

# Résumé de la thèse

intitulée

## **Accélération d'électrons et rayonnement bêtatron générés par sillage laser dans des tubes capillaires**

par

**Jinchuan JU**

Ecole doctorale Onde et Matière

Laboratoire de Physique des Gaz et des Plasmas (LPGP)

### **I. Introduction**

Les accélérateurs sont des installations pouvant accélérer des particules jusqu'au TeV. Aujourd'hui ils jouent un rôle important dans le développement de la science et de la technologie. L'étude des produits de collision de particules chargées de haute énergie a conduit à des avancées considérables en physique des particules et physique quantique. Les recherches en cours sur des accélérateurs fonctionnant à la frontière en énergie sont activement conduites par des physiciens cherchant à étancher leur soif d'explorer une physique inconnue. Les physiciens espèrent, par ces « supers » accélérateurs, répondre aux questions les plus fondamentales : la structure profonde de l'espace et du temps, comment l'univers a commencé et évolué, mécanismes quantiques et la relativité générale. Ces outils peuvent considérablement améliorer notre compréhension de l'univers et de l'être humain. 99% des accélérateurs fonctionnant actuellement sont en fait des outils pour des applications diverses, comme par exemple, la science médicale, la biologie, la recherche sur la fusion, le traitement du cancer, *etc.*

Une médaille a deux faces. Alors que ces accélérateurs offrent beaucoup d'opportunités, ils deviennent extrêmement coûteux. Ces grandes installations sont généralement financées par plusieurs pays dans le cadre de projets internationaux. Pour avoir une idée : le budget du projet européen XFEL est de 1,1 milliards d'euros, financés par treize pays. La production de particules chargées plus énergétiques conduiraient à une

taille et un coût des accélérateurs prohibitifs. Dans ce contexte, les physiciens ont commencé à réfléchir la question : existe-t-il un schéma alternatif pour produire des particules atteignant des énergies plus élevées tout en réduisant la taille des accélérateurs, et donc leur coût ?

L'énergie acquise par une particule chargée dans un accélérateur est déterminée par le produit du gradient d'accélération et de la distance. Afin de réduire la taille de l'accélérateur, le gradient d'accélération doit être augmenté. Pour surmonter la limitation sur le gradient d'accélération par champs électromagnétiques dans une cavité RF, Tajima et Dawson ont les premiers proposé d'accélérer des électrons par une onde de plasma en 1979 [1]. Le concept repose sur l'utilisation des champs électriques élevés associés à la séparation des charges dans le plasma. Des champs électriques de l'ordre de  $\sim 100$  GV/m peuvent être maintenus dans un plasma, ce qui est de trois à quatre ordres de grandeur plus élevé que dans les accélérateurs RF classiques. C'est-à-dire qu'on pourra en principe diminuer la taille des accélérateurs par trois à quatre ordres de grandeur en utilisant l'onde de plasma comme moyen d'accélération. En outre, un rayonnement synchrotron ultra-bref, appelé rayonnement bêatron, est produit lors de l'accélération des électrons lorsque ces derniers, soumis au champ électrique radial de la bulle plasma, ont une trajectoire oscillante.

L'objectif de ce travail est d'étudier l'accélération d'électrons par sillage laser et le rayonnement bêatron associé dans des tubes capillaires diélectriques. Cette thèse est surtout consacrée à l'étude du seuil du régime de la bulle (Figure 1), régime non-linéaire de l'interaction laser-plasma dans des tubes capillaires pour des intensités laser dans la gamme  $10^{18}$  -  $10^{19}$  W/cm<sup>2</sup>. Pendant l'étude, de nombreux efforts ont été consacrés à la conception d'un nouveau système de contrôle du remplissage du gaz dans des tubes capillaires, des expériences et des simulations hydrodynamiques ont permis de caractériser spatialement et temporellement l'évolution de la densité du gaz dans des tubes capillaires. Ce travail a été effectué au LPGP. Deux campagnes d'expérience ont été réalisées au Centre Laser de Lund (LLC) en Suède, où le rôle des tubes capillaires concernant le guidage laser sur l'accélération des électrons, la génération du rayonnement X, la stabilité du faisceau d'électrons ont été examinées. Les résultats obtenus à partir de ces expériences sont présentés dans la thèse.

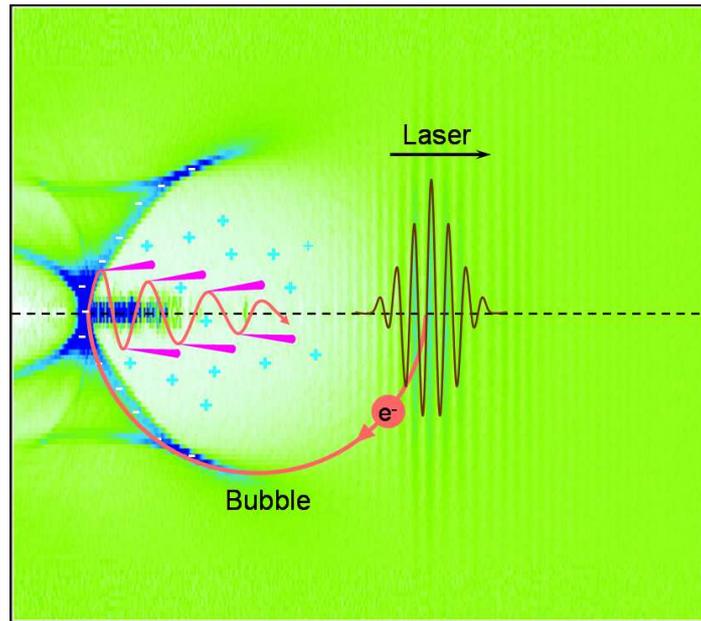


Figure 1. Schéma de l'accélération d'électrons dans une bulle de plasma générée par une impulsion laser. L'oscillation transverse des électrons dans la bulle produit un rayonnement synchrotron (communément appelé rayonnement bêtatron).

## II. Résultats de thèse

### 2.1 Caractérisation de la densité de gaz dans des tubes capillaires

Nous avons étudié l'évolution temporelle de la distribution de gaz dans des tubes capillaires. Une simulation numérique a été réalisée en régime d'écoulement fluide afin d'obtenir la distribution spatiale du gaz à l'état stationnaire le long de l'axe central du tube capillaire. Les résultats obtenus démontrent que le milieu gazeux est stable, uniformément réparti entre les deux fentes du tube capillaire. Il existe un fort gradient entre la fente et la sortie du capillaire, comme montré sur la Figure 2. Des simulations de régimes transitoires révèlent que l'état stationnaire peut être atteint à  $t > 40 \mu\text{s}$  pour un modèle capillaire 2D (Figure 2), mais il est au-delà du domaine de validité des calculs faits de rendre compte du remplissage réel du capillaire car il nous est impossible de calculer l'évolution du gaz dans un modèle 3D.

Le processus temporel de remplissage de gaz dans le tube capillaire a été déterminé en utilisant un dispositif développé par l'auteur, basé sur un interféromètre de Mach-Zehnder [2]. Pour un tube capillaire de longueur 30 mm et de diamètre 178  $\mu\text{m}$ , le gaz au sein du tube atteint l'état stationnaire  $\sim 34 \text{ ms}$  après l'ouverture de la vanne (Figure 3). Les

vibrations de la vanne et la propagation du gaz au sein des conduits induisent une fluctuation de  $\sim 6\%$  de la densité de gaz dans l'état stationnaire. Pour l'état stationnaire, il existe une relation linéaire entre la densité du gaz dans le tube et la pression du réservoir. Finalement, le gaz utilisé pour le remplissage du capillaire fuit vers la chambre à vide par deux petits trous à l'extrémité des capillaires, le temps de vidage caractéristique est de l'ordre de la seconde. Il a également été constaté que le processus de remplissage du gaz d'hydrogène est saturé, même pour le plus court temps d'ouverture de la valve (27 ms), ce qui implique que l'augmentation de la durée d'ouverture ne ferait qu'apporter plus de gaz dans la chambre à vide sans améliorer l'efficacité de remplissage de gaz. En revanche, en raison d'une vitesse de propagation plus faible, la pression de remplissage du gaz d'argon peut être augmentée en augmentant le temps d'ouverture jusqu'à 60 ms.

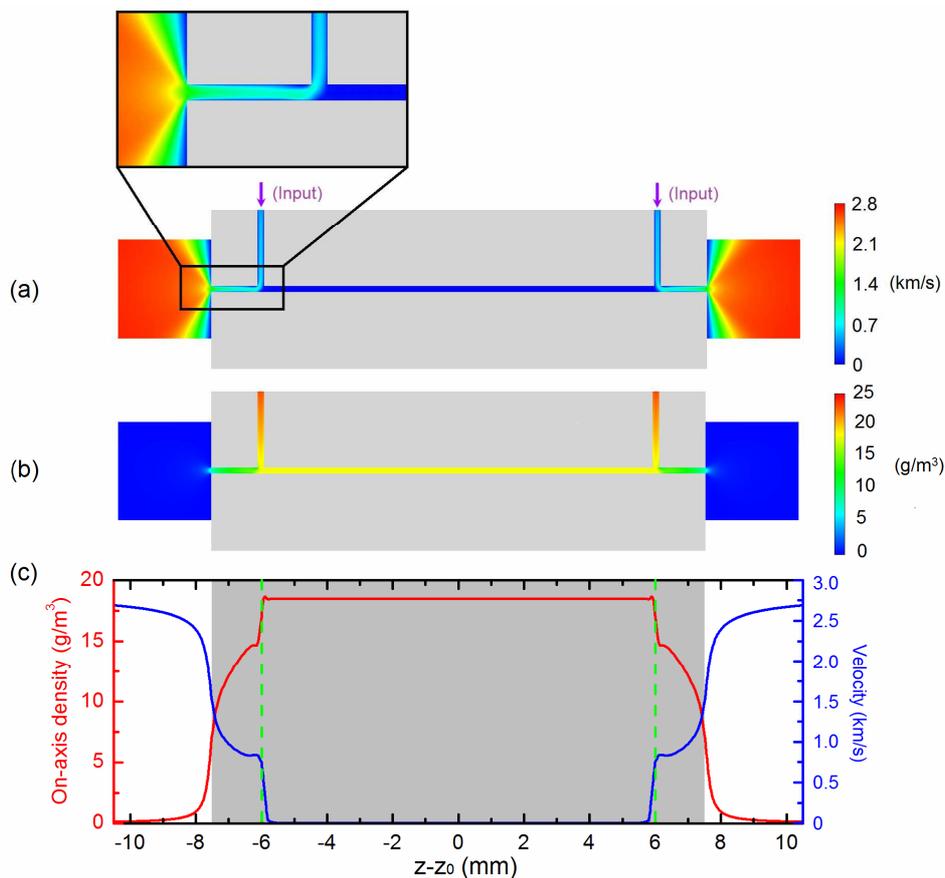


Figure 2. (a) La vitesse et (b) les distributions de densité du gaz hydrogène à l'état stationnaire à l'intérieur d'un tube capillaire pour une pression d'entrée de 300 mbar. La distribution de gaz à la sortie du capillaire est agrandie. Les zones grisées sont le

matériau du capillaire. (c) La densité et la vitesse du gaz sur l'axe en fonction de la distance le long du tube capillaire ont été calculées ( $z=0$  est le centre du tube). Les deux lignes pointillées indiquent les positions des deux fentes.

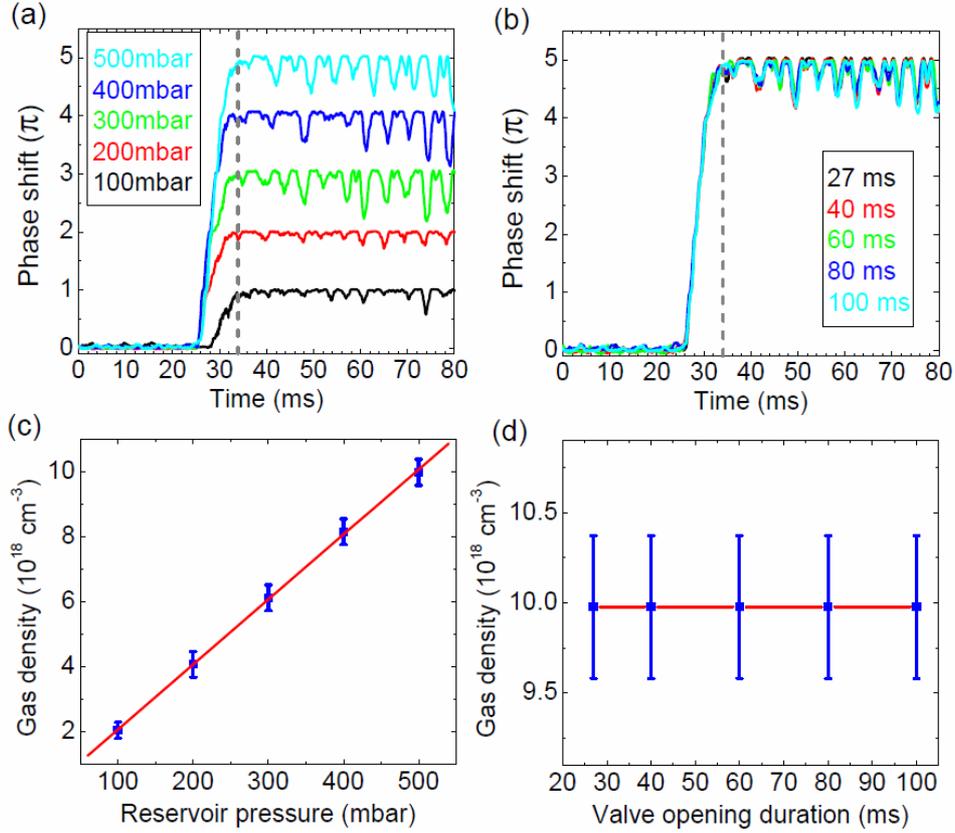


Figure 3. Décalage de phase en fonction du temps pour différentes valeurs de (a) la pression du réservoir et une durée de 27 ms d'ouverture de la valve, et (b) la durée d'ouverture de la valve et une pression de réservoir de 500 mbar. (c) et (d) montrent la densité des plateaux de gaz à  $t = 34$  ms obtenue à partir de (a) et (b), respectivement. Les barres d'erreur indiquent les écarts-type des fluctuations de densité de gaz à l'état stationnaire ( $t = 34$  à 80 ms). Le tube capillaire a une longueur de 30 mm et un diamètre de 178  $\mu\text{m}$ .

## 2.2 Electrons et rayonnements X

Afin d'étudier l'accélération d'électrons par sillage laser dans le régime non-linéaire avec guidage par le tube capillaire, le laser au LLC a été focalisé à une intensité maximale de  $5,4 \times 10^{18} \text{ W/cm}^2$  ( $a_0 = 1,6$ ) dans le vide. Les électrons observés avaient soit une distribution piquée avec une largeur d'énergie (FWHM) de 16%, soit élargie avec une distribution à décroissance exponentielle avec l'énergie. Dans un tube capillaire de 10 mm

de long et 178  $\mu\text{m}$  de diamètre (Figure 4), des faisceaux d'électrons avec une charge l'ordre de quelques dizaines de pC étaient généralement accélérés avec une énergie maximale de 300 MeV. L'énergie des électrons diminue avec l'augmentation de la densité du plasma, conformément à la loi d'échelle prédite par Lu et al. [3]. La comparaison des données expérimentales avec cette loi d'échelle indique en outre que l'intensité du laser est amplifiée par l'auto-focalisation et auto-compression dans le plasma jusqu'à en moyenne  $a_0=2,6$ . Par ailleurs, la charge du faisceau d'électrons produit atteint un maximum pour une densité de plasma autour de  $8 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ . En effet, l'auto-injection d'électrons n'est pas efficace pour des densités plus faibles; d'autre part, la charge du faisceau est limitée par le raccourcissement de la longueur de déphasage et de la longueur d'amortissement laser, et par la force de charge d'espace lorsque la densité du plasma augmente.

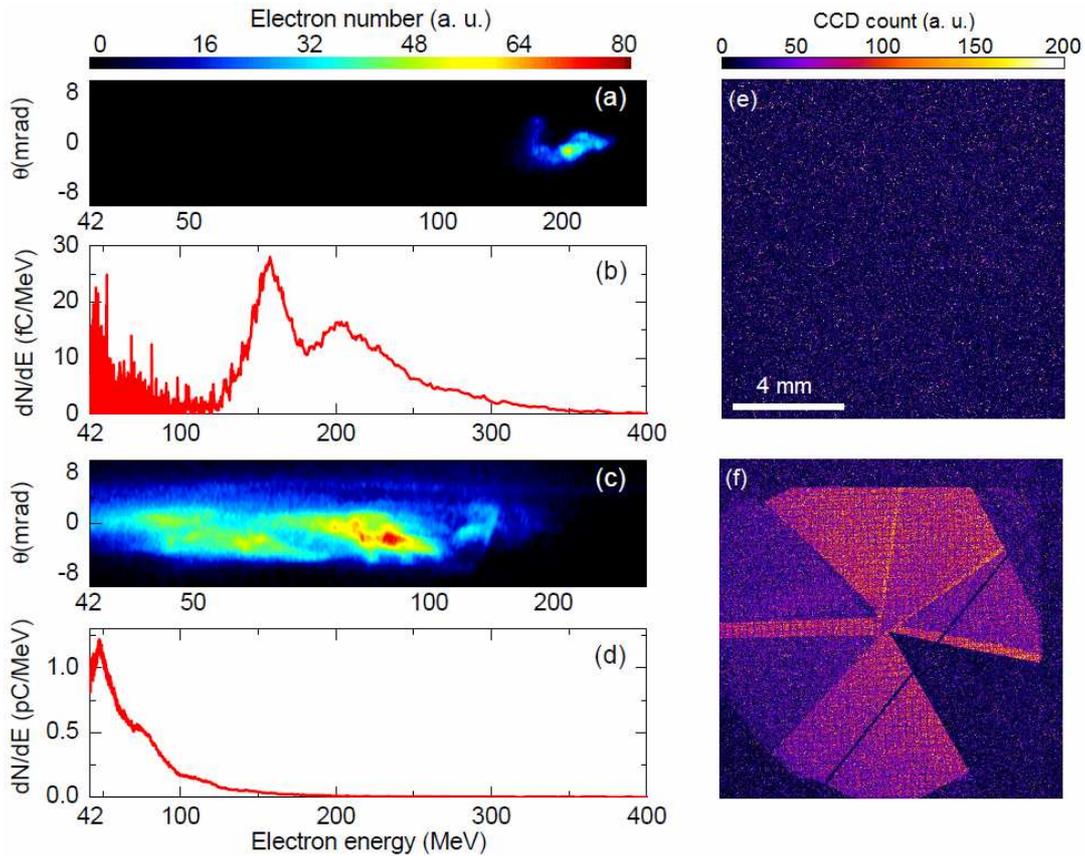


Figure 4. Images et profils intégrés spectres d'électrons mesurés pour un tube capillaire de 10 mm de long et 178  $\mu\text{m}$  de diamètre aux densités de plasma: (a) - (b)  $(5,4 \pm 0,3) \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ , et (c) - (d)  $(8,1 \pm 0,5) \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ . (e) - (f) sont les images des faisceaux de rayonnement X correspondantes.

Le rayonnement X bêtatron constitué de photons d'énergie dans la gamme 1-10 keV a été mesuré avec une fluence crête de  $5,7 \times 10^5$  photons/mrad<sup>2</sup>. La fluence du faisceau X est très sensible à la variation de la charge du faisceau d'électrons, et présente un maximum à la même densité de plasma que la charge. La relation entre la charge du faisceau et la fluence du rayonnement X a en outre permis de déduire que le nombre d'oscillations bêtatron effectuées par un électron à l'intérieur de la bulle de plasma est  $N = 4 \pm 2$ . Le maximum de luminosité du rayonnement X est estimé à de l'ordre de  $\sim 10^{21}$  photons/s/mm<sup>2</sup>/mrad<sup>2</sup>/0.1% BW, ce qui est environ 30 fois plus élevé que dans le cas d'un jet de gaz de 2 mm, et souligne le rôle du guidage par le capillaire.

La dynamique de l'accélération des électrons, diagnostiquée à l'aide du profil de l'intensité de rayonnement X dans le champ lointain, indique que l'interaction laser-plasma se termine lorsque le laser de pompe est amorti, à environ  $z = 8$  mm pour une densité de plasma  $8,1 \times 10^{18}$  cm<sup>-3</sup>. Les simulations PIC en 3 dimensions reproduisent raisonnablement bien les résultats expérimentaux. Elles montrent que l'intensité du laser est amplifiée jusqu'à  $a_0 > 3$  pour une densité de plasma de  $8 \times 10^{18}$  cm<sup>-3</sup> et qu'un nombre important d'électrons est piégé dans la première bulle de plasma, formant un paquet de 10 fs. Le spectre du rayonnement calculé s'écarte du cas synchrotron typique, mais est similaire au spectre correspondant à une distribution d'électrons accélérés comme le montre le chapitre 3. Les simulations PIC montrent également que les électrons accélérés rattrapent finalement l'impulsion laser et sont dispersés par la force pondéromotrice du laser. Les électrons dispersés entrent dans les parois du capillaire s'il est assez long, générant un rayonnement de freinage avec des photons dont l'énergie s'étend à la gamme des rayons gamma. Ce rayonnement produit une large illumination secondaire sur le détecteur de rayons X.

### 2.3 Caractérisation de la stabilité des faisceaux d'électrons et de la taille de la source du faisceau X

La stabilité du faisceau d'électrons généré a été examinée. Il présente une reproductibilité tir-a-tir avec des fluctuations de quelques pour cent en énergie, et autour de 20% RMS en charge du faisceau et en divergence (Figure 5). La charge et la divergence présentent une corrélation linéaire et l'instabilité de la charge du faisceau est sensible aux fluctuations d'énergie (puissance) du laser. Cela suggère que l'énergie du

laser doit être soigneusement stabilisée afin de diminuer les fluctuations du faisceau. Le faisceau d'électrons possède une fluctuation de pointé de  $\sim 1$  mrad lorsque le pointé du laser est stabilisé, ce qui est d'un grand intérêt pour le transport et l'utilisation ultérieure du faisceau. En outre, la taille de la source de rayons X a été évaluée à l'aide de la diffraction de Fresnel induite par une lame de rasoir. En supposant une source spatialement cohérente avec un spectre synchrotron, la courbe calculée théoriquement avec une taille de source (en  $1/e^2$  de l'intensité, taille d'une distribution gaussienne) de  $1,5 \mu\text{m}$  et une énergie critique de  $6 \text{ keV}$  reproduit bien le diagramme de diffraction expérimental. La différence entre les résultats théoriques et expérimentaux a probablement pour cause une absorption partielle des photons de rayons X dans une partie de la lame de rasoir. Par conséquent, certains photons émis sont déviés et se chevauchent avec les photons diffractés, provoquant le dépassement observé de l'intensité des rayons X dans les expériences. En utilisant une taille moyenne de la source de  $r_s = 2,5 \mu\text{m}$ , nous sommes capable de calculer la limite supérieure correspondante de l'émittance normalisée RMS du faisceau d'électrons qui est  $0.83\pi \text{ mm mrad}$ .

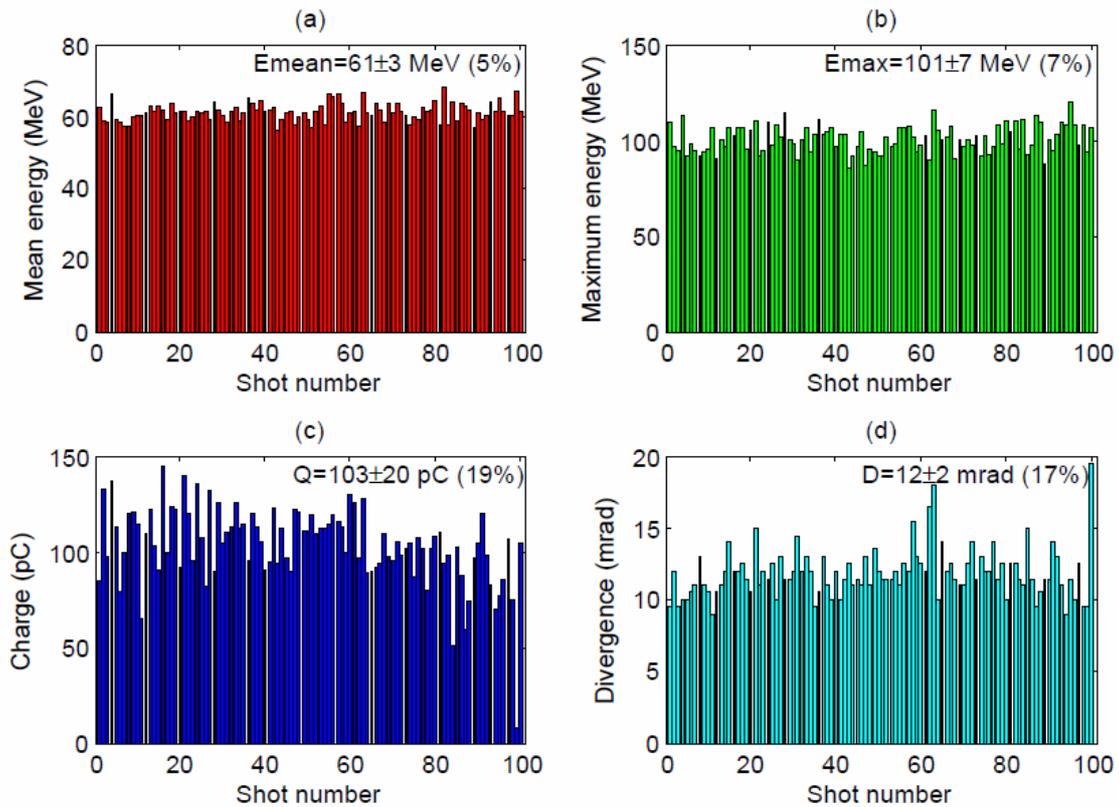


Figure 5. (a) Energies moyennes, (b) énergies maximales, (c) charges, et (d) divergences des faisceaux d'électrons de 100 tirs consécutives avec un tube capillaire de 10 mm de

long à une densité plasma  $8,3 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ .

### **III. Perspective**

Comme présenté dans cette thèse, même si les accélérateurs laser plasma ont fait d'énormes progrès au cours des dernières décennies, la plupart des électrons générés sont toujours dans une gamme d'énergie inférieure au GeV. Une des perspectives est donc de pousser l'énergie d'électrons à plusieurs GeV ou encore au TeV. Une façon d'augmenter l'énergie des électrons de sortie pourrait être le concept de l'accélération par l'onde de plasma généré par un faisceau de protons, mais un faisceau de protons d'énergie de l'ordre du TeV doit être obtenu au préalable avec un accélérateur RF. Un autre programme attrayant est l'accélération laser-plasma avec plusieurs étages, qui est à l'étude dans notre groupe et devrait être exploré expérimentalement dans le cadre du projet CILEX (Centre Interdisciplinaire Lumière Extrême) en France.

## Bibliographie

- [1] T. Tajima and J. M. Dawson, "Laser Electron Accelerator," *Physical Review Letters*, vol. 43, p. 267, 1979.
- [2] J. Ju and B. Cros, "Characterization of temporal and spatial distribution of hydrogen gas density in capillary tubes for laser-plasma experiments," *Journal of Applied Physics*, vol. 112, p. 113102, 2012.
- [3] W. Lu, *et al.*, "Generating multi-GeV electron bunches using single stage laser wakefield acceleration in a 3D nonlinear regime," *Phys. Rev. ST Accel. Beams*, vol. 10, p. 061301, 2007.