DE LA RECHERCHE À L'INDUSTRIE



# Stabilité hydrodynamique de capsules implosées avec adiabat contrôlé sur le National Ignition Facility

M. Lafon, M. Bonnefille et M. Vandenboomgaerde *CEA/DAM, DIF, Arpajon, France* 

www.cea.fr

Forum Institut Lasers et Plasmas 11 au 15 Juin 2018

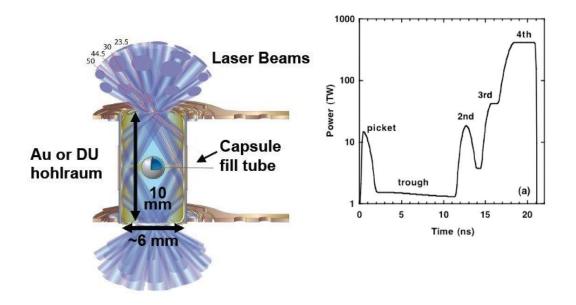


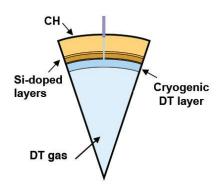
#### Les capsules avec adiabat profilé implosées avec un très fort foot présentent de bonnes performances tout en restant stables

- L'adiabat du combustible peut être sensiblement réduit en le profilant (AS: Adiabat Shaping) pendant le trough et la montée en puissance radiative
- Des implosions à haute vitesse de coquilles minces sont dimensionnées pour atteindre l'amorcage du régime de chauffage par particules alpha
- L'analyse de la croissance linéaire des instabilités montre que les implosions sans picket avec adiabat contrôlé sont au moins aussi stables que les implosions conventionnelles de type High Foot (HF)
- Retirer le picket d'une implosion HF permet la propagation correcte des faisceaux internes pendant l'impulsion principale tout en limitant la détente des parois d'or
- La stabilité de ces designs peut être améliorée en introduisant un matériau de Z élevé dans la partie externe de l'ablateur



# Deux filières d'implosion de capsules FCI ont été abondamment testées sur le NIF: Low et High Foot

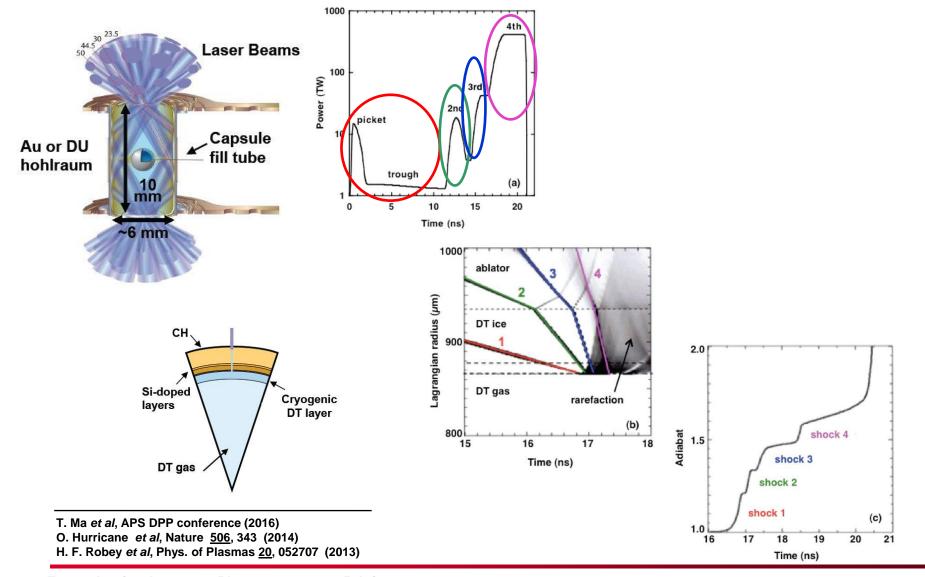




- T. Ma et al, APS DPP conference (2016)
- O. Hurricane et al, Nature 506, 343 (2014)
- H. F. Robey et al, Phys. of Plasmas 20, 052707 (2013)

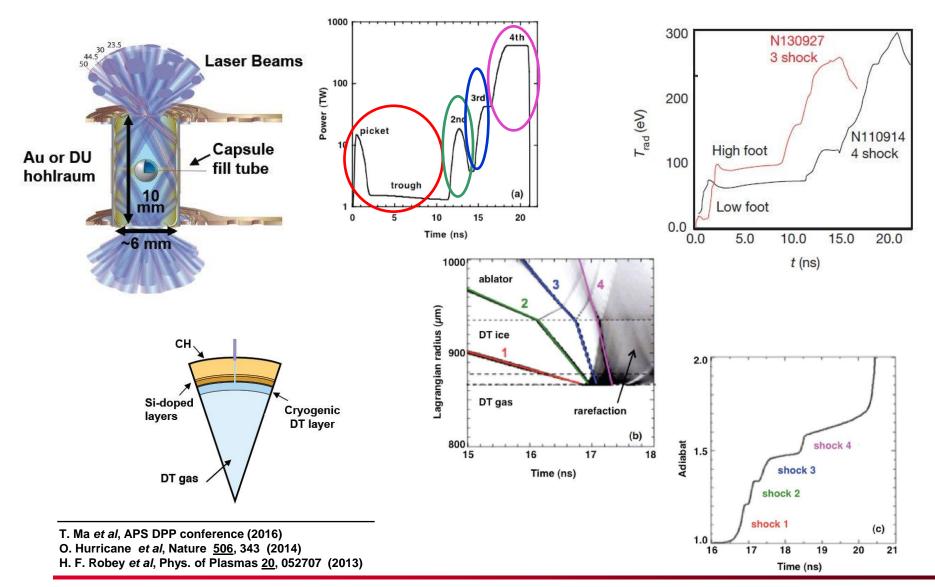


# Deux filières d'implosion de capsules FCI ont été abondamment testées sur le NIF: Low et High Foot



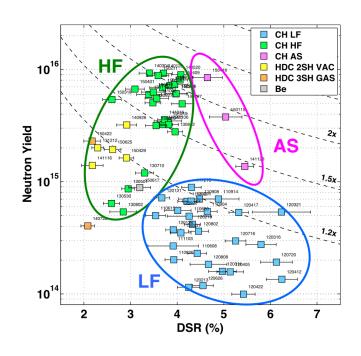


# Deux filières d'implosion de capsules FCI ont été abondamment testées sur le NIF: Low et High Foot





#### Les implosions AS (Adiabat Shaped) ont permis d'atteindre un compromis entre stabilité et compression

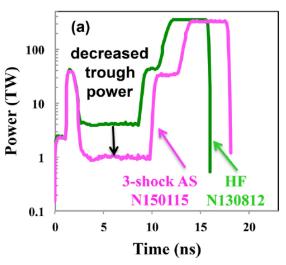


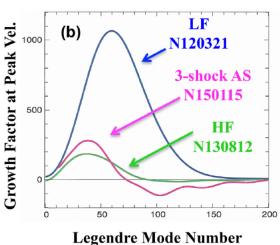
- Les implosions Low foot (LF) ont démontré une forte compression mais de faibles performances
- Les implosions High foot (HF) ont réduit la convergence afin de minimiser la croissance des instabilités hydrodynamiques
- Appliquer les techniques de contrôle de l'adiabat aux implosions LF a augmenté la production neutronique tout en améliorant la compression des implosions HF

H. F. Robey et al, Phys, of Plasmas 23, 056303 (2016)

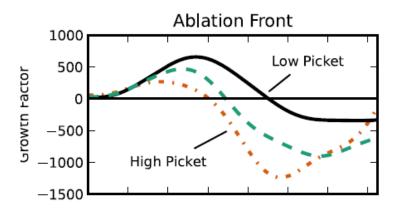


# Les implosions AS ont démontré une meilleure stabilité mais restent encore loin des conditions d'allumage





	LF	3-sh AS	HF
Shot	N120321	N150115	N130812
Peak power (TW)	357	328	355
Velocity (km/s)	321	-	333
Total yield (x10 <sup>14</sup> )	5.3	37.7	27.9
DSR (%)	6.24	5.04	3.96



D. S. Clark et al, Phys, of Plasmas 21, 112705 (2014)

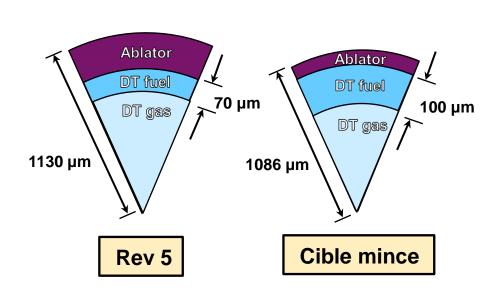
J. L. Peterson et al, Phys, of Plasmas 21, 092710 (2014)

V. A. Smalyuk et al, Phys, of Plasmas 23, 102703 (2016)

D. T. Casey et al, Phys. Rev. Lett <u>115</u>, 105001 (2015)



# Des implosions de cibles minces à hautes vitesses sont dimensionnées pour réduire la masse totale



	Rev 5	Cible mince
$V_{I}(km/s)$	281	325
$lpha_{if}$	2.4	1.6
DSR (%)	4.3	5.5
Yield	5.1 x 10 <sup>15</sup>	3.3 x 10 <sup>17</sup>
M <sub>caps</sub> (mg)	2.94	2.29
M <sub>rem</sub> (%)	22	15

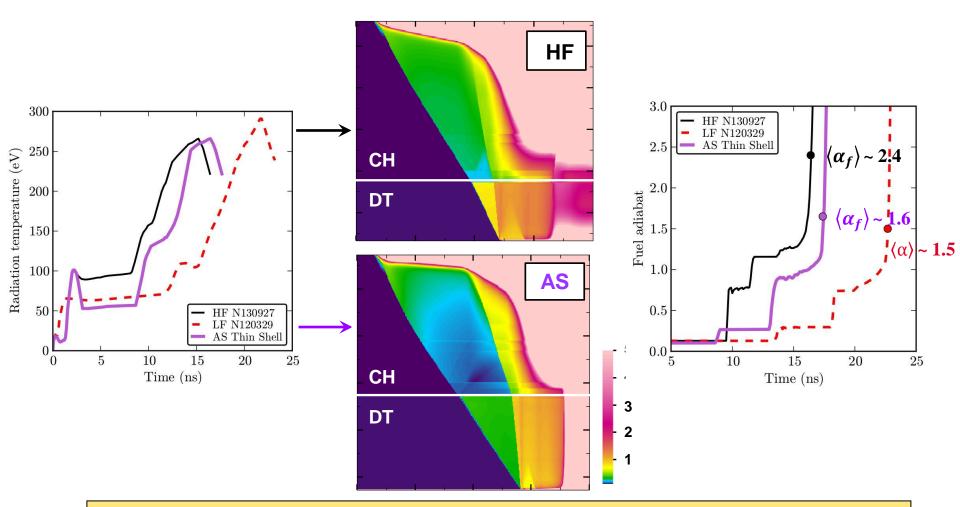
Cette capsule est caractérisée par un ablateur plus fin (- 45  $\mu m$ ) mais une couche de combustible plus épaisse (+30  $\mu m$ ):

- vitesse d'implosion plus élevée
- peu ou pas de preuve de mix dans le point chaud\*
- prévient la formation de zones minces de faible densité surfacique dans la coquille
- possible préchauffage du à une masse réduite d'ablateur protégeant le DT cryo

\* T. Ma et al, Phys. Rev. Lett. 114, 145004 (2015)



# Contrôler l'adiabat pendant le trough et la montée en puissance réduit fortement son niveau final

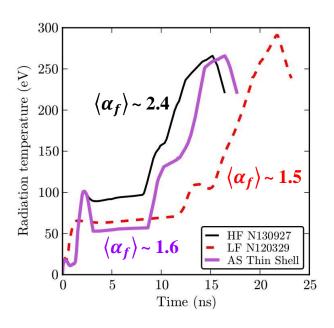


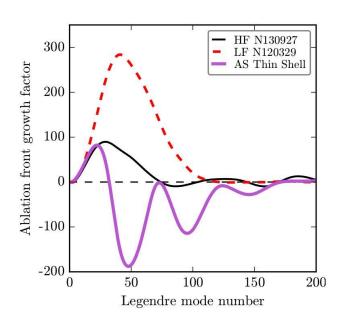
Mettre en forme la montée radiative minimise l'augmentation d'adiabat entre la coalescence des chocs en face interne et l'instant de vitesse maximale



# L'implosion de coquilles minces à haute vitesse laisse apparaitre des lobes de croissance négatifs

• Des séries de simulations mono-modes de croissance linéaire permettent d'évaluer et de comparer la stabilité hydrodynamique du front d'ablation

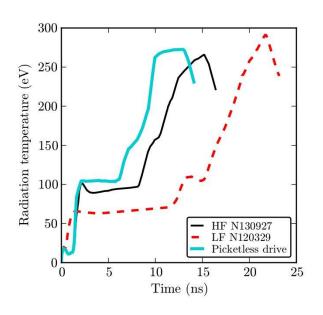


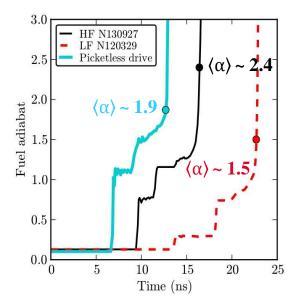


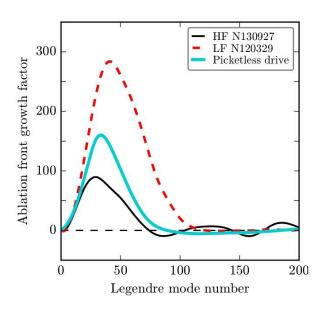
Réduire le niveau du trough diminue l'adiabat et la croissance des bas modes mais introduit des lobes négatifs dans le spectre des facteurs de croissance pour les hauts modes



#### Les implosions AS sans picket avec un très fort foot prévoient une forte compression et une stabilité comparable aux HF



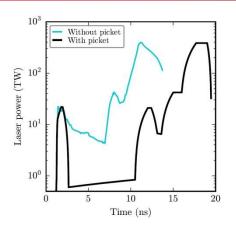


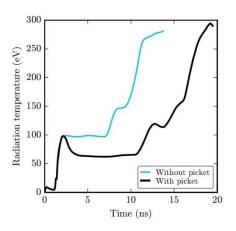


- Les lobes négatifs, identifiés comme délétères pour les designs d'ignition, sont supprimés en enlevant le picket
- Augmenter la température durant le trough minimise les dégradations de performances dues à la croissance des instabilités au front d'ablation

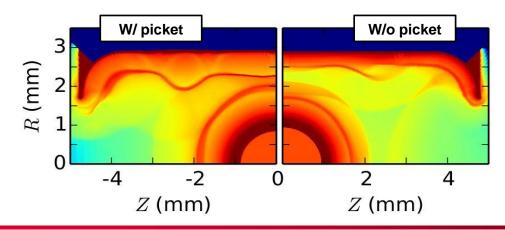


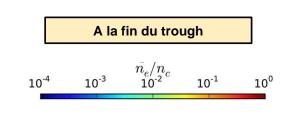
# Enlever le picket du drive radiatif atténue la détente de la bulle d'or





- Le picket, caractéristique des implosions AS conventionnelles, induit une inversion du gradient de pressure à l'interface entre le gaz et la paroi d'or
- Un drive radiatif constant évite cette inversion et la détente ultérieure d'une couche d'or sur-dense

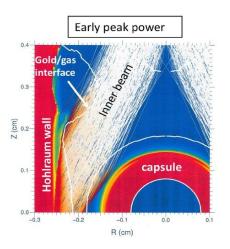


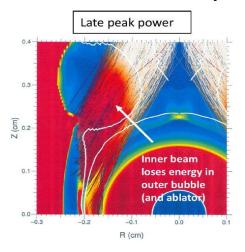




#### Une impulsion sans picket permet le dépôt correct de l'énergie laser des faisceaux internes à l'équateur

 Une fraction conséquente des faisceaux internes est interceptée dans la bulle d'or résiduelle due au picket et engendre une réduction du drive à l'équateur de la capsule

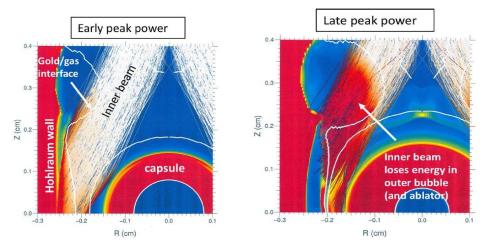




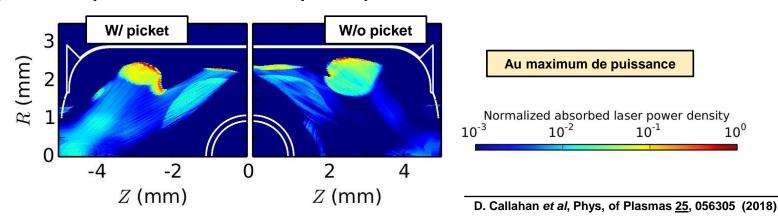


#### Une impulsion sans picket permet le dépôt correct de l'énergie laser des faisceaux internes à l'équateur

• Une fraction conséquente des faisceaux internes est interceptée dans la bulle d'or résiduelle due au picket et engendre une réduction du drive à l'équateur de la capsule



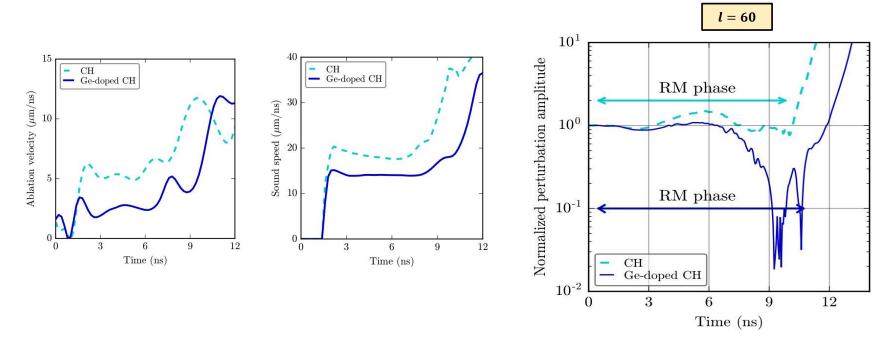
• En l'absence d'une couche d'or sur-dense, les faisceaux externes déposent leur énergie dans le plasma d'or en détente plutôt qu' à la surface de la bulle d'or





# Introduire un dopant de Z élevé dans l'ablateur stabilise les perturbations au front d'ablation

Les perturbations au front d'ablation sont stabilisées pendant la propagation des chocs par des oscillations générées par l'instabilité Richmyer-Meshkov ablative avec la fréquence  $\omega = k\sqrt{V_aV_{bl}}$  et l'amplitude  $n_0c_s/\sqrt{V_aV_{bl}}$ 

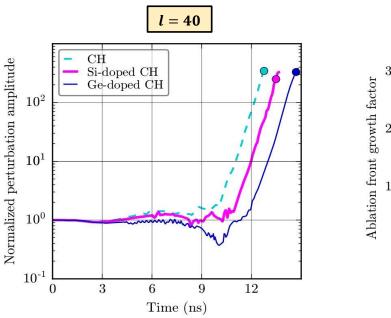


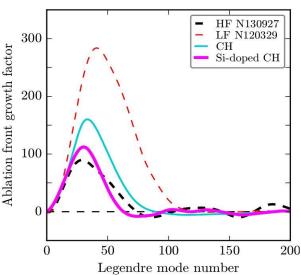
 Les designs dopés bénéficient d'une amplitude d'oscillations plus faible due à des vitesses du son et d'ablation du plasma plus faibles que dans le cas de l'ablateur en plastique pur



### Un compromis doit être trouvé entre le matériau dopant utilisé et les performances attendues pour l'implosion

 La couche de dopant de Z élevé doit rester assez mince pour cumuler à la fois les effets de stabilisation ablative pendant la phase RM et une efficacité hydrodynamique raisonnable





 Une forte concentration en dopant de Z élevé peut renverser les bénéfices de la stabilité de la phase RM en rallongeant la phase RT nécessaire à d'atteinte les conditions d'allumage



#### Les capsules avec adiabat profilé implosées avec un très fort foot présentent de bonnes performances tout en restant stables

- L'adiabat du combustible peut être sensiblement réduit en le profilant pendant le trough et la montée en puissance radiative
- Des implosions à haute vitesse de coquilles minces sont dimensionnées pour atteindre l'amorcage du régime de chauffage par particules alpha
- L'analyse de la croissance linéaire des instabilités montre que les implosions sans picket avec adiabat contrôlé sont au moins aussi stables que les implosions conventionnelles de type High Foot (HF)
- Retirer le picket d'une implosion HF permet la propagation correcte des faisceaux internes pendant l'impulsion principale tout en limitant la détente des parois d'or
- La stabilité de ces designs peut être améliorée en introduisant un matériau de Z élevé dans la partie externe de l'ablateur

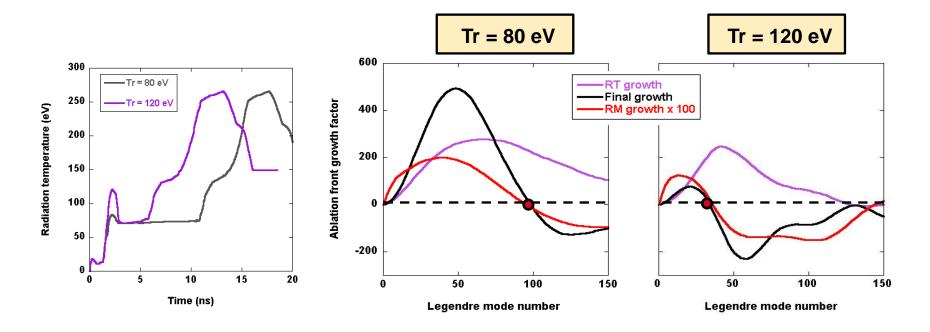




#### Back up



# Increasing the laser drive during the first picket significantly reduces the instability growth



- A higher picket weakens the amplitude of the ablative RM perturbations
- The picket strength does not affect the Rayleigh-Taylor growth phase

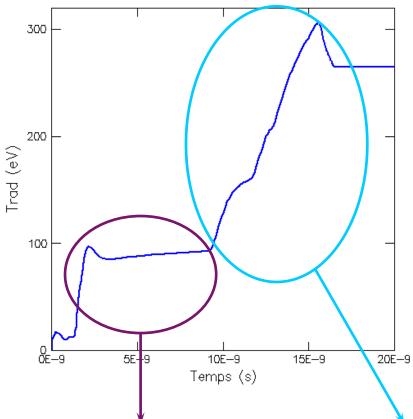
The number of the mode corresponding to zero growth scales inversely with the strength of the first shock

A. G. MacPhee et al, Phys, of Plasmas 22, 080702 (2015)



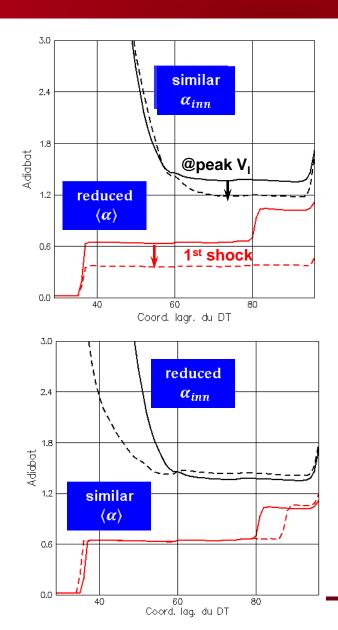
# The radiation drive can be tuned to reduce the fuel adiabat



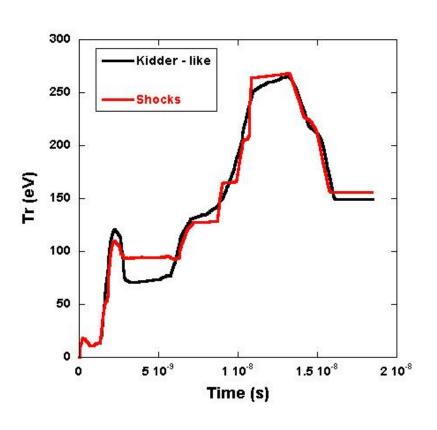


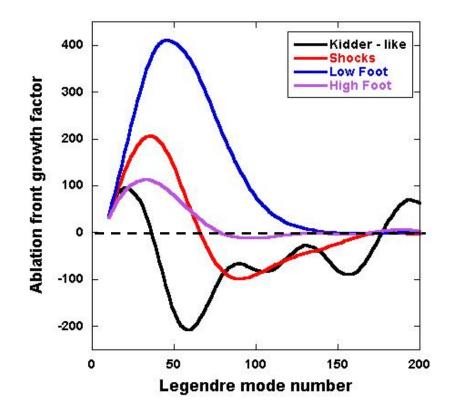
The first picket and trough strengths set the mean fuel adiabat

Tuning the rise to peak power sets the inner adiabat



# Multiple-shock and Kidder-like radiation drives show acceptable growth factors







#### Il est possible de diminuer l'adiabat d'une implosion HF en faisant varier la loi de température radiative

## The high-foot ( $\alpha$ =2.3) design has FUEL-ABLATOR growth factors many times smaller than that of low-foot implosions

