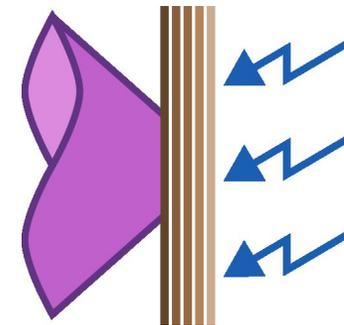


# ESTHER

## Effets Thermo-mécaniques et Hydrodynamiques Engendrés par un Rayonnement

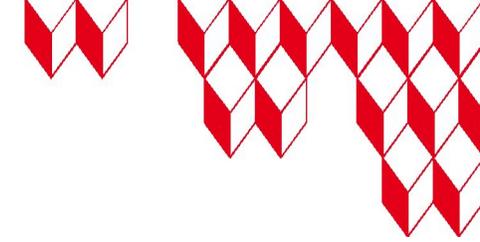
Ludovic Lecherbourg, Mathurin Lagrée, Laurent Videau  
CEA, DAM, DIF



Mini-workshop SCIPAC axe 4 :  
Modélisation Hydrodynamique des Plasmas pour l'Accélération par Sillage Laser-Plasma

23 mai 2025

# ESTHER code 1D multiphysique du « froid » au « chaud »

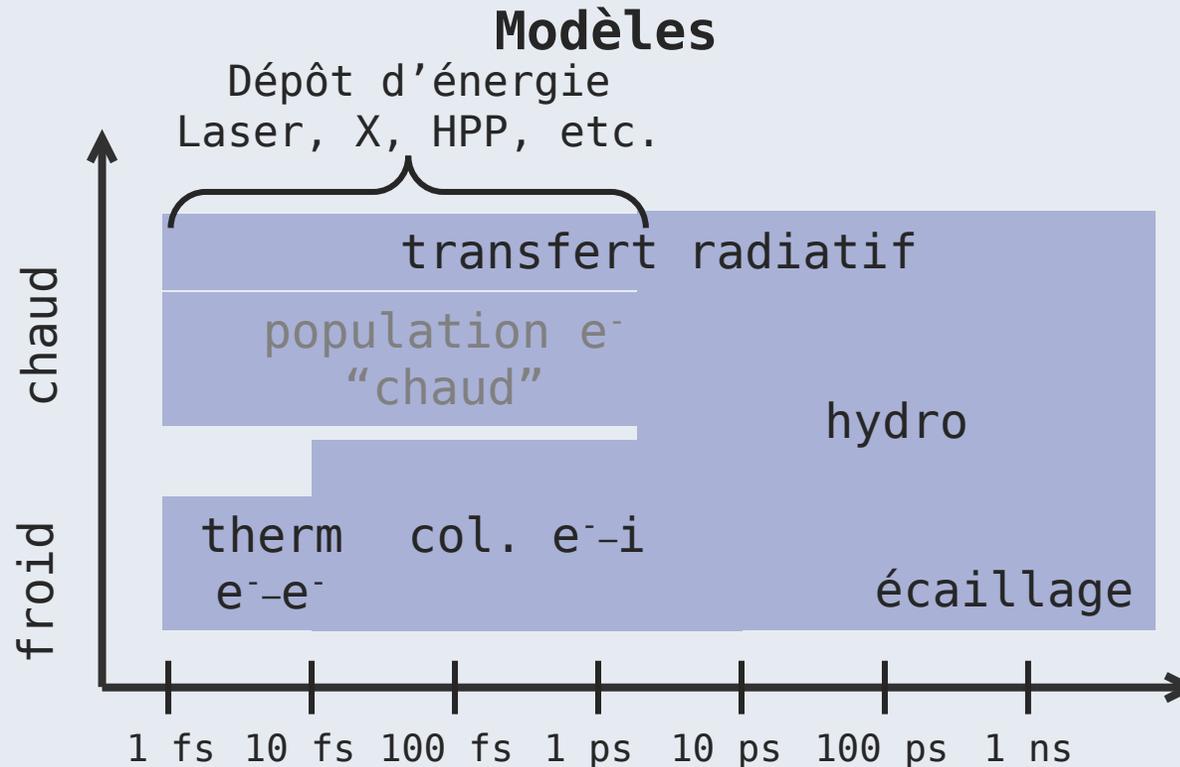


## Données de base

SCAALP, QAAM  
OPAS, SAPHyR  
KKG

ABINIT

Données  
tabulées



## Comparaisons expérimentales

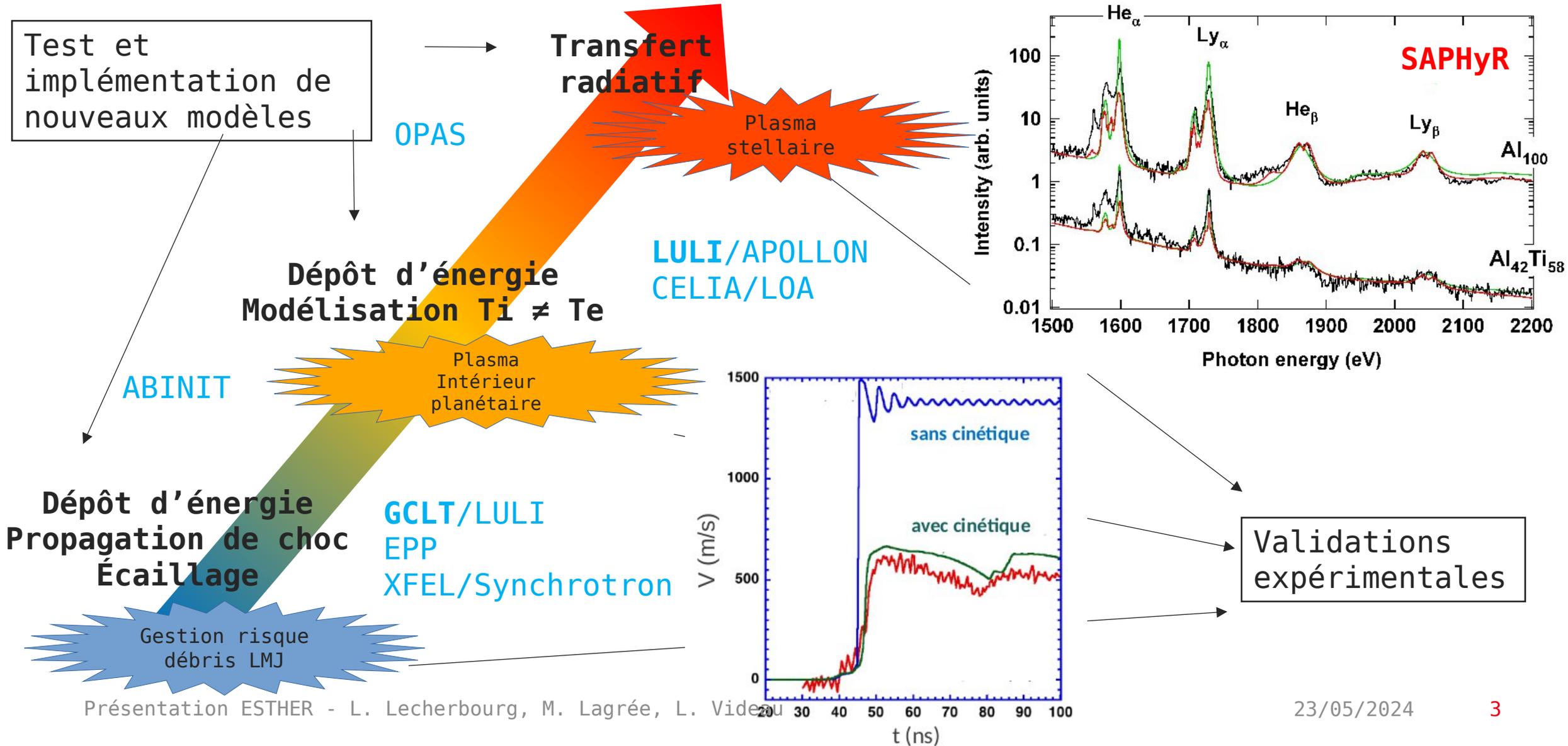
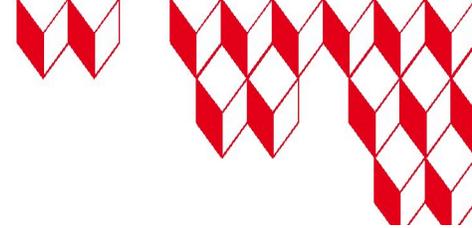
PIC02000,  
APOLLON,  
CELIA, LOA

LULI2000, XFEL,  
synchrotron

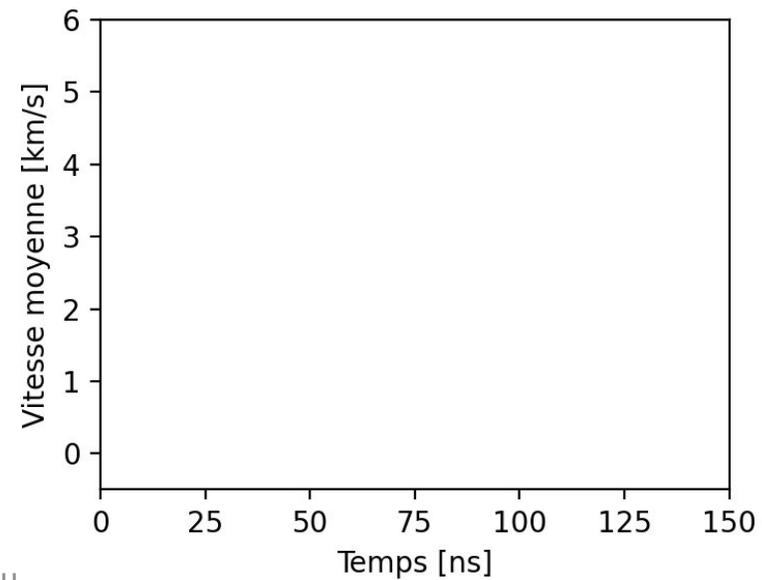
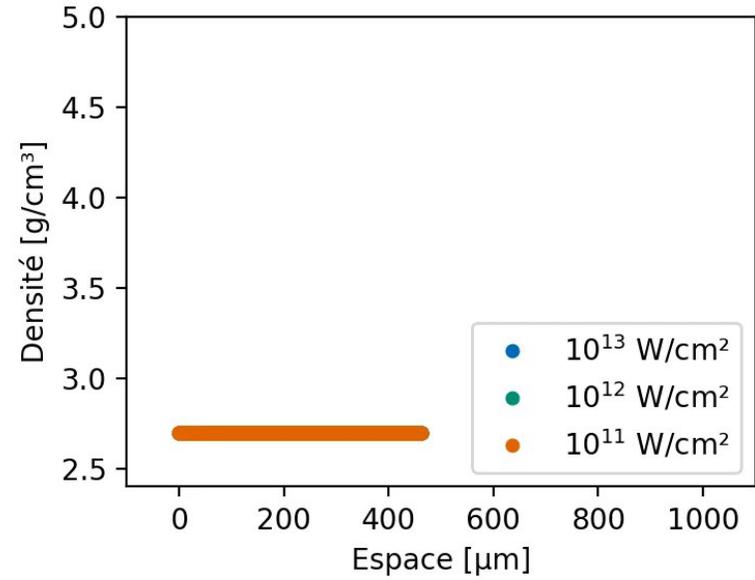
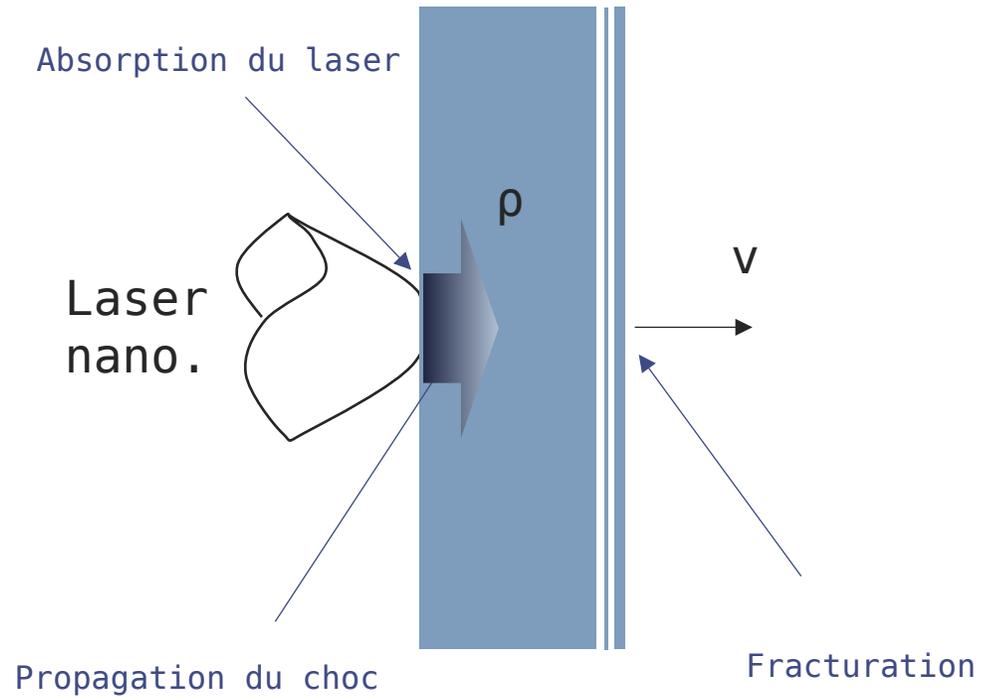
GCLT, HERA, EPP

La validation des **données** et/ou des **modèles** nécessite des **comparaisons expérimentales**.

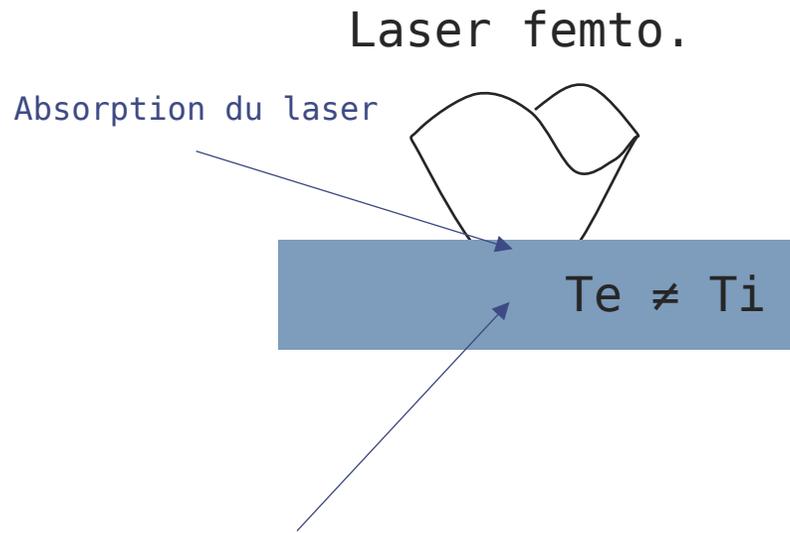
# ESTHER code 1D multiphysique du « froid » au « chaud »



# Cas 1 génération de fragments

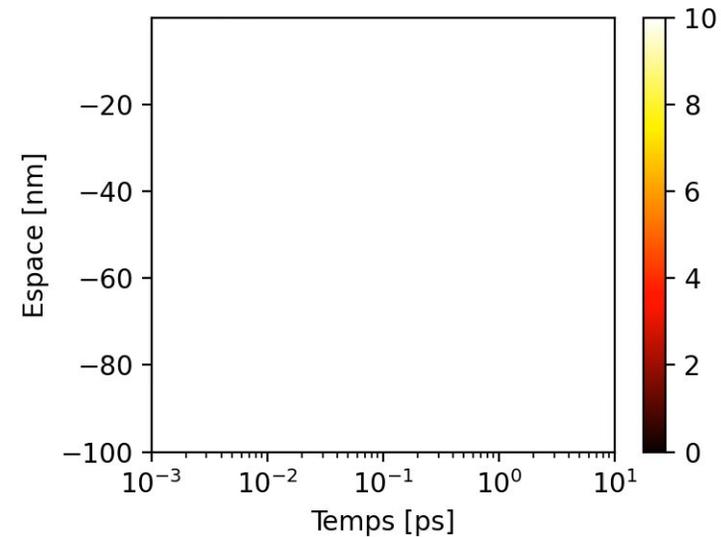
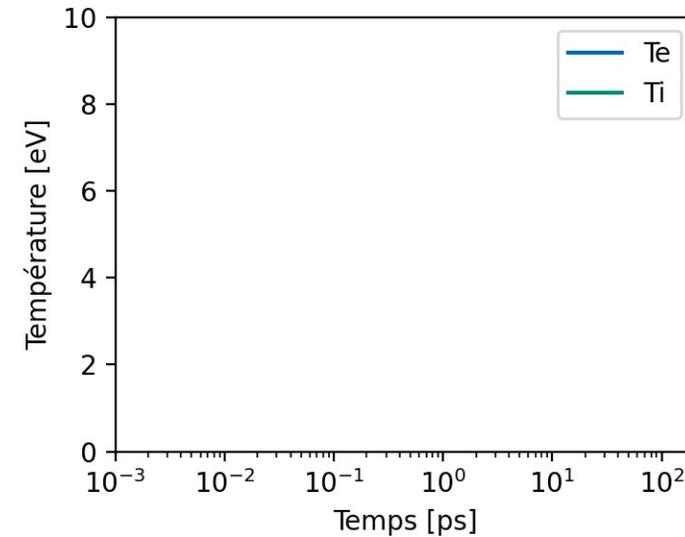


# Cas 2 équilibration électron-ion

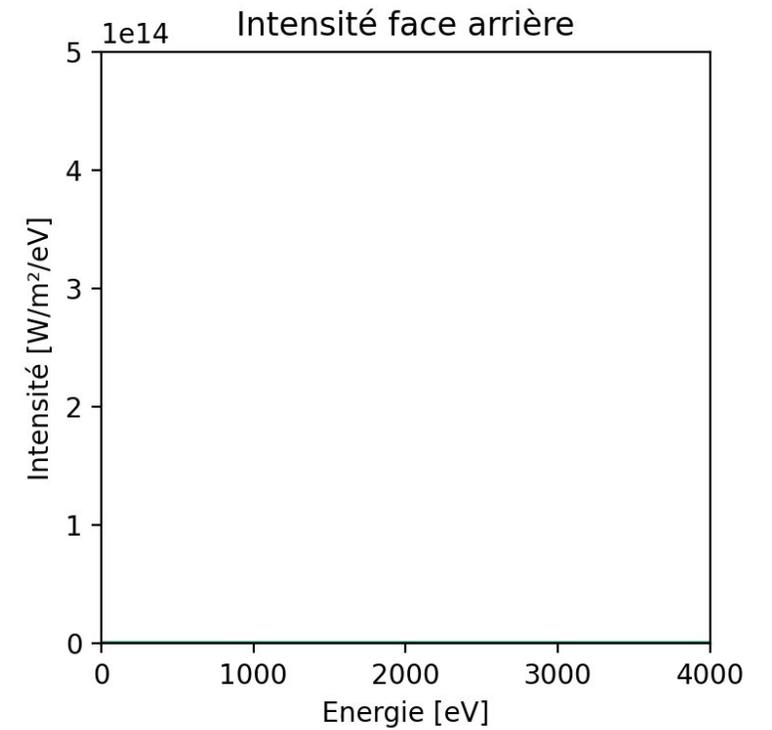
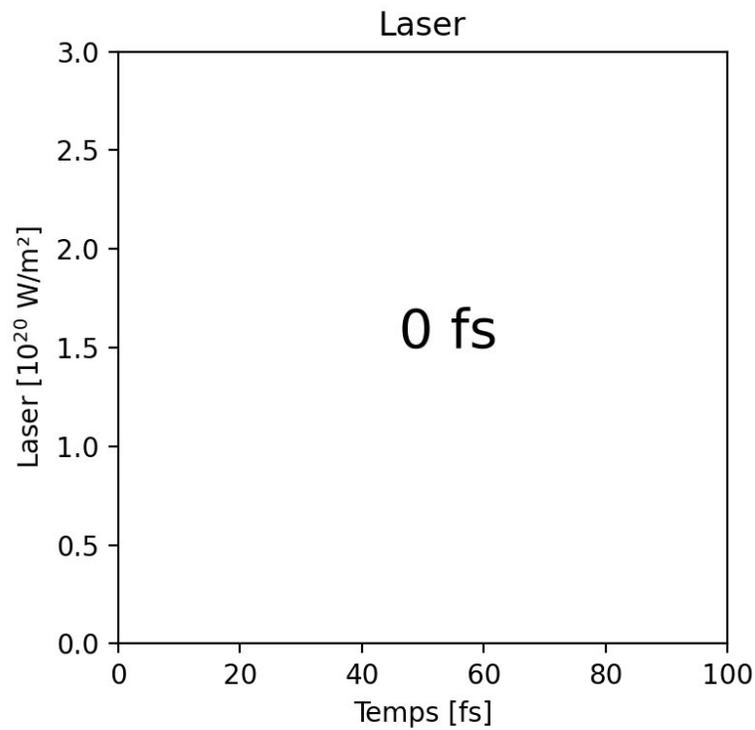
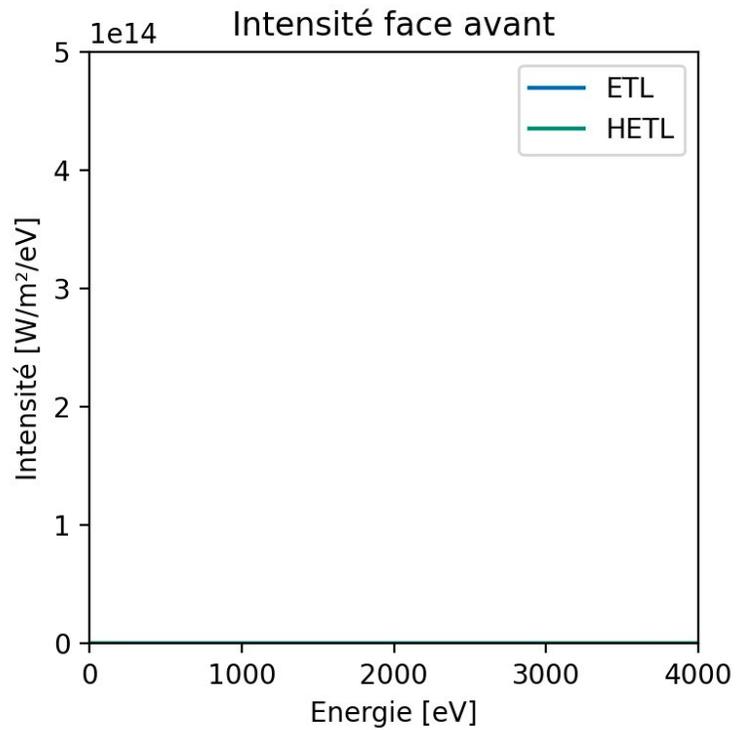
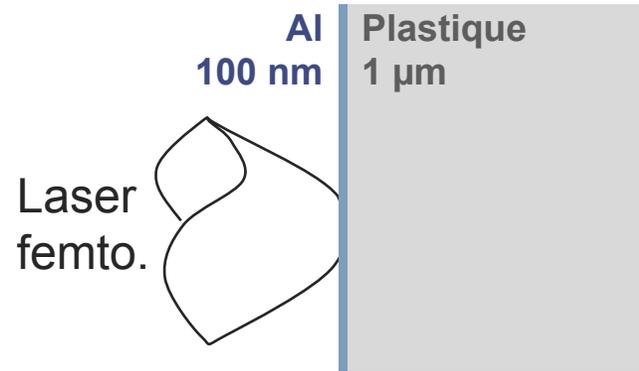
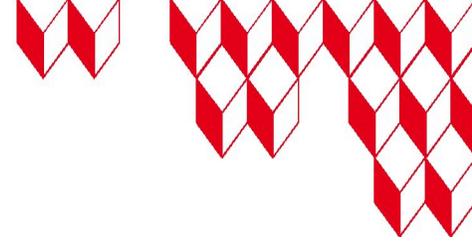


$$C_e \frac{dT_e}{dt} = -\Gamma_{ei}(T_e - T_i) + \frac{d}{dx} \left( \kappa_e \frac{dT_e}{dx} \right) + S$$

$$C_i \frac{dT_i}{dt} = +\Gamma_{ei}(T_e - T_i) + \frac{d}{dx} \left( \kappa_i \frac{dT_i}{dx} \right)$$



# Cas 3 hydrodynamique couplé au radiatif



# Modèles physiques

## Dépôt d'énergie

- **Dépôt LASER**
  - Équation de Helmholtz
  - Tracé de rayon
  - Propagation laser
  - Dépôt dans diélectriques (claquage)
- Rayonnement X
- Faisceau d'ions
- Faisceau d'électrons relativistes
- Dépôt HPP

## Propagation de choc

- **Hydrodynamique**, avec pseudo-viscosité
- **Élasto-plasticité**
  - Ramolissement standard
  - Solide élastique-parfaitement plastique
  - **Steinberg-Cochran-Guinnan**
  - Johnson-Cook
  - Preston-Tonks-Wallace
- **Transition de phase & ionisation:**
  - Cinétique de Hayes & d'Avrami

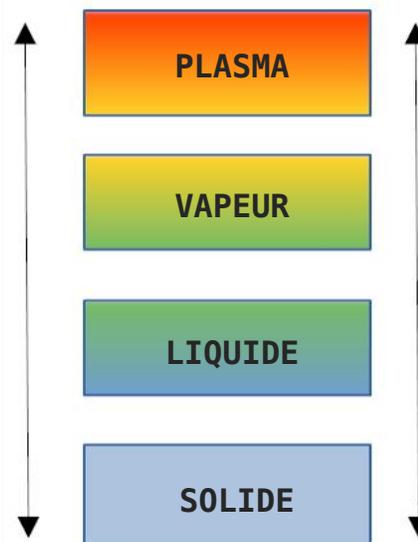
## Thermique

- **Conduction thermique**
  - Mono-température
  - Bi-température (ions/électrons)
- **Transfert radiatif**

## Endommagement

- **Fracturation**
  - Tension limite (dépendant de la vitesse de déformation)
  - Tuler-Butcher
  - Kanel
  - **Johnson**
  - Fracture matériaux fragile : modèle cohésif

## États de la matière modélisés



# Données matériaux

## Indices optique:

Domaine froid : Palik  
Domaine plasma : Modèle de Drude

## Équations d'état

- Bushman-Lomonosov-Fortov,
- SESAME (propriété Los Alamos)
- PUFF-Mie-Grüneisen (analytiques)
- EOS multiphases

## Opacités

Domaine froid : Henke  
Domaine plasma : Nohel ETL

## Coefficients de conduction thermique

Domaine froid : Touloukian  
Domaine plasma : SESAME (propriété Los Alamos), Scaalp, Lee-More, Ebeling

## Coefficients électroniques

Domaine WDM : University of Virginia  
Domaine plasma : gaz d'électrons libres

## Ionisation

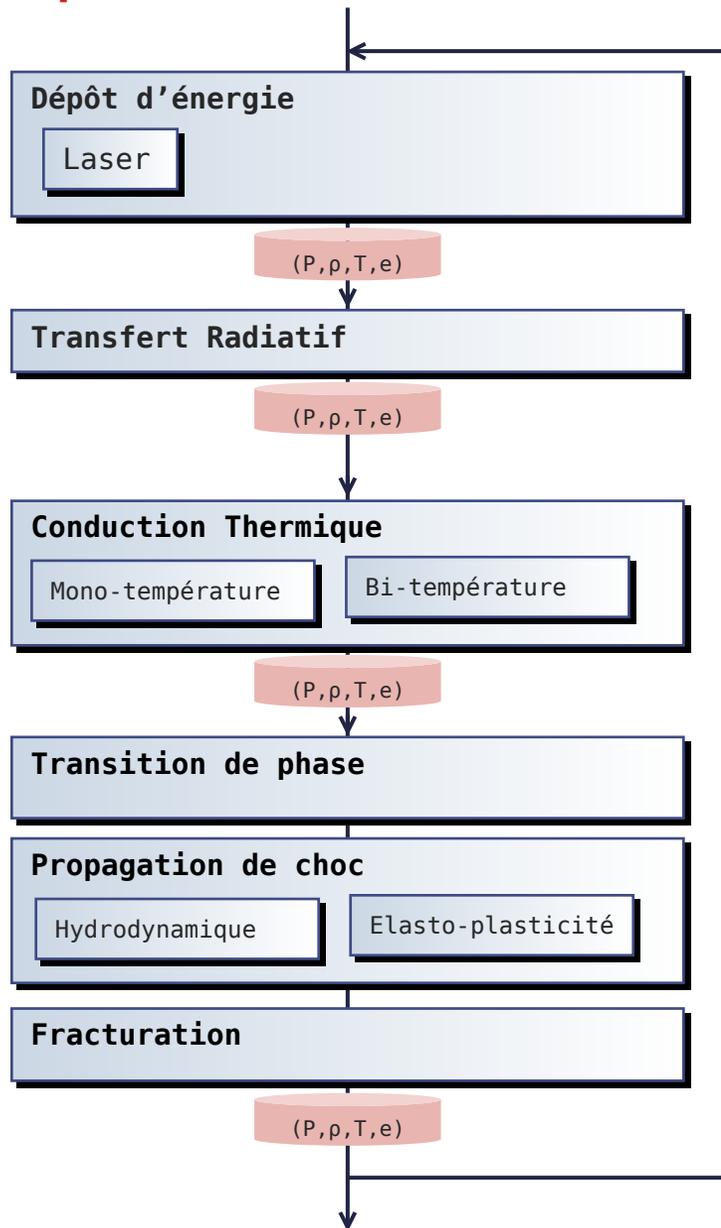
Nohel ETL, Scaalp, Lee-More, Ebeling

## Données mécaniques

**Modèles élasto-plastique** : parfaitement plastique / Steinberg-Cochran-Guinnan / Johnson-Cook / Preston-Tonks-Wallace / LMS

**Modèles fracturations** : tension-limite / Tuler-Butcher / Kanel / Johnson

# Schéma simplifié de résolution des modèles



## Données matériaux

### Indices optiques

Domaine froid : Palik  
Domaine plasma : Modèle de Drude

### Equations d'état

- Bushman-Lomonosov-Fortov
- SESAME (propriété Los Alamos)
- PUFF-Mie-Grüneisen (analytiques)
- EOS multiphases

### Opacités

Domaine froid : Henke  
Domaine plasma : Nohel ETL

### Coefficients de conduction thermique

Domaine froid : Touloukian  
Domaine plasma : SESAME (propriété Los Alamos), Scaalp, Lee-More, Ebeling

### Coefficients électroniques

Domaine WDM : University of Virginia  
Domaine plasma : gaz d'électrons libres

### Données mécaniques

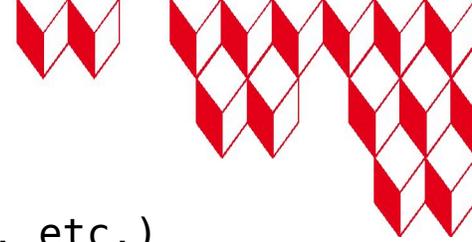
**Modèles élasto-plastique** : parfaitement plastique / Steinberg-Cochran-Guinnan / Johnson-Cook / Preston-Tonks-Wallace / LMS

**Modèles fracturations** : tension-limite / Tuler-Butcher / Kanel / Johnson

### Ionisation

Nohel ETL, Scaalp, Lee-More, Ebeling

# Interfaces graphiques en python



Post-processeurs (ex : VISAR, couplage autre codes, etc.)

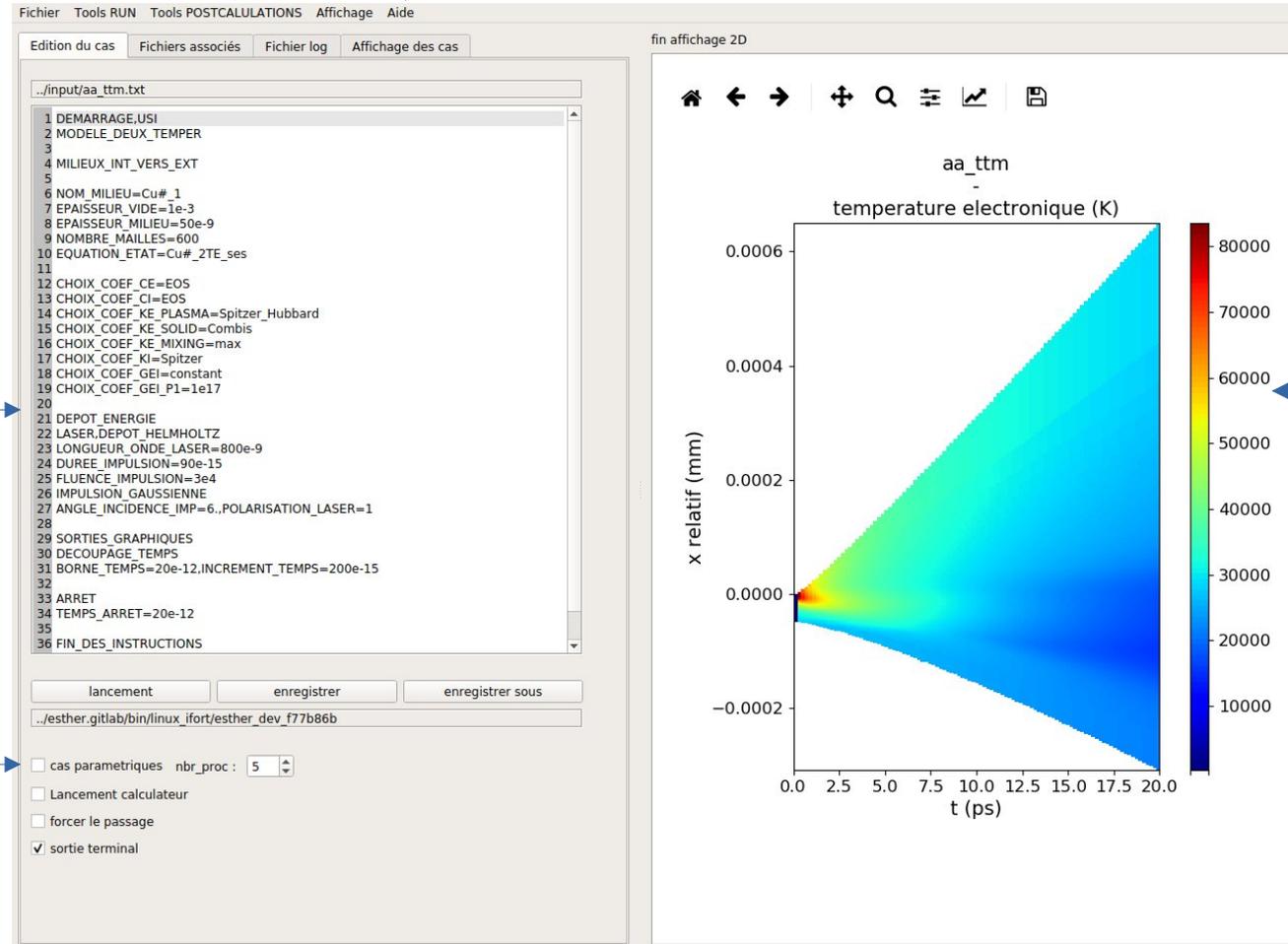
Aides

## POSTHER

### Gestion générale du code

Édition /  
Sauvegarde

Gestion de cas  
paramétriques



Affichage  
des  
résultats



Code principal : **FORTRAN**, ~55 000 lignes



Interface : **Python**, ~30 000 lignes



Compatible : **Linux, Windows & Mac**

### Modernisation progressive du code :

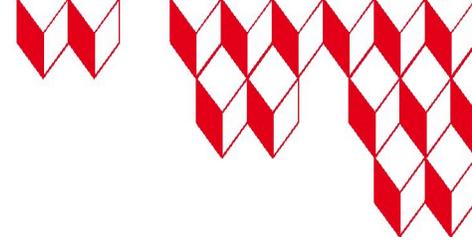
- modularisation
- documentation
- tests de non-régression



- + fiable & robuste
- + ergonomique & accessible
- + facilement diffusable

→ **Release Open Source** courant 2024

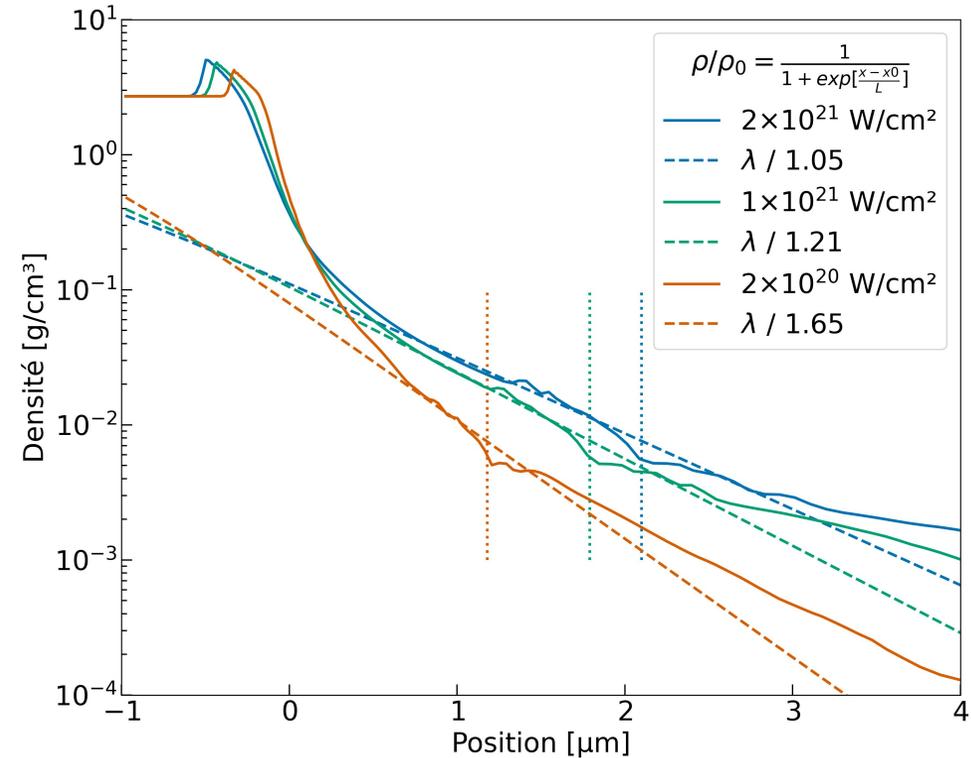
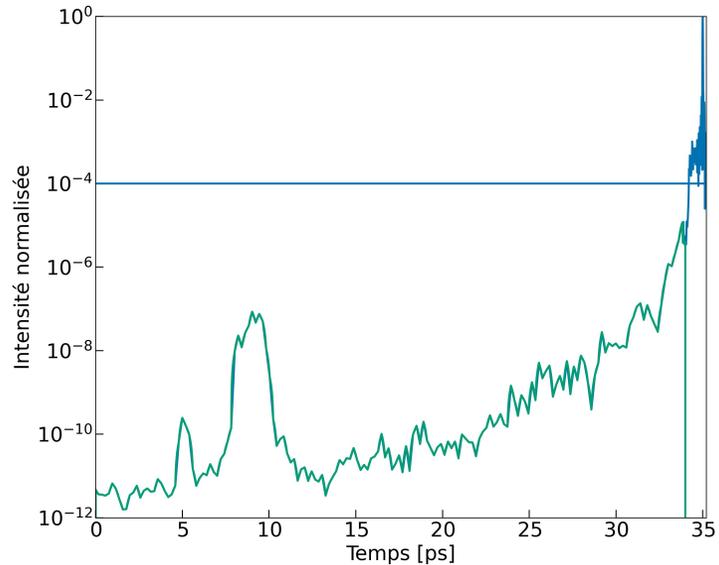




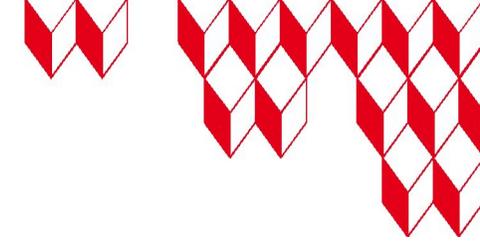
# ESTHER et accélération laser-plasma

Code hydro pour simuler le plasma généré par la pré-impulsion  
→ conditions initiales pour simulation PIC

Contaste laser APOLLON  
Impulsion simulée avec ESTHER



Collaboration L. Gremillet, X. Davoine, J. Fuchs



# ESTHER dans les gaz

**Collaboration A. Beck : intialisation d'un canal plasma dans un gaz**

Problématique ESTHER : les gaz sont peu utilisés, manque de données, en particulier bi-température  
→ création d'une nouvelle base de données à partir du code **QAAM**

**QAAM (CEA, DAM, DIF) G. Faussurier, C. Blancard**

- Code pour le domaine plasma
- Mono-atomique
- Ions : gaz parfait (→ OK pour les gaz ☺)
- Électrons : DFT sur atome moyen (modèle de sphère ionique)
- Code à l'ETL, les niveaux électroniques suivent une distribution de Fermi-Dirac

Entrées :  $\rho$ ,  $T_e$ ,  $T_i$

Sorties : EOS( $P_{e,i}$ ,  $E_{e,i}$ ),  $Z^*$ ,  $K_{\text{thermique}}$ ,  $K_{\text{électrique}}$

## **Perspectives ESTHER**

- Court terme : produire un jeu de données mono-atomique pour les gaz (H, He, Ne, Ar, Kr) → EOS et coefficients de transports
- Moyen terme : Ajouter des modèles de mélange
- Moyen terme : produire des données d'opacité à partir du modèle matière QAAM

# Merci

Ludovic Lecherbourg, Mathurin Lagrée, Laurent Videau  
CEA, DAM, DIF

Mini-workshop SCIPAC axe 4 :  
Modélisation Hydrodynamique des Plasmas pour l'Accélération par Sillage Laser-Plasma

23 mai 2025

