

www.cea.fr

FCI et HDE au CEA/DAM



Erik Lefebvre – CEA/DAM/DIF – 12 juin 2018

Avec des contributions de C. Courtois, A. Debayle, A. Dulieu, P. Gauthier, F. Girard, R. Gisbert, S. Laffite, P. Loiseau,
P.-E. Masson-Laborde, M.-C. Monteil, O. Poujade, F. Philippe, R. Riquier, C. Ruyer, P. Seytor, V. Tassin, A. Vallet, M. Vandenboomgaerde, J.-L. Willien



• Que fait-on avec le LMJ ?

Quelques expériences 2014 - 2017

Que comprend-on des résultats américains sur NIF?

Sometime it works, and sometime it doesn't...

Bilan de nos « chaines de simulation »

- **Une capacité mature en 2D, mais perfectible**
- Une capacité en développement en 3D

Pistes de recherches

- Validation du code 3D
- Design
 - -Cavité à paroi creuse, adiabat shaping
- Modélisation
 - Interaction, propagation laser, glint
 - -Transport de chaleur et MHD
 - Collision de plasmas

Le LMJ est un des moyens expérimentaux du Programme Simulation

Programme Simulation = clé de voute de la garantie de la dissuasion nucléaire

Amélioration des modèles/données
physiquesSimulation numériqueValidation expérimentaleImage: Simulation des modèles/données
physiquesImage: Simulation numériqueImage: Simulation numériqueImage: Simulation des modèles/données
physiquesImage: Simulation numériquesImage: Simulation numériquesImage: Simulation des modèles/données
physiquesImage: Si

Le LMJ offre des capacités uniques pour valider les progrès des modèles physiconumériques

- Physique des Hautes Densités d'Énergie : Validation des modèles théoriques avancés.
- Science fondamentale : Équation d'état, Données de Physique Atomique et Nucléaire, ...

De nombreuses expériences seront réalisées :

- Température : de 100 eV (~10⁶ K) à 100 keV
- Pression : plusieurs Gbars
- L'ignition du DT est le défi le plus difficile : spécifications les plus contraignantes du LMJ

PETAL, un faisceau multi-PW couplé au LMJ, permettra d'élargir le champ d'investigations du LMJ

E. Lefebvre, CEA/DAM/DIF





1^{ère} expérience LMJ : Transfert radiatif Bouchage de fente (Octobre 2014)

- 1. Capacité du LMJ à réaliser des expériences au profit du Programme Simulation
- 2. Maitrise de l'énergie radiative en cavités imparfaites (fuites TEL, trous diag.)
 →Étude de la dynamique du bouchage de fente par le flux radiatif de la cavité
 - Autoradiographie, avec l'émission X-dur de la tache laser, d'un bouchage radiatif de fente



En 2015 sur le même thème, mesure quantitative des pertes radiatives

Suite du bouchage de fente avec quantification des fuites à travers la fente

- Conversion X dans une cavité à bouclier en or => symétrie 2D
- Échantillons avec des fentes vides ou remplies de CH (bouchage retardé)





Si les caractéristiques exactes (épaisseur, largeur de fente, ...) de l'échantillon sont prises en compte

E. Lefebvre, CEA/DAM/DIF

CH ou

vide

Hydrodynamique de l'implosion : Implosion asymétrique (2015)

Étude de l'effet d'une asymétrie du flux sur la forme d'implosion de la capsule

- 1. 1^{ère} implosion LMJ : cavité avec bouclier chauffé par un quad => symétrie axiale / asymétrie azimutale
- 2. Qualification des capacités radiographiques du LMJ
 - -2nd quad utilisé pour une source de radiographie Ti et Sc avec une impulsion optimisée

Complexités des cibles !



Que fait-on avec le LMJ ?

Quelques expériences 2014 - 2017

Que comprend-on des résultats américains sur NIF ?

Sometime it works, and sometime it doesn't...

Bilan de nos « chaines de simulation »

- **Une capacité mature en 2D, mais perfectible**
- Une capacité en développement en 3D

Pistes de recherches

- Validation du code 3D
- Design
 - -Cavité à paroi creuse, adiabat shaping
- Modélisation
 - Interaction, propagation laser, glint
 - -Transport de chaleur et MHD
 - Collision de plasmas

L'analyse moderne de la campagne NIC

Echec de l'ignition pour (au moins) 3 raisons

- vitesse d'implosion systématiquement trop faible (marge d'ignition en V⁸) : les calculs d'interprétation font usage de multiplicateurs ad-hoc sur la puissance laser pour restituer l'écoulement 1D
- symétrie d'implosion non maitrisée
- croissance de défauts (technologiques ou de rugosité)



Les simulations surestiment la température radiative et la vitesse maximale d'implosion

N120122, He @ 1 mg/cc

Le rayon de la coquille atteint 300 μ m vers 19.5 ns



Cinq tirs NIF d'implosion à densité d'He réduite ont été simulés

• Hélium de remplissage de la cavité, à 0.03 mg/cc ou 0.3 mg/cc



N130503 – Image du point chaud, émissions neutronique et X du fusible : tout colle !





- Plusieurs particularités de ce design par rapport à celui d'une cible d'ignition sont propres à renforcer le caractère 1D de l'implosion (au détriment des performances) :
 - cavité de grande taille par rapport à la capsule
 - ablateur sur-épaissi
 - 1^{er} choc très fort lancé dans la capsule limitant la croissance des défauts hydro.





Rétrodiffusion ~nulle pour ces 2 tirs et transfert d'énergie entre faisceaux minimal



N150607 bénéficiait d'un diagnostic de radiographie d'implosion, parfaitement restitué



La symétrie d'implosion finale est parfaitement restituée pour ces 2 tirs



Evolution temporelle de la symétrie à des temps proches de celui du maximum d'émission X du milieu fusible

Le REX NIF incite à limiter la densité du gaz de remplissage des cavités d'ignition





Que fait-on avec le LMJ ?

Quelques expériences 2014 - 2017

Que comprend-on des résultats américains sur NIF?

Sometime it works, and sometime it doesn't...

Bilan de nos « chaines de simulation »

- **Une capacité mature en 2D, mais perfectible**
- Une capacité en développement en 3D

Pistes de recherches

- Validation du code 3D
- Design
 - -Cavité à paroi creuse, adiabat shaping
- Modélisation
 - Interaction, propagation laser, glint
 - -Transport de chaleur et MHD
 - Collision de plasmas

FCI2 : un outil de simulation 2D mature, largement validé, mais encore perfectible



TROLL : un outil de simulation 3D en pleine croissance et validation

Lefebvre et al., Nuc. Fus., accepted (2018)



E. Lefebvre, CEA/DAM/DIF



Que fait-on avec le LMJ ?

Quelques expériences 2014 - 2017

Que comprend-on des résultats américains sur NIF?

Sometime it works, and sometime it doesn't...

Bilan de nos « chaines de simulation »

- **Une capacité mature en 2D, mais perfectible**
- Une capacité en développement en 3D

Pistes de recherches

- Validation du code 3D
- Design
 - -Cavité à paroi creuse, adiabat shaping

Modélisation

- Interaction, propagation laser, glint
- -Transport de chaleur et MHD
- Collision de plasmas

Expériences utilisant 6 chaines LMJ l'an prochain : une configuration d'irradiation tridimensionnelle



Un challenge pour fin 2019 : prédire le rendement neutronique d'une implosion 3D



- Après le retour du choc à l'interface, la production neutronique s'interrompt.
- > On a dimensionné des capsules qui ne produisent que des neutrons de chocs, pour être robustes aux asymétries d'irradiation 3D

Campagne 2018 OMEGA IRRAD3D

Comparaison de la symétrie au cours du temps pour une irradiation « 3D » par rapport à une irradiation quasi-axisymétrique, à énergie laser équivalente.

Configuration Expérimentale

DE LA RECHERCHE À L'INDUSTRIE

Selon la nature de la microbille placée au centre de la cavité, les images obtenues sont sensibles à la symétrie d'éclairement X à différents instants.



Rendement cas « axisymétrique » : 1,2.10⁹ neutrons Rendement cas « 3D » : 4,3.10⁸ neutrons

Axisymétrique3DSphère d'or ré-émettrice : temps courts





Billes d'aérogel : temps intermédiaires



RADIOGRAPHIE

EMISSION

Le REX NIF fait évoluer notre design de capsule d'ignition LMJ

2011

2018



E. Lefebvre, CEA/DAM/DIF

| 12 juin 2018 25

... il fait aussi évoluer notre design de cavité

On souhaite travailler avec un moindre remplissage en gaz des cavités...

Risque d'interception des faisceaux des cônes internes et de perte de contrôle de la symétrie d'implosion

⇒ La détente de la paroi doit être maitrisée



Une cavité à paroi creuse (CPC) pour limiter la dynamique de la bulle d'or externe ?

PHYSICS OF PLASMAS 25, 012713 (2018)

- Va plus loin que le concept I-raum
- du LLNL

 A l'étude :
 - possibilité d'un substrat en CH

Hollow wall to stabilize and enhance ignition hohlraums

M. Vandenboomgaerde, A. Grisollet, M. Bonnefille, J. Clérouin, P. Arnault, N. Desbiens, and L. Videau CEA, DAM, DIF, F-91297 Arpajon, France

- épaississement de la feuille (compte-tenu des nouvelles formes d'impulsion)



La CPC est efficace pour juguler l'expansion de l'or, mais aussi stabiliser l'interface or/gaz

- On espère :
 - une meilleure propagation des faisceaux internes
 - la stabilisation de l'interface paroi/gaz
 - moins de rétrodiffusion
- Campagne sur Omega en 2019 pour tester le concept



Pistes pour la modélisation : ILP couplée à la propagation dans l'hydro-rad

Meilleure prise en compte dans le code hydro-rad des « détails » de la propagation du faisceau

- Echange d'énergie par croisement de faisceaux, instabilités collectives
- Rétrodiffusion in-situ et non « abattement » anticipé
- Prise en compte de la structure des speckles pour une réfraction effective
- Modification de l'absorption laser, absorption anormale
- Ray tracing alternatif...



Sylvie

Pistes pour la modélisation : un meilleur traitement du *glint*

■ Dans les cavités vides, l'interaction avec la paroi durant les premières centaines de ps est sans doute mal décrite

- Réflexion spéculaire sur la paroi peu ionisée
- Mauvais calcul de perte d'énergie, ou d'*imprint* sur la capsule
- Impact possible sur la symétrie d'implosion

Thèse à venir mêlant expériences sur le GCLT (CEA/DIF/DPTA) **et réflexion sur les données de base**



Cavité rugby du CEA tirée sur Omega en mai 2018 : 0.94 kJ perdu par glint

Pistes pour la modélisation : un modèle robuste et validé pour le transport de chaleur

Remise à plat de la modélisation du flux de chaleur électronique, en plasma magnétisé ou pas

- Modèle robuste pour couplage à l'hydro, bonnes limites, rapide...
- Thèse à venir

■ Validation à l'aide de calculs cinétiques, PIC et P1

- Collaboration EUROfusion, feat. Celia, York, IC
- Il faudra des expériences de validation (Pétal ?)



Pistes pour la modélisation : identifier et surmonter une limite fluide des codes hydro

L'interpénétration de plasmas dans un calcul hydro est un artefact

- Interpénétration nulle dans un calcul lagrangien, numérique dans un calcul ALE
- Mais le phénomène existe, dans les cavités vides ou à basse pression
 - Collision or / or ou ablateur / or
 - Impact sur la propagation des faisceaux laser et la symétrie d'implosion
- Réflexions en cours sur un modèle de diffusion effective implantable dans un calcul hydrodynamique
- Validation à l'aide d'expériences spécifiques (S. Le Pape, Omega)



Tir 84135, image 800 eV



Ceea Conclusions

Exploitation du LMJ, poursuite des expériences Omega

- **Besoin d'expériences statistiquement contraignantes pour nos modèles**
- Nouveaux diagnostics à déterminer par ex. Thomson visible, X, radio 50 keV ?

Double attente des résultats américains sur NIF

- **Faire évoluer notre design LMJ (où peut-on dimensionner en confiance ?)**
- Identifier les effets physiques manquants (que doit-on ajouter à nos modèles ?)

De nombreuses pistes de recherches, à un horizon raisonnable et ambitieux

- Validation du code 3D
- **Evolutions du design « ignition »**
- Modélisation
 - Interaction, propagation laser, glint
 - Transport de chaleur et MHD
 - Collision de plasmas
 - _Mais aussi HETL, EOS, ...

Plus de thèses et de collaborations sont possibles et espérées !



Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives

Centre de Bruyères-le-Châtel | 912797 Arpajon Cedex Établissement public à caractère industriel et commercial |