

Utilisation du code FLUKA pour la réalisation de calculs de radioprotection  
*GDR SCIPAC 16-18 octobre 2024 Orsay*  
*S. Wurth, service prévention des risques, IJCLab*



Laboratoire de Physique des 2 Infinis Irène Joliot-Curie  
IJCLab - UMR9012 - Bât. 100 - 15 rue Georges Clémenceau  
91405 Orsay cedex



université  
PARIS-SACLAY

Université  
Paris Cité

- Sommaire de l'exposé
  - 1) Généralités et possibilités du code
  - 2) Contexte
  - 3) Exemples de réalisation
  - 4) Autres codes de calcul



## 1) Généralités et possibilités du code

### 1.1 Transport

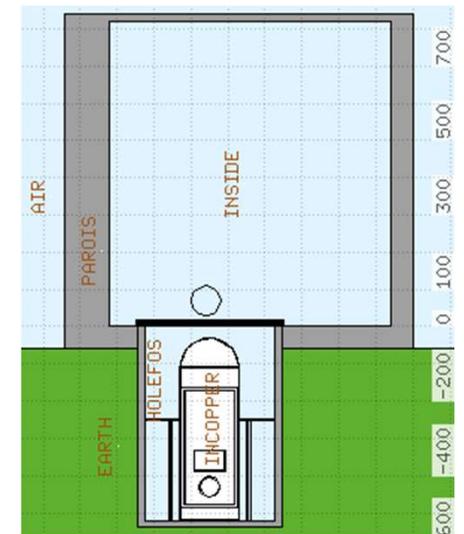
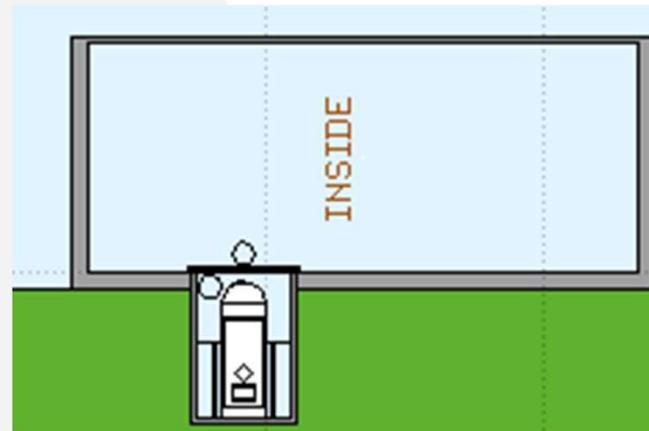
- FLUKA est un code de transport de particules et d'interactions avec la matière de type Monte-Carlo. Il a de nombreuses applications en physique des hautes énergies, ingénierie, design de blindages complexes pour accélérateurs, de cibles, calorimétrie, activation, physique des détecteurs, design de télescopes, études des rayonnements cosmiques, dosimétrie, physique médicale et radiobiologie, physique des neutrinos, radiothérapie, etc.
- Il peut simuler avec grande précision l'interaction et la propagation dans la matière de 60 types de particules y compris les photons et électrons d'énergie d'1 keV jusqu'à des milliers de TeV, les neutrinos, muons de toutes énergies, les hadrons jusqu'à 20 TeV et toutes les antiparticules correspondantes, les neutrons jusqu'aux énergies thermiques et les ions lourds. Le programme transporte également les photons polarisés (radiation synchrotron) et les photons optiques. La décroissance et le transport de radiations de décroissance émises par des noyaux radioactifs peuvent être réalisés en ligne.



## 1) Généralités et possibilités du code

### 1.2 Géométrie combinatoire et interface

Grâce au package utilisant la géométrie combinatoire, il est possible de décrire des géométries très complexes, développé pour transporter des particules chargées y compris en présence de champs magnétiques. Une interface graphique, de visualisation, d'édition de géométrie et de debugger et plus généralement d'édition de toutes les données d'entrée ainsi que le post traitement après contrôle est disponible : FLuka Advanced InteRface (<http://www.fluka.org/flair/index.html>).





## 1) Généralités et possibilités du code

### 1.3 Langage et routines modulables

Code : écrit en fortran 77 double précision, gros impact sur la précision générale, peu d'exigences de programmation pour l'utilisateur, même si de nombreuses routines et options peuvent permettre à ce dernier de compléter l'offre standard pour ajuster son cas à ses besoins.

### 1.4 Spécificité

Double possibilité d'utilisation en mode analogue ou mode avec « biaisage » : permet de prévoir des fluctuations, coïncidences et événements corrélés (analogue), ou à l'aide de larges choix de techniques statistiques permettant de prévoir des événements rares et d'en dégager un résultat statistiquement acceptable en un temps de calcul limité.



## 2) Contexte

Dans le domaine de la radioprotection / dosimétrie, l'utilisation d'outils de simulations peut s'avérer très rapidement indispensable.

- Utilisés en amont dans des études prévisionnelles de doses individuelles et collectives, ils permettent d'aider à évaluer les niveaux d'expositions des personnels appelés à effectuer les tâches qui font l'objet de l'analyse (pendant et après fonctionnement).
- Avant toute validation expérimentale indispensable, ils peuvent proposer des projections de parois de confinement d'un bâtiment (par exemple d'un accélérateur) alors que celui-ci n'est pas encore construit et que seul le cahier des charges a été défini.
- C'est un moyen qui peut permettre d'appuyer un dossier de demande d'autorisation déposé auprès de l'Autorité de Sûreté Nucléaire.
- Problématiques liées au démantèlement d'installations ayant manipulé des substances radioactives (activation).
- Quantification de niveaux de rejets d'effluents radioactifs (liquides ou gazeux) d'installations.
- Tous domaines pouvant nécessiter une étude de simulation en appui à des mesures réelles : dosimétrie, physique des détecteurs, etc.



## 2) Contexte

### Simulations possibles si :

- Bonne description de la situation : plans, cotes, dans toutes les dimensions d'intérêt. → **GÉOMÉTRIE**
- Le plus de précisions possibles sur la composition des matériaux, ceux d'intérêt, ceux dont les épaisseurs peuvent amener à interagir (atténuer ou autre) avec les rayonnements ionisants émis. → **MATÉRIEL**
- Description du ou des termes source : position(s), énergie(s), type de propagation (ponctuelle, faisceau, isotrope, etc.), type(s) de particule(s) à considérer, monoénergétique ou spectre (discret, continu) énergétique, et paramètres d'intensité : courant (pour faisceau), activité (source radioactive), flux, fluence, etc. → **SOURCE**

### Résultats que l'on peut obtenir :

- Calculs de doses (débits de dose) résiduelles après écrans : évaluation de blindages, courbes isodoses.
- Spectres énergétiques (fluence versus énergie).
- Calcul de doses absorbées par les matériaux pour évaluer les dommages subis par l'irradiation.



## 3) Réalisations

Le but de la radioprotection est de réduire autant que possible le risque d'exposition aux rayonnements ionisants des travailleurs, du public et de l'environnement.

Une installation d'accélérateurs de particules est susceptible de générer d'importantes quantités de rayonnements secondaires dus à l'interaction de tout ou partie du faisceau avec la matière constituant l'équipement ou son infrastructure.

Considérant qu'un certain niveau de pertes ne peut pas être évité, la plupart du temps, les machines sont placées dans une structure dans laquelle il est impossible de pénétrer lors de leur fonctionnement (casemate)

- Comment dimensionner/valider les protections biologiques afin de réduire les retombées de rayonnements aussi basses que possibles à un niveau acceptable par la réglementation ?

**Point particulier sur la source majeure de rayonnements ionisants** : la gestion de la fin du faisceau dans un bloc d'arrêt

- Dimensionnement de ce bloc d'arrêt afin de réduire les émissions de rayonnements secondaires

**Gérer l'après arrêt du fonctionnement**

- Problème d'activation de la matière et de gestion de déchets radioactifs



## 3) Réalisations

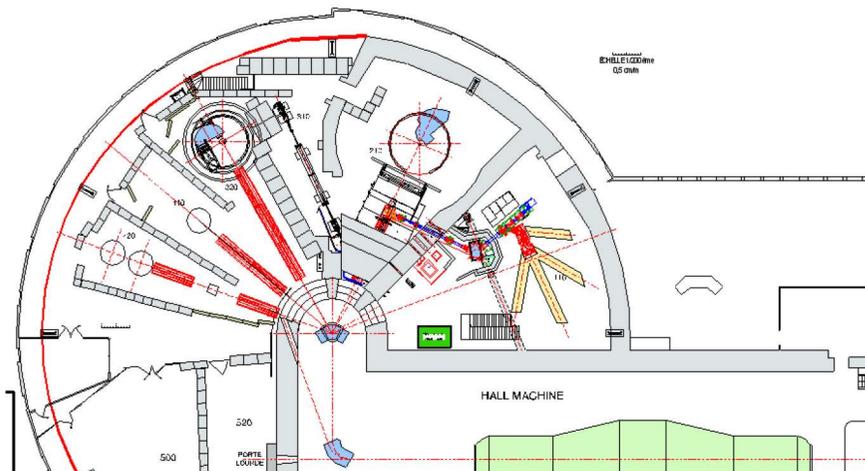
On peut ainsi instruire diverses études toutes importantes pour la constitution d'un dossier de demande d'autorisation adressé à l'ASN

- Zonage : grâce à la validation des parois de confinement, on peut définir le zonage radiologique a priori qui sera applicable à l'installation en attendant de réaliser les tests de mise en service
- Évaluation prévisionnelle de doses : on peut prévoir les expositions a priori de divers corps de métier appelés à intervenir autour de l'installation en ou après le fonctionnement
- Détermination de points chauds et gestion des déchets radiologiques : grâce à des calculs d'activation, il est possible de déterminer les localisations de points chauds de l'installation après le fonctionnement ou de prévoir a priori des dispositions concernant l'évacuation de futurs déchets radiologiques générés par le fonctionnement de la machine (filières, dossier spécifique à instruire, etc.)



## 3) Réalisations

### ALTO, bâtiment 109, IJCLab, validation des parois de confinement



Figures n° 1 et 2 : Vues d'ensemble du bâtiment modélisé avec et sans toit (logiciel SimpleGeo).

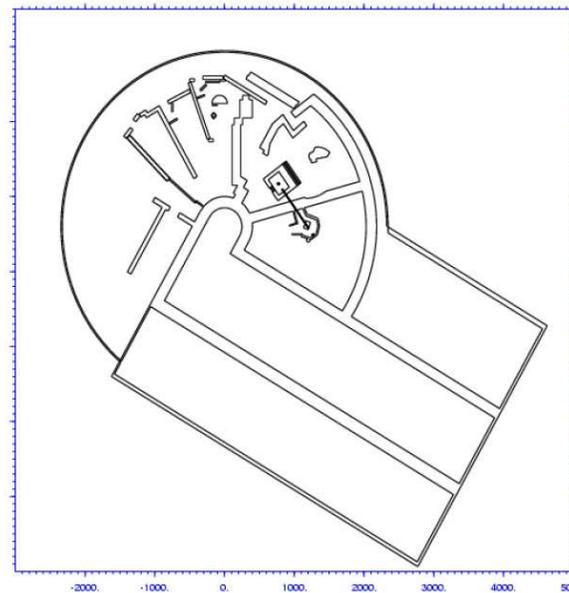
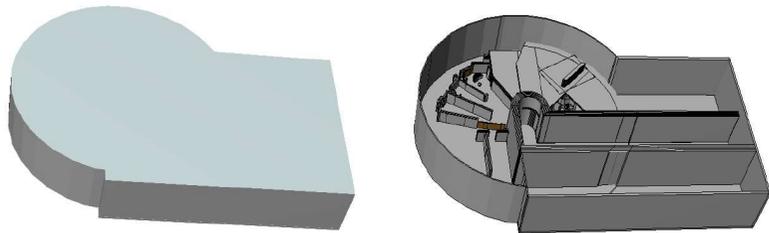


Figure n° 3 : à la hauteur du faisceau (1,77 m par rapport au sol)

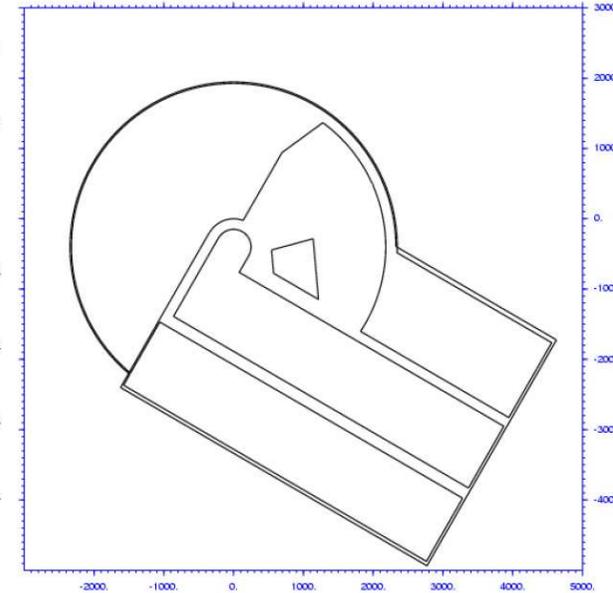


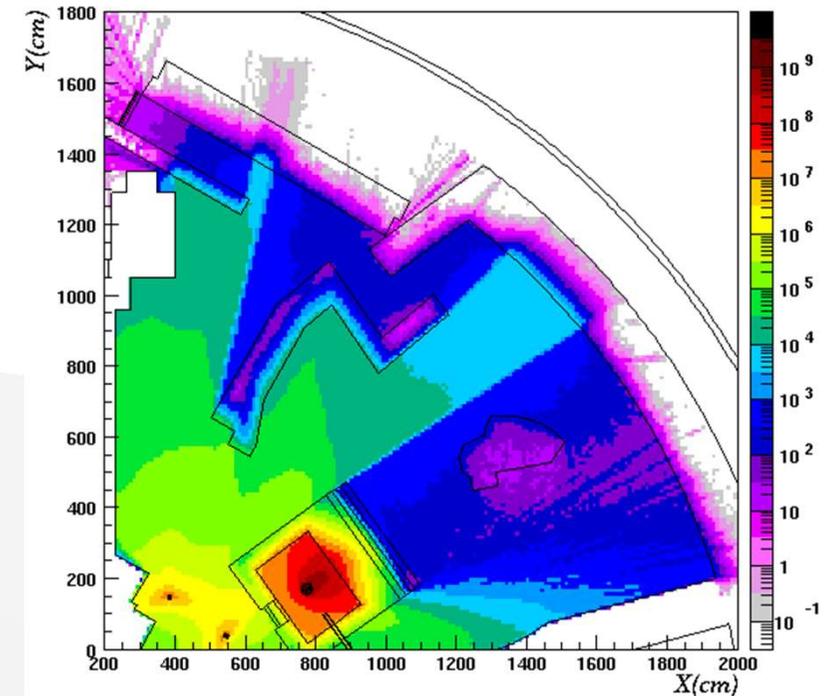
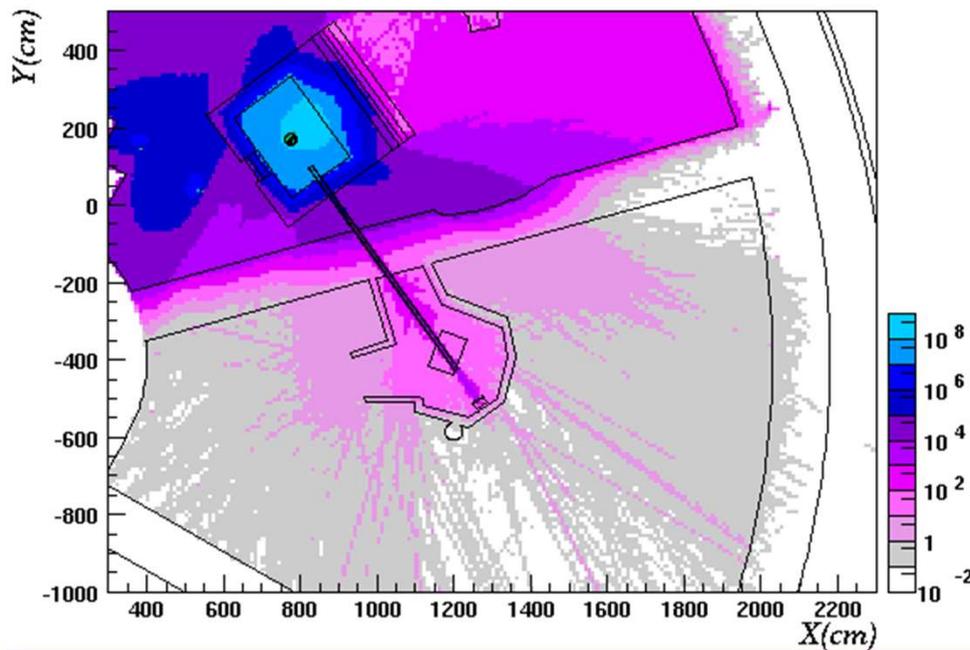
Figure n° 4 : à la hauteur du toit d'ALTO (5 m par rapport au sol)



## 3) Réalisations

### ALTO, bâtiment 109, IJCLab, validation des parois de confinement

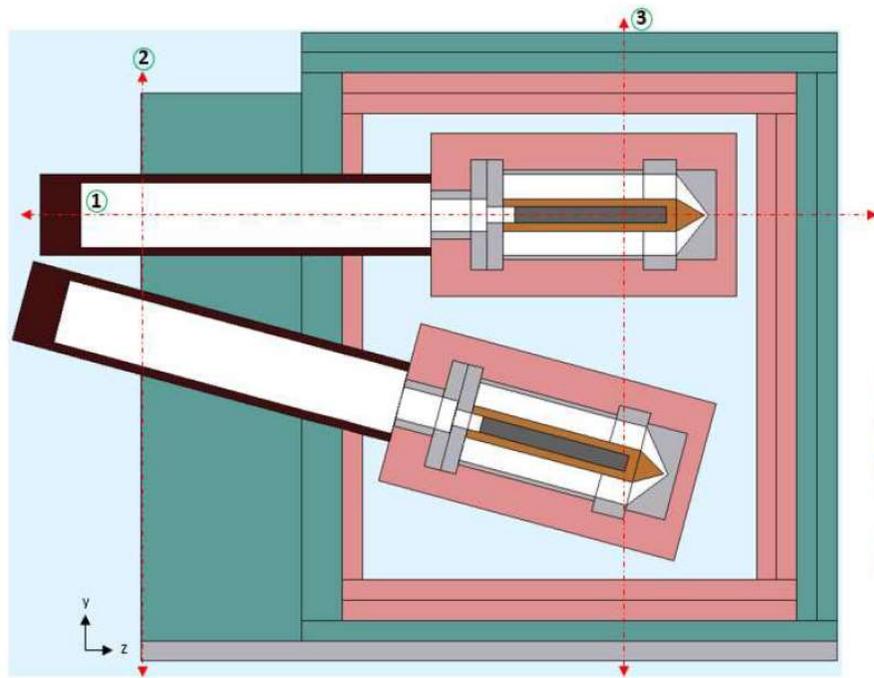
- Résultats : Débit de dose neutron + photon en  $\mu\text{Sv/h}$  dû à un faisceau d'électrons de 50 MeV, 10  $\mu\text{A}$  dirigé sur une cible de carbure d'uranium (photofission, projet ALTO). La source se situe dans le bunker (point noir sur la figure), vue du « dessus ».



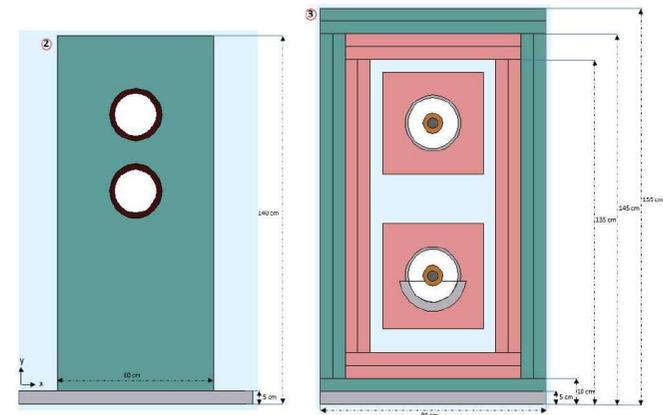
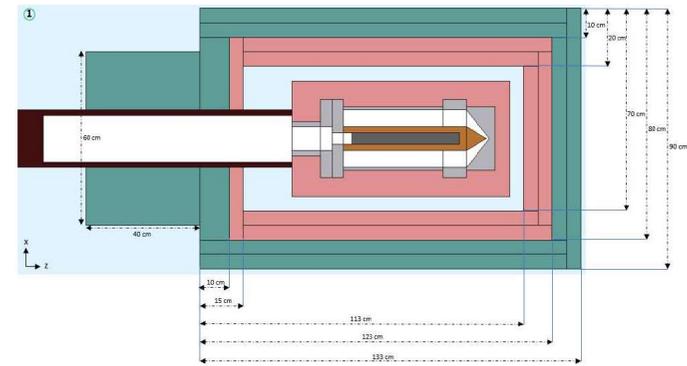


## 3) Réalisations

### Bâtiment 200, IJCLab, design du beam dump accélérateur laser plasma (ALP)



- Vide
- Air
- Acier inox
- Cuivre
- Polyéthylène
- Aluminium
- Plomb
- Graphite

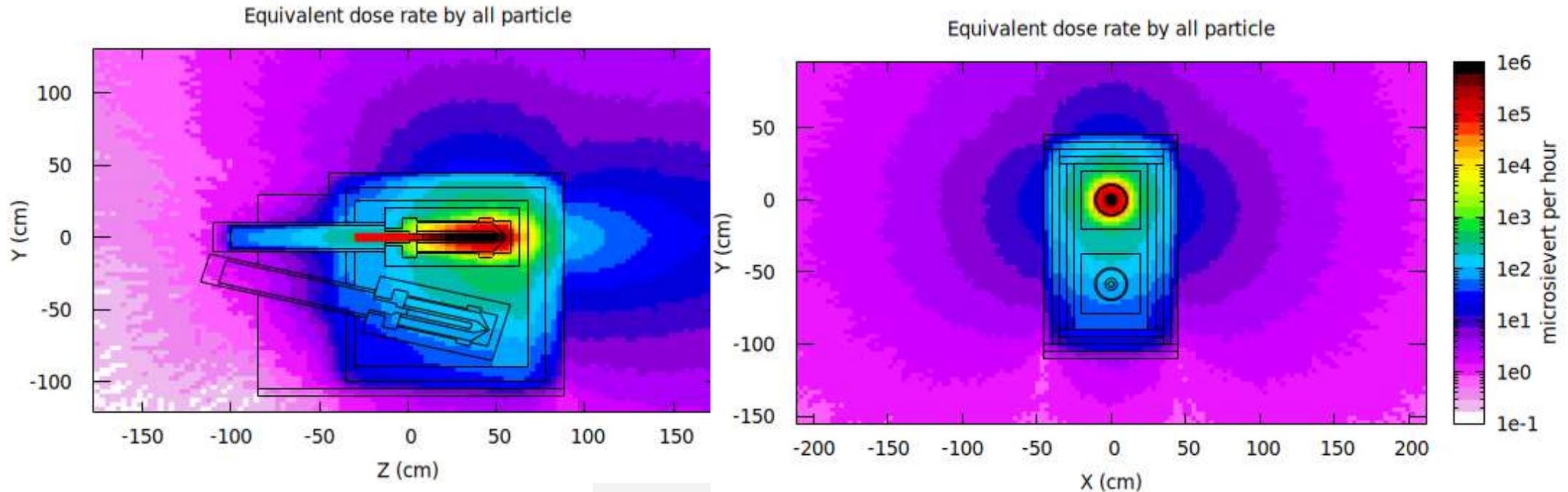




### 3) Réalisations

Bâtiment 200, IJCLab, design du beam dump accélérateur laser plasma (ALP)

- Résultats : Débit de dose neutron + photon en  $\mu\text{Sv/h}$  dû à un faisceau d'électrons de 250 MeV, 2 nA.





## 4) Autres codes de calcul

- FLUKA INFN : <http://www.fluka.org/fluka.php?>
- FLUKA CERN : <https://fluka.cern/>
- GEANT4 : <https://geant4.web.cern.ch/> [physique des particules, détecteurs]
- MCNP : <https://mcnp.lanl.gov/> [neutronique, réacteurs]
- PHITS : <https://phits.jaea.go.jp/>
- RAYXPRT : <https://www.rayxpert.com/>

## Hors Monte Carlo

- DOSIMEX : <https://www.dosimex.fr/>
- MICROSHIELD : <https://www.radiationsoftware.com/microshield>
- MERCURAD : <https://www.mirion.com/fr/products/technologies/health-physics-radiation-safety-instruments/portable-radiation-measurement/mercurad-3d-simulation-software-for-dose-rate-calculation>