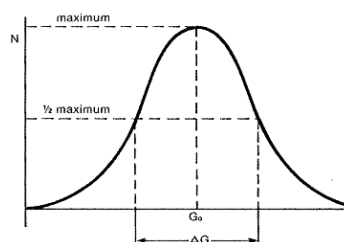
Bien que le principe de fonctionnement du système soit simple, parvenir à courber les canaux s'avère assez fastidieux ce qui explique que cette technique soit peu utilisée. Pour obtenir des gains élevés, on préférera utiliser le « Chevron ».

3.4.3. Le Chevron ou V-stack

Cette technique utilise non plus un mais deux MCP empilés (d'où « stack »), espacés de quelques « $100 \mu\text{m}$ ».

3 Le pourcentage de la fwhm représente en fait, le rapport du maximum (G_0) sur la fwhm (ΔG) :

$$\frac{G_0}{\Delta G} 100\%$$



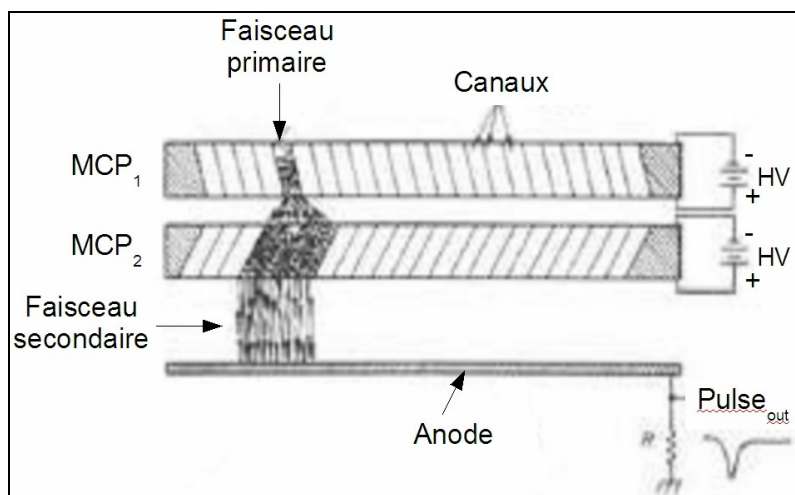


Illustration 14:

L'astuce consiste à incliner les deux MCP, l'un à -8° et l'autre à $+8^\circ$ (ce qui forme un V), de sorte à éviter la production d'ions positifs. Chacun des deux MCP ayant un gain de 10^4 , on obtient donc au final un gain d'environ 10^8 .

Voici la distribution d'amplitude d'un pulse (à 1kV/disque, séparés de $150\mu\text{m}$) :

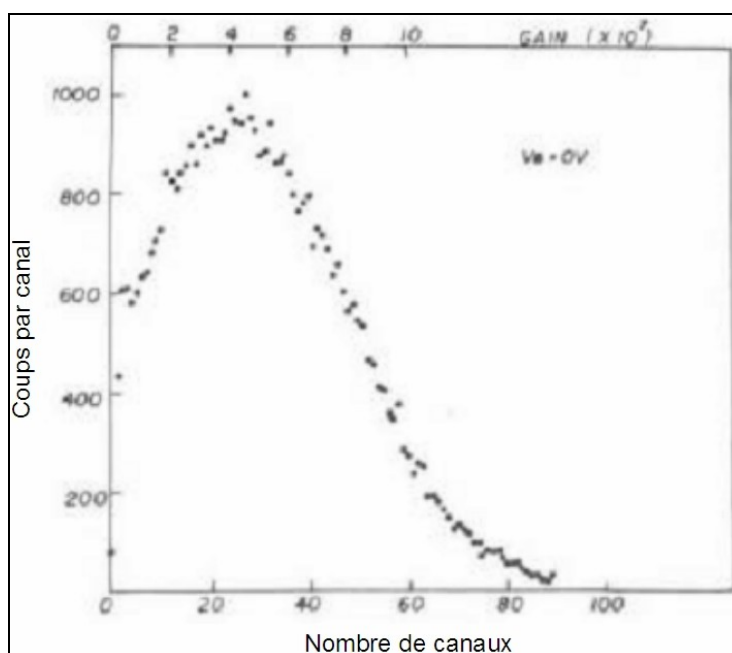


Illustration 15:

On observe que le gain au niveau du pic est de 4.10^7 . Le fwhm atteint quant à lui 170%, ce qui est nettement plus important que dans le cas des canaux courbés (50%). Si l'on rapproche les deux MCP, le gain diminue ainsi que le fwhm.

Comment expliquer ce phénomène ? Puisque que le gain de MCP_1 est de 10^4 et que l'énergie moyenne des électrons est d'environ 35eV, invoquer des effets d'espace de charge n'est pas raisonnable, l'effet est négligeable. Par contre, ce qui mérite d'être pris en compte, c'est le fait que si on rapproche les plaques, le faisceau d'électrons s'étalera moins et donc, à partir d'un

unique canal du MCP₁, seul un petit nombre de canaux de MCP₂ recevront des électrons dudit canal. Par conséquent, un effet d'espace de charge aura beaucoup plus facilement lieu dans ce cas, ce qui explique la diminution du gain. On se retrouve dès lors dans le cas précédent, d'où la diminution du fwhm.

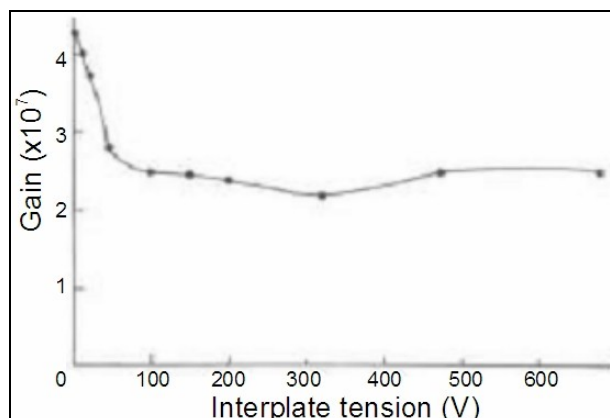


Illustration 16:

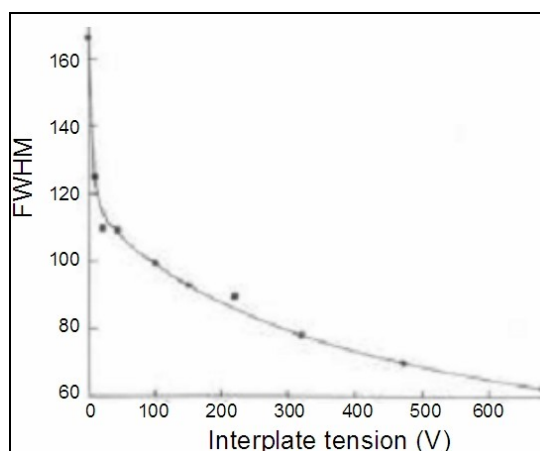


Illustration 17:

3.5. Données et caractéristiques techniques

On développera dans cette partie des données techniques telles que la tensions à appliquer ainsi que certaines caractéristiques comme, par exemple, le temps de réponse, temps mort...

3.5.1. Proportion de surface utile

L'open area ration (OAR) représente le rapport de la surface ouverte sur la surface totale. Ce rapport dépend principalement de la géométrie des tubes. Pour les structures hexagonales,

$$OAR = \pi \frac{\sqrt{3}}{6} \left(\frac{d}{P} \right)^2 \quad \text{Équation 9}$$

Avec d le diamètre du canal et P la période de la structure hexagonale (la distance centre à centre).

Généralement l'OAR tourne aux alentours de 60%

exemple₁ : pour une structure 10-12 structure ($d=10\mu\text{m}$, $P=12\mu\text{m}$) OAR=63%,

exemple₂ : pour une 12-15, c'est 58%,

exemple₃ : pour du 15-18, l'OAR vaut 63%.

Notons que dans certains cas, l'OAR peut monter à 70 voire 80% grâce à l'application d'un champ électrique correctement choisi à l'entrée de la galette.

3.5.2. Capacité de détection

Seule une fraction des électrons atteignant l'entrée du MCP produira un faisceau mesurable en sortie.

Nous avons vu précédemment que l'allure de la courbe du gain est une exponentielle décroissante. Ce qui fait qu'approximativement, les deux tiers des électrons produisent un gain

trop faible pour être détectés. On observe un maximum de détection si les électrons arrivent avec un angle d'incidence de $\sim 15^\circ$.

A cela s'ajoute le fait que l'OAR n'est que de 60% donc il y a 40% de chance que les électrons incidents terminent leur course entre les canaux et bien que l'émission d'électrons secondaires se fasse, ils ne seront pas accélérés puis qu'il n'y pas de champ électrique et donc il ne donnera pas lieu à une avalanche électronique. La surface de la galette entre le canaux est appelée « surface aveugle ».

3.5.3. Le courant maximum

L'une des caractéristiques d'un MCP est le courant maximum I_{\max} , correspondant au courant moyen maximum à la sortie du MCP pour lequel le MCP possède une réponse linéaire. Lorsque le courant de sortie est supérieur à I_{\max} , des charges apparaissent alors sur la face de sortie du MCP, ce qui engendre un gain plus faible et donc une réponse non linéaire.

En pratique on utilisera la relation empirique suivante :

$$I_{MAX} = \frac{I_{MCP}}{10} \quad \text{Équation 10}$$

où

$$I_{MCP} = \frac{V_{MCP}}{R_{MCP}} \quad \text{Équation 11}$$

La valeur typique de I_{MCP} est 10mA, d'où $I_{MAX} = 1\text{mA}$.

3.5.4. Temps mort (dead time)

Avant de discuter des effets du temps mort et des conséquences de son existence, déterminons d'abord ce qu'il représente.

Soit, I : le courant dans un canal ;
 n : le nombre d'électrons par pulse ;
 G : le gain ;
 t : le temps entre deux pulses d'électrons ;
 e : la charge de l'électron ($1,6 \cdot 10^{-19}$ C)

On obtient la valeur du courant de la manière suivante :

$$I = \frac{Gne}{t} \quad \text{Équation 12}$$

Le temps mort correspond alors à

$$t_m = \frac{Gne}{I_{Max}} = Gne \cdot 10 \frac{R_{MCP}}{V_{MCP}} \quad \text{Équation 13}$$

Il s'agit donc du temps d'intervalle entre deux pulses nécessaire pour assurer une réponse linéaire du MCP.

Typiquement, $n=10^4$, $G=10^4$, $R=3 \cdot 10^8$, $V=1\text{kV}$, d'où

$$t_m = 4,8 \cdot 10^{-5} \text{ s} \quad \text{Équation 14}$$

3.5.5. Résolution spatiale

Puisque chaque canal amplificateur est indépendant, la résolution spatiale dépendra uniquement de la densité spatiale des canaux qui doivent être les plus fins et les plus proches possible. Le diamètre des canaux varie de 5 à 25 μm et leur distance centre à centre est de 6 à 28 μm .

3.5.6. Temps de réponse – résolution temporelle

Étant donné que le parcours des électrons est court, on a un temps d'avalanche électronique très faible inférieur à 300ps (généralement même inférieur à 100ps). La fwhm est à peine de 25ns pour les canaux droits et celle-ci est encore plus réduite avec les appareils à haut gain étant donné le processus d'autorégulation.

Cette précision peut cependant être perdue par les moyens d'observation (caméra CCD, ordinateurs,...).

3.5.7. Le coup sombre (dark count)

Lors du choc de l'électron sur la paroi du canal, la paroi est chauffée localement. Il survient alors des émissions de particules qui peuvent être détectées. Heureusement, le taux d'émission à température ambiante et à une pression de 10^{-6} torr est faible : environ 1 émission $\text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$, alors que la surface totale des canaux en contact avec le vide approche les 380 cm^2 . Ce faible taux s'explique par le fait que le travail d'extraction est relativement élevé par rapport à l'énergie thermique.

3.6. Données du MCP du LPME

Malgré tout le bonne volonté du LPME depuis fin octobre, l'obtention de données à propos de notre MCP chez Omicron, fut extrêmement laborieuse pour peu de résultats. Il s'agit du MCP classique de 25mm de diamètre réel mais de 19mm de diamètre effectif (autrement dit un OAR de 58%). Le bias est de 5°. Les canaux font 10 μm de large tandis que leur distance centre à centre est de 12 μm . Enfin, le paramètre α (rapport de L/d) vaut 80.

Les caractéristiques du MCP utilisé entrent donc bien dans les gammes données dans tous les exemples précédents. ⁴

⁴ Toutes ces données ont été obtenues par Omicron Nanotechnology France (C. Petry et J. Viguier)

4. Application expérimentale concrète avec le PEEM

Premièrement, il nous faut admettre que le PEEM est rarement employé seul. Au LPME on soumet généralement un échantillon au spectromètre Auger pour en connaître la composition chimique. Une fois la composition chimique connue, on analyse l'échantillon au PEEM pour savoir comment les composants sont agencés : de manière uniforme, en amas... et ce avec une résolution spatiale extrêmement précise.

L'information temporelle nous intéresse donc rarement. Cependant, puisque le PEEM analyse pour autant que le travail d'extraction soit inférieur à 4,9eV, on peut alors tester l'efficacité de certains catalyseurs. Ci-bas, on constate une répartition homogène du CdTe ($\Phi < 5,9\text{eV}$) sur le Silicium ($\Phi > 5,9$).

Voici un schéma du PEEM en utilisation normale :

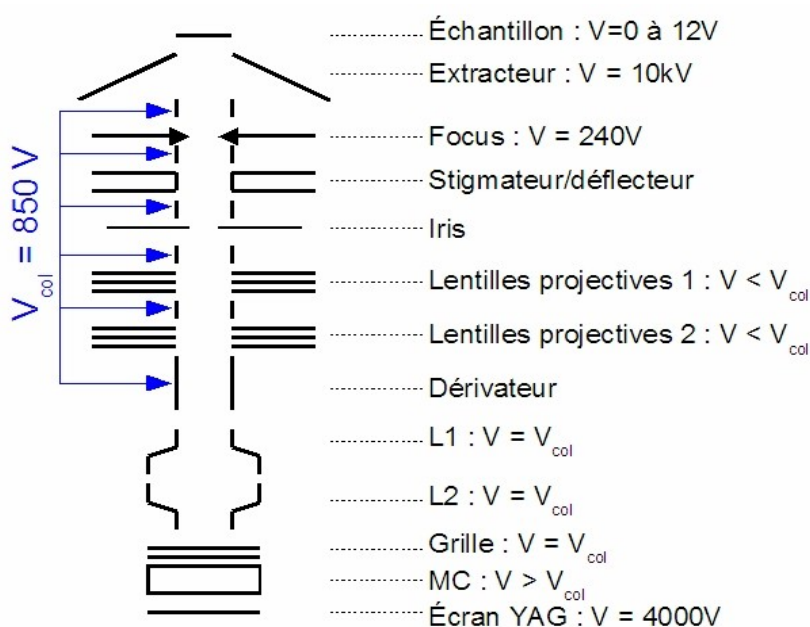


Illustration 18:

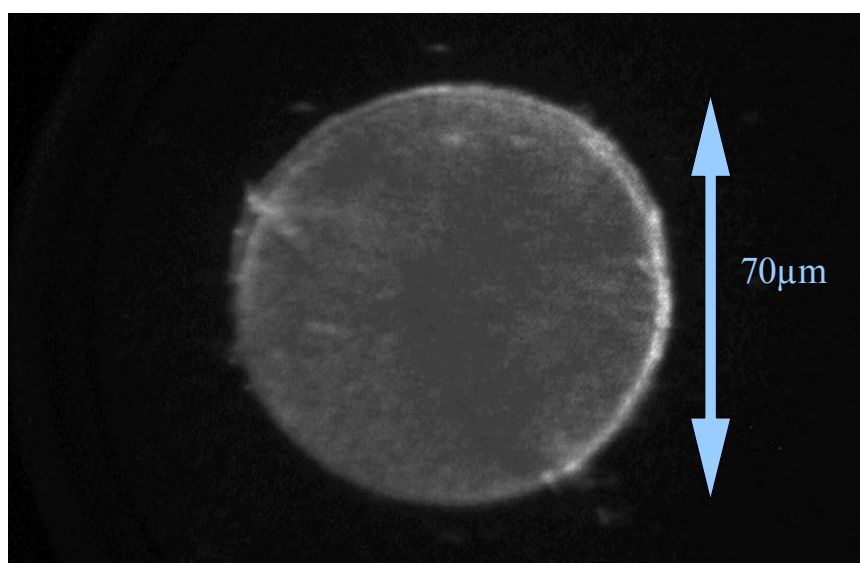


Illustration 19: Image PEEM – CdTe sur Silicium

5. Conclusion

Alors que les MCP sont des détecteurs couramment employés, ils sont souvent perçus comme des boîtes noires et peu de personnes connaissent leur principe de fonctionnement. Ce problème est d'autant plus difficile à résoudre que la documentation sur internet est rare, peu précise et difficile à trouver. Ce travail m'a donc permis de me rendre compte de la limite d'Internet qui, pour une fois, n'a constitué qu'une source minime.

Ce travail m'a également appris à chercher dans la littérature et surtout d'enfin comprendre comment fonctionnait l'appareillage ainsi que ses limites.

Enfin, ce travail ne constitue pas simplement un ramassis de notes dont le but serait d'obtenir une note mais a permis à toute l'équipe du LPME de s'interroger sur le MCP du PEEM et donc d'en connaître plus à son propos.

6. Sources

6.1. Provenance des images

N° d'illustration	Provenance
1	lab-neel.grenoble.cnrs.fr/themes/dichro/PEEM-fr.html
2	www.omicron.de
3	www.omicron.de
4	www.sciner.com/MCP/mcp_veeco01.htm
5	hea-www.harvard.edu/HRC/ (modifiée)
6,7,8,9	www.sciner.com/MCP/mcp_veeco01.htm
10	Réalisation de Fabian LANGUY
11	www.burle.com/cgi-bin/byteserver.pl/pdf/tp214.pdf
12	www.omicron.de
13	www.sciner.com/MCP/MCP.htm
14,15,16,17	www.burle.com/cgi-bin/byteserver.pl/pdf/tp214.pdf
18	Réalisation de Jacques DUMONT
19	Thomas Seldrum, LPME

6.2. Adresses web

<i>PEEM</i>	<i>MCP</i>
www.spring8.or.jp www.omicron.de lab-neel.grenoble.cnrs.fr physik.fu-berlin.de www.lbl.gov/Science-Articles www.staibinstruments.com w3.rz-berlin.mpg.de	www.photonis.com www.sciner.com www.waters.com www.src.le.ac.uk www.photek.com www.burle.com

Remarque : Les adresses ont été placées dans un ordre tout à fait quelconque : elles ne sont ni un classement des meilleurs sites ni une classification chronologique.

6.3. Bibliographie

Focus PEEM, instruction manual, version 2.00, Janvier 2004, Omicron
 Nuclear Instruments and Methods, Vol. 162, 1979, page 587-601, par J. LADISLAS
 Développement d'un détecteur sans temps morts[...], 2005, Chap 3, I. ISMAIL
 Les surfaces solides, concepts et méthodes, 2005, S. ANDRIEU & P. MULLER