

# Modélisation de l'accélération d'électrons par laser avec un code



## Particle-in-Cell (PIC)

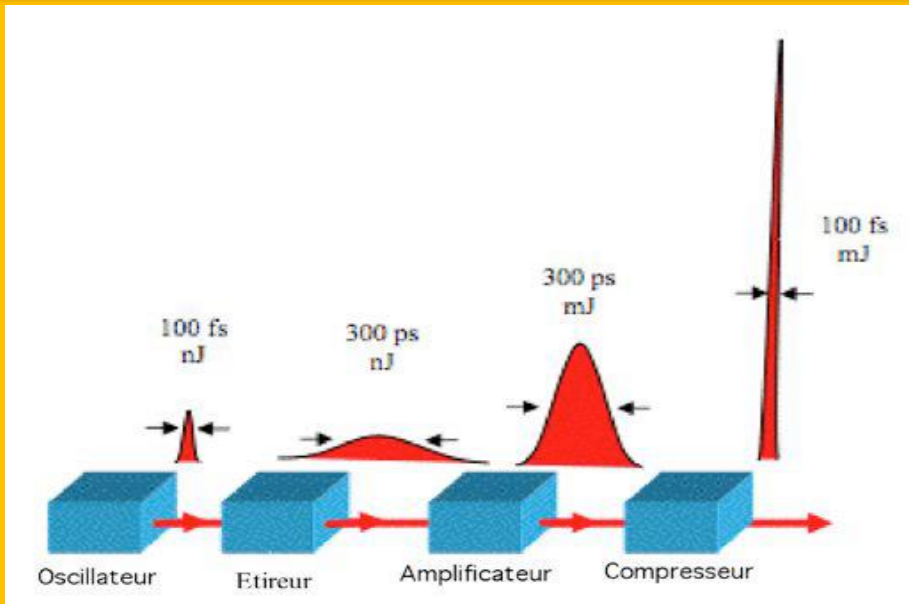
Romain Hédot, Emmanuel d'Humières  
 hedot@celia.u-bordeaux1.fr, dhumieres@celia.u-bordeaux1.fr



### Objectif du stage:

Ce stage a pour but d'étudier l'accélération des électrons dans un plasma par une onde laser ultra intense à travers un code PIC. À partir des résultats obtenus dans un cas précis on cherchera à comprendre les mécanismes physiques régissant le mouvement des électrons accélérés. Les électrons étant des particules légères qui atteignent facilement des vitesses élevées cette étude se fera dans un cadre relativiste. On étudiera tout d'abord les accélérations traditionnelles où le laser frappe directement des cibles peu denses. On fera ensuite l'étude d'un cas spécifique correspondant à des expériences réalisées en Inde où le laser frappe légèrement au dessus d'une cible solide. Le laser étant très intense une phase de pré-chauffage à lieu avant son arrivée, qui permet d'arracher les électrons de surface de la plaque provoquant la formation d'un pré plasma devant la cible. Le laser va ensuite frapper l'ensemble et accélérer les électrons. La dernière partie du stage aura pour but d'étudier les résultats afin de les comparer aux accélérations traditionnelles.

### Outils Physiques et numériques :

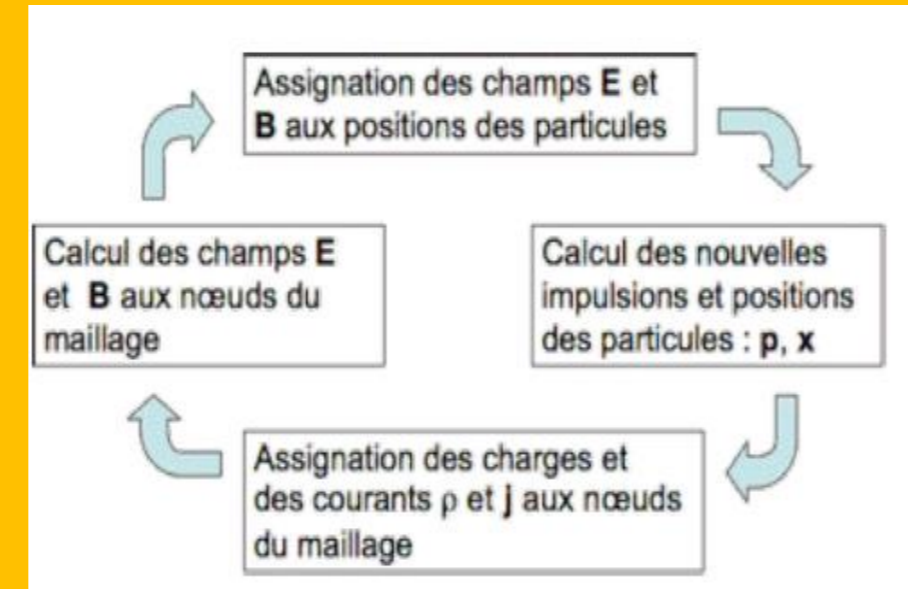


L'accélération des électrons se fait à l'aide d'un faisceau laser très intense ( $>10^{18} \text{ W.cm}^{-2}$ ) et très court ( $\tau < 1 \text{ ps}$ ) créée via la technique CPA (Chirped pulse amplification). Le plasma contenant les particules est un plasma non collisionnel dans lequel on ignore les interactions directes.

L'accélération des électrons lors de l'interaction laser matière pour un plasma à faible densité se fait via trois voies possibles:

- **Le sillage auto-modulé** : La durée d'impulsion laser est initialement trop élevée pour la formation de bulle, mais le plasma va moduler et adapter le laser à l'onde plasma générée par la première impulsion. Ce phénomène a lieu pour de grandes valeurs de  $\tau$ .
- **Le sillage forcé** : Le laser utilisé est un laser CPA extrêmement intense, le spectre en énergie des électrons sera très large, l'accélération très élevée sera globale. Cette méthode permet d'atteindre des énergies très élevées mais sans un contrôle total du processus. On pourra le visualiser pour de grande valeur de  $E_y$
- **Le régime de bulle** : c'est le régime le mieux contrôlé, il permet d'obtenir des électrons monoénergétiques. Pour l'obtenir, le laser doit respecter deux conditions :  $\tau < 1/\omega_{pe}$  et  $f_{whm} < c/\omega_{pe}$  ( $f_{whm}$  = largeur à mi hauteur de l'impulsion laser)

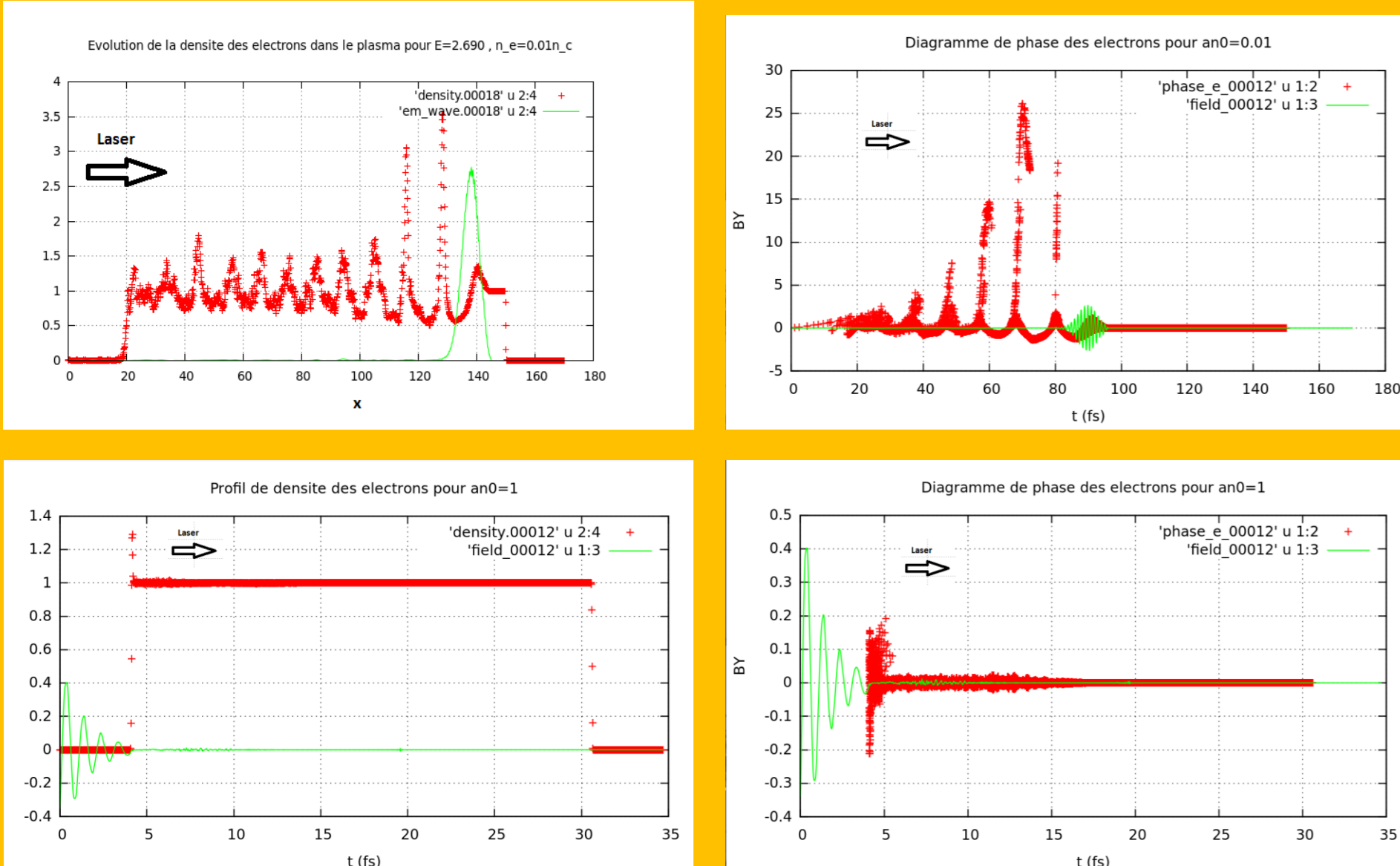
Le suivi de l'accélération des électrons se fait à l'aide d'un code PIC: code effectuant la résolution des équations de Maxwell couplées aux équations cinétiques relativistes des électrons. Ce code est un code cinétique permettant d'accéder à de nombreuses données sur les électrons.



### Résultats

#### 1ère partie : Prise en main du code et étude de l'interaction laser plasma.

Dans un premier temps en faisant varier grossièrement certains paramètres (densité du plasma  $n_0$ , amplitude du laser  $E_y$ , épaisseur du plasma  $e$ ) on cherche à observer les différentes notions importantes de l'accélération d'électrons par laser. Ces modélisations sont rapides (quelques minutes) et ne nécessitent qu'un seul processeur.

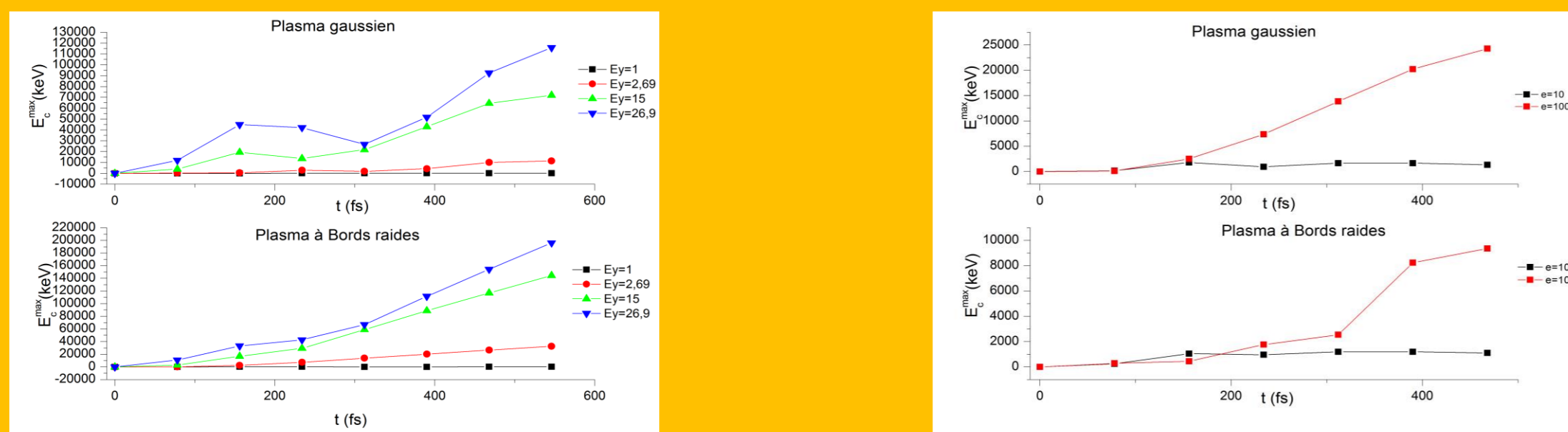


Dans le cas où le plasma est peu dense ( $n_0=0,01$ ) et soumis à un champ laser intense ( $E_y=2,69 \times 10^{19} \text{ W/cm}^2$ ) il est possible d'observer la formation d'une structure oscillante dans le sillage du laser appelée **onde plasma** qui permet l'accélération des électrons. On a la formation de pic d'impulsion visible dans le diagramme de phase qui correspondent aux électrons accélérés. Cette onde plasma s'accompagne d'un champ accélérateur.

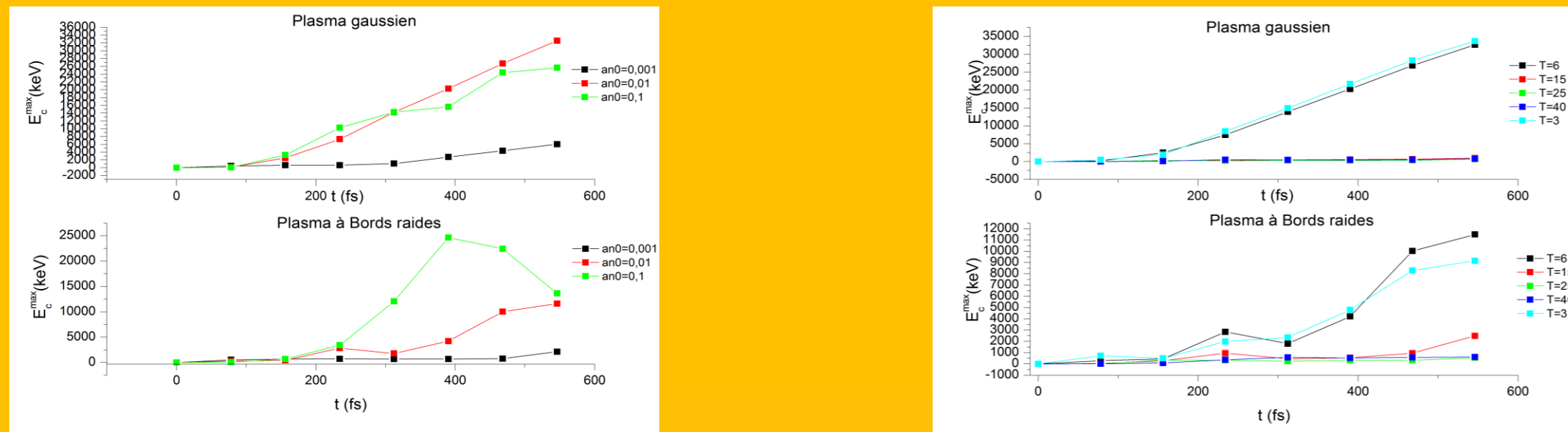
Dans le cas où la densité est trop élevée ( $n_0=1 \Rightarrow n_e=n_c$ ), l'onde laser est **totale réfléchi**, les électrons de bords sont légèrement accélérés. Cette accélération se propage dans le plasma mais reste faible. On ne peut donc pas dépasser une certaine densité dite « densité critique ».

Dans un deuxième temps afin de mieux saisir le fonctionnement de l'accélération par laser, on fait varier les paramètres (épaisseur  $e$ , densité  $n_0$ , amplitude laser  $E_y$ , durée d'impulsion  $\tau$ ) afin d'observer les limites et les mécanismes de ce type d'accélération. Pour cela on étudiera l'évolution de l'énergie cinétique maximale reçue par les électrons au cours de la simulation. Cette étude sera faite pour un cas simple : le plasma à bords raides et pour un cas plus réaliste: le plasma gaussien.

L'énergie cinétique sera calculée de manière relativiste à l'aide de la formule suivante :  $E_c = (\sqrt{1 + (\beta\gamma)^2} - 1)mc^2$

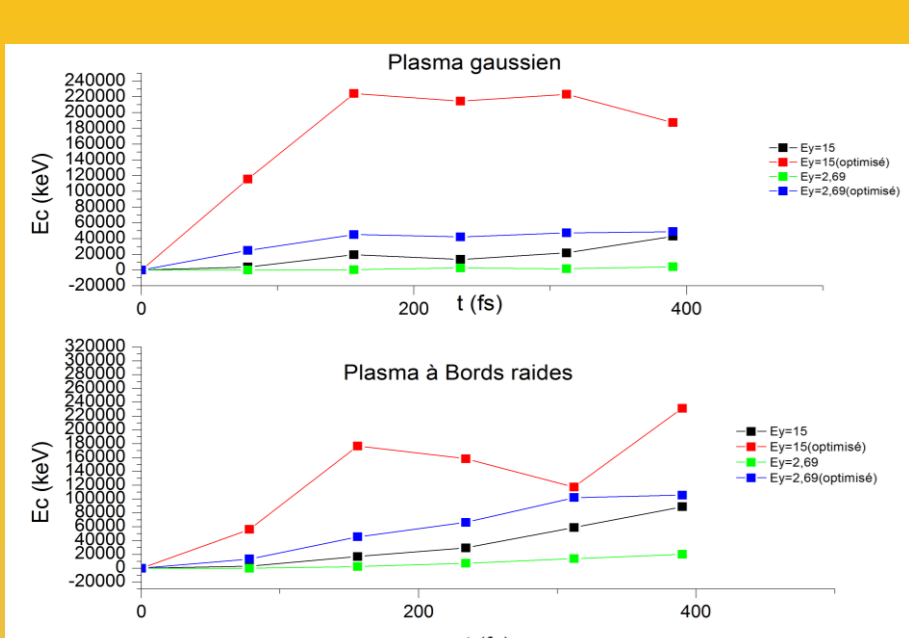


- Plus le champ électrique augmente, plus l'accélération est élevée (il y a plus d'énergie disponible pour les électrons).
- Plus le plasma est épais, plus l'accélération est élevée, cependant une limite existe si le plasma est trop épais, le laser ne sera pas assez puissant pour accélérer les électrons sur toute la longueur du plasma.



Dans le cas où on fait varier la densité du plasma ( $n_0$ ) et la durée de l'impulsion laser ( $\tau$ ) on observe une évolution différente des deux cas précédents. En effet si la densité ou la durée d'impulsion laser est trop faible l'accélération est inexistante, cependant des valeurs trop élevées de densité et de durée d'impulsion amènent au même résultat. Il y a donc pour ces deux paramètres la présence de **valeurs optimales**, pour lesquelles l'accélération est maximale, une étude à temps fixé permet de les déterminer.

La valeur de la durée d'impulsion est limitée par la période de l'onde plasma créée. En effet pour que l'accélération soit efficace on doit avoir:  $\tau < 1/\omega_{pe}$



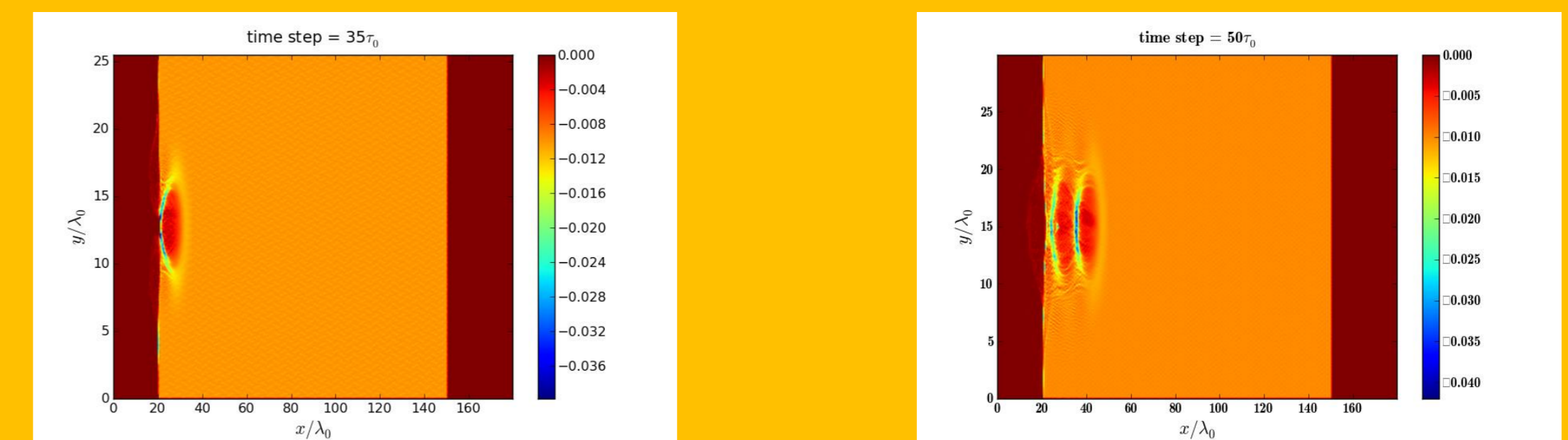
En regroupant les résultats précédant, il est possible théoriquement d'optimiser l'accélération des électrons pour un **coût énergétique identique**. Cette étude est effectuée à la fois pour un plasma gaussien et à bords raides. Pour deux intensités laser, nous avons combiné les paramètres optimaux:

- $E_y=15$ ;  $n_0=0,06$ ;  $e=800\mu\text{m}$ ;  $\tau=5$  (gaussien) (optimisé)
- $E_y=15$ ;  $n_0=0,01$ ;  $e=800\mu\text{m}$ ;  $\tau=6$  (gaussien) (non optimisé)
- $E_y=15$ ;  $n_0=0,01$ ;  $e=600\mu\text{m}$ ;  $\tau=4$  (raide) (optimisé)
- $E_y=15$ ;  $n_0=0,01$ ;  $e=800\mu\text{m}$ ;  $\tau=6$  (raide) (non optimisé)
- $E_y=2,69$ ;  $n_0=0,06$ ;  $e=800\mu\text{m}$ ;  $\tau=5$  (gaussien) (optimisé)
- $E_y=2,69$ ;  $n_0=0,01$ ;  $e=800\mu\text{m}$ ;  $\tau=6$  (gaussien) (non optimisé)
- $E_y=2,69$ ;  $n_0=0,01$ ;  $e=600\mu\text{m}$ ;  $\tau=4$  (raide) (optimisé)
- $E_y=2,69$ ;  $n_0=0,01$ ;  $e=800\mu\text{m}$ ;  $\tau=6$  (raide) (non optimisé)

Les résultats obtenus confirment bien cette étude, en effet, avec les paramètres optimisés on obtient une accélération supérieure au cas de base. Il est même possible pour un **coût énergétique moindre d'obtenir une accélération supérieure**. En effet on voit bien que l'accélération obtenue avec  $E_y=15$  (non optimisé) est inférieure à celle obtenue pour  $E_y=2,69$  (optimisé). Cela est dû au fait qu'avec de tels paramètres le laser et l'onde plasma s'accordent parfaitement.

#### 2ème partie : Utilisation d'un code PIC 2D.

La simulation 1D n'étant pas représentative de ce qui se passe réellement lors de l'interaction laser matière. Pour avoir une approche plus réaliste et phénoménologique on utilise un code PIC 2D. De telles modélisations nécessitent plusieurs processeurs et peuvent prendre jusqu'à plusieurs jours.

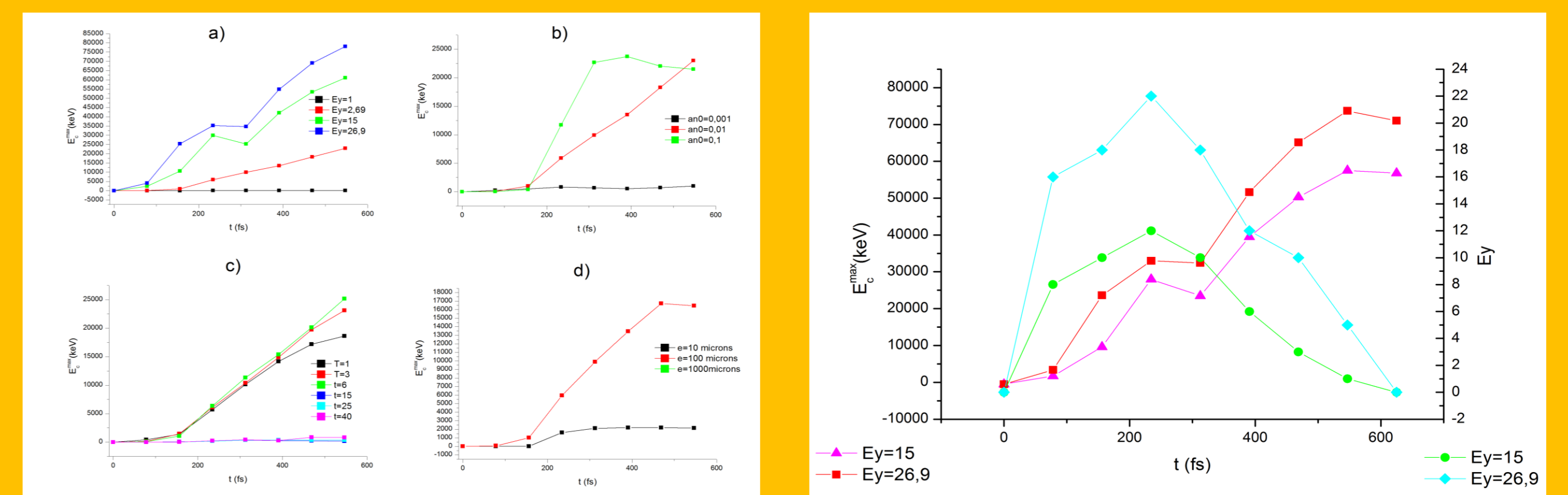


L'observation du profil de densité lors de l'interaction nous permet de visualiser des processus ayant lieu lors de l'accélération mais étant invisibles en 1D.

Ici, on peut voir le phénomène ayant lieu lors du passage du laser et permettant l'accélération des électrons: c'est le **régime de bulle**. Ce régime est caractérisé par de fortes différences dans la répartition des électrons: forte concentration autour de la bulle (bleu) et absence d'électron dans la bulle (rouge).

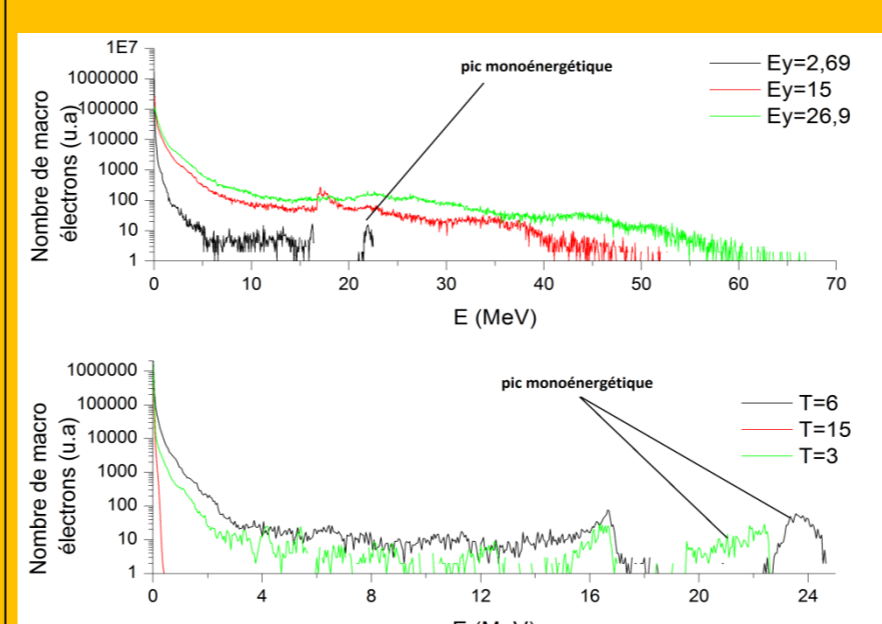
Les électrons tournent autour de la bulle avant de pénétrer dans celle-ci sous l'action combinée du laser et des forces coulombiennes dues à la différence de charge.

À l'intérieur de la bulle les électrons, soumis à une très grande force coulombienne, sont accélérés. Cette accélération a lieu en majeure partie dans l'axe de propagation du laser (ici selon les x croissants).



L'étude paramétrique nous fournit des résultats identiques à ceux obtenus en 1D. Une seule grande différence apparaît, l'accélération semble beaucoup plus faible en 2D. Cela est dû aux possibilités de déplacement des électrons, ici selon les x et les y et à la présence des gradients de densité selon l'axe y aussi bien pour le champ que pour les électrons.

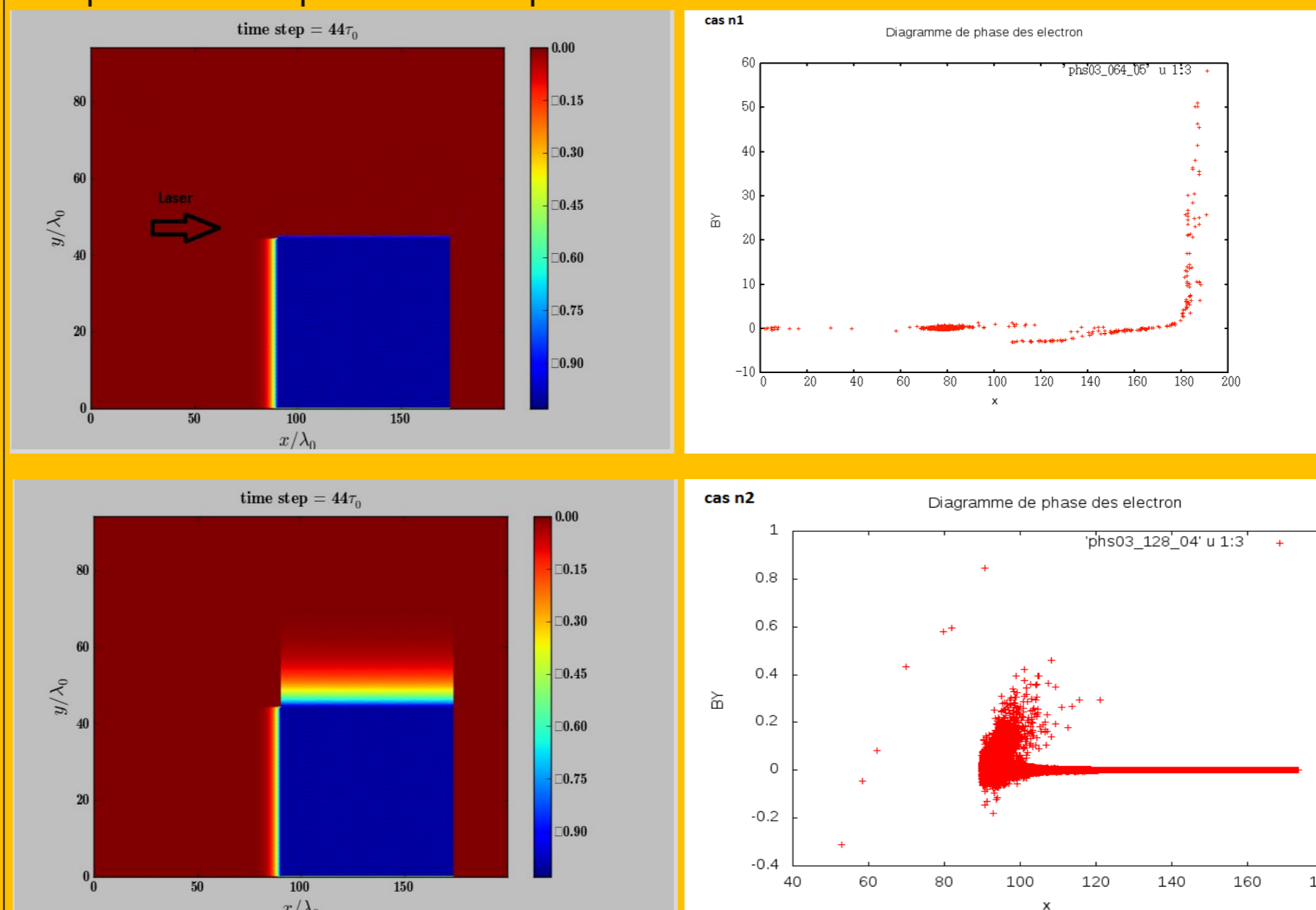
La figure de droite sert à expliquer la baisse d'énergie cinétique acquise par les électrons. Les deux axes représentent l'énergie cinétique maximale acquise par les électrons (gauche) et la valeur instantanée du champ électrique (droite). L'inflexion observée à lieu au niveau du point de focalisation du faisceau ( $x_f=80$  microns). En effet à cet instant, deux phénomènes ont lieu: tout d'abord au-delà de ce point, le champ instantané va s'affaiblir, ensuite, un déphasage a lieu, les électrons voient alors la phase descendante (non accélératrice) du champ. Au bout de quelques dizaines de femtosecondes les électrons sont de nouveau en phase avec les champs et bien qu'il soit plus faible il reste suffisant pour accélérer les électrons.



Pour compléter cette étude on effectue une comparaison des spectres en énergies obtenus pour les différentes valeurs d'intensité et de durée d'impulsion du laser. Il est alors possible de visualiser des structures mono-énergétiques, signe de l'accélération des électrons via le régime de bulle. Au contraire pour des intensités trop élevées, le régime de bulle n'est pas mis en place, l'accélération est globale et permet d'atteindre des énergies plus élevées mais avec moins de contrôle sur le processus.

#### 3ème partie : Etude du cas utilisé en Inde (pré plasma exponentiel)

Ici la cible est constituée d'un plasma épais précédé d'un pré-plasma exponentiel selon l'axe des x (cas 1) et selon les deux axes (cas 2). Le laser ( $E_y=1,9$ ) ne frappe pas directement la cible, il frappe le coin supérieur gauche de la cible. Pour effectuer de telles simulations il a fallu 256 processeurs qui ont tournés pendant 100h.



Le cas 1 (graphique en haut) permet d'obtenir une accélération élevée des électrons ( $E_c=28 \text{ MeV}$ ) avec quelques particularités: tout d'abord on observe un spectre en énergie continu. Dans cette configuration, les électrons sont accélérés selon les x croissants. Cette étude n'est pas complète, les résultats étant très récents.

Pour le cas 2, le laser arrive avec un certain angle par rapport à la normale, il se propage selon les x et y croissants et frappe le coin gauche du plasma. La densité du pré plasma en y est cependant trop importante pour obtenir une accélération correcte, seuls les électrons de bords sont accélérés.

### Conclusion

Durant ce stage nous nous sommes donc intéressés à l'accélération des électrons par laser. Nous avons notamment étudié les mécanismes (onde plasma, régime de bulles) ayant lieu lors de telles interactions via des simulations 1D et 2D. Nous avons de même observé certaines limites et conditions nécessaires à l'accélération (densité critique, durée d'impulsion laser). Pour finir, l'étude d'un cas spécifique correspondant à une expérience qui a eu lieu en Inde nous a permis de visualiser les avantages et les inconvénients d'utiliser un pré plasma exponentiel dans l'accélération des électrons.

Ces études effectuées en 1D et 2D représentent des approximations de ce qui se passe réellement, voir même une représentation proche de la réalité pour le 2D. Un moyen de visualiser et de comprendre, de manière complète et conforme à la réalité, les phénomènes mis en jeu est la modélisation 3D. Cependant celle-ci reste très « couteuse » en temps de calcul et n'a pas pu être abordée ici.

L'accélération d'électrons par laser présente donc de nombreux avantages, et s'implante dans de nombreux domaines (médecine, physique, ...). Un tel processus permettrait notamment d'obtenir des accélérateurs de particules sur de faibles distances et à faible coût énergétique.

### Références:

- [1] Emmanuel d'Humières, Accélération de protons par interaction laser plasma et applications, 2006
- [2] Clément Rechatin, Accélération d'électrons dans l'interaction laser-plasma: développement et caractérisation d'un injecteur optique, 2009
- [3] V.T Tikhonchuk, Plasma kinetic, 2012-2013
- [4] A Pukhov, A laser-plasma accelerator producing monoenergetic electron beams, Sciencesmag, 2004
- [5] V Malka, Electron Acceleration by a Wake Field Forced by an Intense Ultrashort Laser Pulse, Science, 2002