

---

# Contribution aux exercices de prospective nationale 2020- 2030

## *Accélérateurs et instrumentation associée*

---

### **SIMULATION PIC DE L'ACCÉLÉRATION LASER-PLASMA**

---

#### **Auteur principal**

Nom : Arnaud Beck

Affiliation : Laboratoire Leprince-Ringuet

Email et coordonnées : beck@llr.in2p3.fr

#### **Co-auteurs**

Francesco Massimo (LLR)

Emmanuel d'Humières (Université de Bordeaux)

Xavier Davoine (CEA DAM DIF)

Contribution à rédiger en français ou en anglais et à envoyer à [PROSP2020-GT07-COPIL-L@IN2P3.FR](mailto:PROSP2020-GT07-COPIL-L@IN2P3.FR)  
avant le **1<sup>er</sup> novembre 2019**

## 1. Informations générales

**Titre : Simulation PIC de l'accélération laser-plasma**

### Résumé

Ce document se concentre sur les besoins exprimés par la communauté du GDR APPEL en terme de simulations particle-in-cell (PIC) de l'accélération laser-plasma. Il présente deux objectifs principaux et les recommandations du GDR pour les atteindre. Il n'aborde pas les autres types de simulations (MHD, CFD, monte-carlo, transport, etc.).

***Préciser le domaine de recherche (plusieurs choix possibles)***

*o Accélération plasma (électrons, ions...) et interaction lasers/faisceaux*

***Préciser la motivation principale visée par la contribution :***

*o Accélérateurs pour la physique des particules*

*o Accélérateurs pour les sources de lumière ou de neutrons*

*o Accélérateurs pour les applications sociétales (santé, énergie, industrie...)*

## 2. Description des objectifs scientifiques et techniques

Les besoins en simulation PIC exprimés par la communauté représentée par le GDR APPEL peuvent se résumer en deux points distincts.

1) Des simulations ultra-rapides capables de fonctionner à "haute cadence", idéalement en un temps comparable au temps de l'expérience. Cela n'est possible qu'au prix de certaines approximations et donc de contraintes sur la physique simulée et d'une fidélité réduite. Ces simulations sont dites "réduites".

2) Des simulations ultra-réalistes capables de rendre compte de tous les aspects des expériences de manière quantitative. De telles simulations sont nécessairement beaucoup plus coûteuses en temps de calcul (besoin de ressources importantes sur les supercalculateurs les plus puissants). Ces simulations sont dites "haute-fidélité".

A ce jour, en France et à l'international, des travaux allant dans ces deux directions ont été effectués mais aucun de ces objectifs n'est proche d'être rempli. Le reste de cette partie liste l'ensemble des fonctionnalités et caractéristiques qui ont été identifiées comme nécessaires pour atteindre ces deux objectifs.

### Physique

Pour l'accélération laser-plasma, les ingrédients les plus importants sont couramment implémentés. Néanmoins, le développement d'un code PIC est également l'opportunité d'intéresser des communautés aux thématiques voisines pour lesquelles quelques modules physiques supplémentaires sont nécessaires. Certains de ces modules peuvent aussi servir à simuler des diagnostics ou des applications du LWFA des accélérateurs plasma.

1. Rayonnement (électrodynamique et physique atomique).
2. QED (processus d'électrodynamique quantique).
3. Collisions (élastiques et inélastiques).
4. Ionisation.
5. Description hybride PIC/MHD

### Méthodes numériques

Sont listées ici l'ensemble des méthodes numériques qu'un utilisateur devrait avoir à sa disposition pour pouvoir répondre aux besoins identifiés.

1. Géométries 3D et quasi-3D.
2. Conditions absorbantes PML.

3. Modèle d'enveloppe.
4. Boosted frame.
5. Raffinement de maillage.
6. Méthode anti-cherenkov (méthode spectrale, solveur FDTD avancé ...)
7. Conditions initiales réalistes.
8. Merge/split des particules.
9. Description fluide/hybride.
10. Approximation quasi-statique.
11. Transport de rayonnement

## **HPC**

Les technologies utilisées et supportées doivent être en adéquation avec le paysage HPC (High Performance Computing). Or celui-ci évolue de manière indépendante aux besoins de notre communauté qui doit donc constamment s'adapter.

1. Multi-architectures (CPU, GPU).
2. Parallélisation multi niveaux (MPI, openMP, SIMD, CUDA).
3. Équilibrage dynamique de charge.
4. I/O massivement parallèle.

## **Post processing et visualisation**

Dans le cas de simulations réduites exécutées à haute cadence, de nouveaux outils de post-processing permettant d'automatiser une analyse statistique des résultats est nécessaire.

Une approche de ce problème avec des techniques de machine-learning peut être une solution. Dans le cas des simulations massives, la quantité de données est telle que des outils de visualisation adaptés doivent également être mis en place. A ce jour, de tels outils existent déjà mais ils sont sur le point d'être dépassés par le déluge de données auquel on s'attend avec la génération de super-calculateur exascale.

Par ailleurs, afin de pouvoir mutualiser les efforts dans les domaines du post-processing et de la visualisation, il est nécessaire de s'entendre sur un standard de format de données de sortie des codes de simulation. Sur ce sujet, on peut citer le standard ``openPMD`` qui est déjà supporté par plusieurs codes majeurs du domaine.

### 3. Développements associés, calendrier et budget indicatifs

Tous les besoins listés dans ce document peuvent être développés et testés séparément dans des codes ``de pointe'' différents. Il est important que ces codes existent pour l'**exploration de nouvelles méthodes** et la **validation entre codes**. Ils demandent des compétences diversifiées en mathématique appliquée, physique, et informatique. Il faut donc faire émerger l'expertise à la croisée de ces domaines et favoriser les collaborations.

De plus , pour atteindre les objectifs définis en 2), il est crucial que les fonctionnalités identifiées soient **combinées**. L'objectif 1, par exemple, passera probablement par un code capable de gérer un modèle d'enveloppe en géométrie cylindrique avec une approximation fluide, peut être dans un boosted frame et probablement accéléré sur de nombreux GPU.

Rendre chacune de ces fonctionnalités compatibles entre elles est un premier défi. Les implémenter dans un même code ou les proposer sous forme de bibliothèque généraliste en est un autre.

Afin de faciliter ce travail et pour rendre l'ensemble des travaux d'une large collaboration plus efficace, il semble indispensable que de tels outils soient **libres, bien documentés et modulaires** afin de pouvoir être facilement partagés.

En effet, les notions d'accès libre ou de logiciels libres sont de plus en plus importantes dans le domaine de la recherche et de son financement (ANR, ERC, ...). Les développements libres permettent un meilleur partage des efforts et bénéfices, une plus grande fiabilité des outils développés. Ils assurent de plus une dynamique pérenne des logiciels en question (ici les codes de simulation). Ces aspects requièrent également qu'une documentation de qualité soit proposée et maintenue. Enfin, les outils développés en ce sens doivent être aussi modulaires que possible et fréquemment testés (intégration continue, unit test) afin que l'ajout de nouvelles contributions soit possible sans remettre en cause l'ensemble des structures.

**A ce jour, ces efforts sont trop peu soutenus et reconnus.** L'IN2P3 est peu engagé dans cette thématique avec seulement 1 IR. Toute initiative contribuant à la création d'un cadre plus favorable à la « collaboration numérique » devrait être supportée. Mais c'est un effort au long cours et avoir des permanents, avec le profil voulu, dédiés à cette activité est absolument décisif.

## 4. Impact

Ces travaux sont primordiaux pour la compréhension et la mise au point des accélérateurs laser-plasma. Ils aident à la conception et au choix des schémas d'accélération et des diagnostics, aux calculs de tolérances, à l'estimation des performances, etc. Ils accompagnent également l'analyse et l'interprétation des données.

Ils sont amplement guidés par les besoins des expérimentateurs qui sont ceux qui définissent véritablement les objectifs prioritaires et il existe de fortes coordinations entre équipes expérimentales et équipes numériques.

Le soutien de l'institut à cette thématique doit avoir pour objectif de renforcer les collaborations entre équipes numériques afin de permettre aux différents développements d'être pérennisés et aux équipes françaises de garder la maîtrise des meilleurs techniques numériques et codes.

Dans le cadre d'une collaboration renforcée, ces travaux profiteraient aussi plus facilement et plus rapidement à une communauté plus large et auraient donc une plus grande valeur ajoutée à moindre coût.

L'IN2P3 peut jouer un rôle dans la création de la « masse critique » nécessaire à l'agrégation des différentes expertises du paysage national et international.

## Références

Pour complémentarité, nous rappelons ci-dessous le résumé des recommandations de la National Academy of Science (USA) pour la simulation numérique de plasmas 2020-2030 qui ont été signées par la majeure partie de la communauté internationale dans le domaine des accélérateurs laser plasma dans le « White paper for the 2020 NAS Decadal Study on Plasma Science » :

“Recommendations: Support the development of I/O and input script standards, team-driven modular programming practices, and the sharing of open-source code modules and community libraries.”