

Physique des plasmas de striction magnétique et applications

Alexandre Chuvatin

Laboratoire de Physique et Technologie des Plasmas, UMR 76488

Ecole Polytechnique, 91128 Palaiseau

X^e Congrès de la Division Plasma SFP, Paris 19-21 mai 2008



Remerciements aux collaborateurs

Centre d'Etudes de Gramat – F. Lassalle, H. Calamy, F. Hamann, A. Morell, A. Georges, J. P. Bedoch, ... équipe de la machine Sphinx

International Technologies for High Pulse Power - F. Bayol

Naval Research Laboratories, USA – L. I. Rudakov, B. V. Weber, A. L. Velikovich

Snadia National Laboratories, USA – M. E. Cuneo, B. Jones, T. D. Pointon, K. A. Mikkelsen, J. P. VanDevender, - équipes des machines Saturn et Z

University of Nevada Reno, USA - V. L. Kantsyrev, A. L. Astanovitskiy, R. Presura, K. Williamson – équipe du générateur Zebra

High Current Electronics Institute, Russie – A.A. Kim, B. M. Kovalchuk... - équipe du générateur GIT12

Définitions

Plasmas de striction magnétique :

Plasmas chauds impulsionnels

Formés et chauffés par un courant électrique impulsionnel typiquement $\sim 10^{-6}$ - 10^{-8} s

Accélérés par la force de Lorentz $j \times B$

Servent à créer :

des forts champs magnétiques rapides (des MGausses pendant μ s-ns)

des milieux à haute densité d'énergie (dizaines de MJ/cm³) et/ou des fortes pressions (TPa)

du rayonnement X (des MJ, centaines de TW), non-cohérent ou cohérent (laser X), du rayonnement keV ($h\nu > 1$ keV, centaines de kJ)

production des neutrons (qqs 10^{13}), y compris d'origine thermonucléaire DD d'une attaque indirecte (qqs 10^{11})

...

Exemples

Noms:

fils explosés, plasma focus, décharge capillaire, z-pinch, θ -pinch, X-pinches, MTF (magnetized target fusion), commutateurs à ouverture de plasma (COP), --/-- par fils ou feuilles explosés, plasma flow switch, compression de flux magnétique (compression d'un champ axial ou azimuthal), commutateurs inductifs (schéma LL)...

Pour les z-pinches – différents types : coquilles à gaz, feuilles métalliques, coquilles multi-fil, pinches structurés, pinch composé, nested ou doubles liners, hohlraum dynamique...

Chaque citation = géométrie = objectif = physique = ces succès et ces échecs

z-pinches était les premiers candidats FCI (années 1950), neutrons n'étaient pas d'origine thermonucléaire – grande déception, abandonnés

Aujourd'hui ces plasmas ne marchent toujours pas, pas de FCI (\Rightarrow peu connus en France, par qqs personnes)

Domaine très vaste \Rightarrow : Le domaine des plasmas de striction magnétique est tellement vaste, qu'on ne va pas discuter chacun de ces objets physiques

Nouvelles tendances dans les hautes puissances pulsées et z-pinches

Nouvelles tendances

Courte introduction historique (1950-1997)

Résultat (en bref) 1997-2000, 2000- (schémas d'attaque indirecte, mise en forme de l'impulsion X, compression des pellets – symétrie, expériences HEDP : ICE et Flyers, ...)

Découvertes des 2-3 dernières années :

Chauffage quasi-adiabatique – solution définitive du problème K-shell ?

L'énergie cinétique n'est pas suffisante pour expliquer les 2 MJ rayonnés ?

Plasma fortement non-homogène : conductivité modifié par l'effet Hall, chauffage accéléré ?

Réseaux plats de fils métalliques – meilleurs radiateurs ?

Préparation des fils métalliques permet de multiplier la puissance X ?

LCM : modification de la charge permet d'augmenter l'énergie EM couplée ?

Première architecture viable d'un générateur PW ?

LTD rapides – centrale thermonucléaire à 0.1 Hz ?

Conclusions et perspectives

z-pinch

JUNE 15, 1934

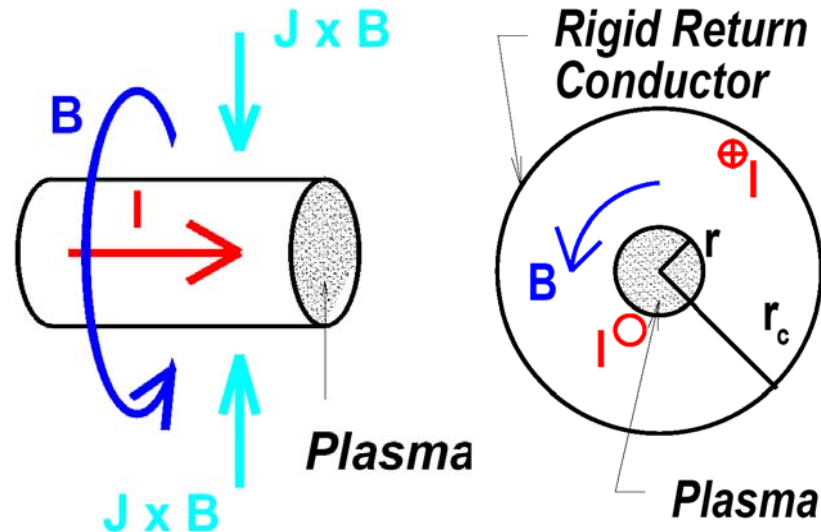
PHYSICAL REVIEW

VOLUME 45

Magnetically Self-Focussing Streams

WILLARD H. BENNETT, *Ohio State University*
(Received January 13, 1933)

Streams of fast electrons which can accumulate positive ions in sufficient quantity to have a linear density of positives about equal to the linear density of electrons, along the stream, become magnetically self-focussing when the current exceeds a value which can be calculated from the initial stream conditions. Focussing conditions obtain when breakdown occurs in cold emission. The characteristic features of breakdown are explained by the theory. Failure of high voltage tubes is also discussed.



Un fort courant J (kA-MA) passe à travers d'une charge cylindrique et crée un champ magnétique B

Le courant chauffe la matière (solide, liquide ou gazeux) par l'effet Joule et elle devient plasma

Le plasma est accéléré vers l'axe z (d'où le nom z-pinch) par la force de Lorentz

Lors de la compression sur l'axe (pincement = pinch) le plasma devient dense et se chauffe d'avantage

z-pinches étaient les premiers candidats à faire la synthèse thermonucléaire au laboratoire dans les années 1950

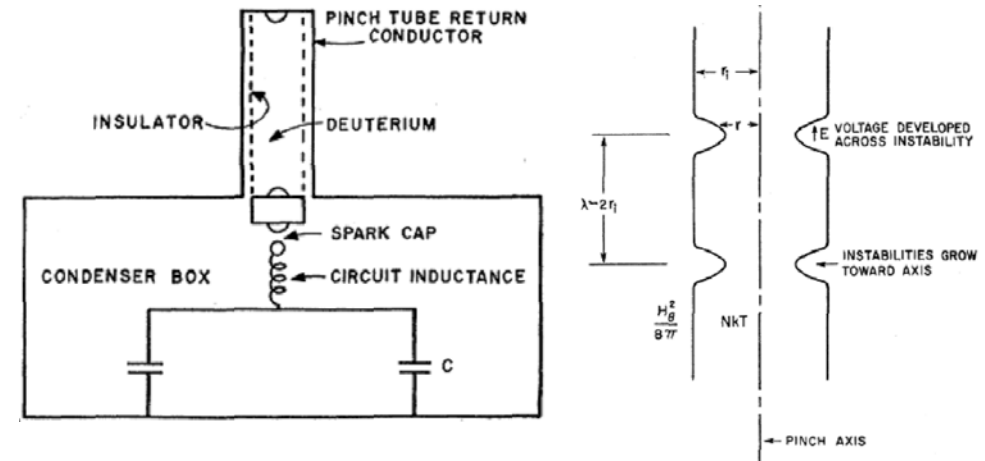
Premières tentatives de la fusion contrôlée

Après le « succès » de la bombe H, Après le « succès » de la bombe H, URSS, Angleterre et USA entreprennent les premières expériences pour effectuer la synthèse thermonucléaire contrôlée

Ces recherches sont classifiées jusqu'au juin 1956, où Kurchatov prononce à Harwell une conférence restée célèbre sur "The Possibility of Producing Thermonuclear Reactions in a Gas Discharge"



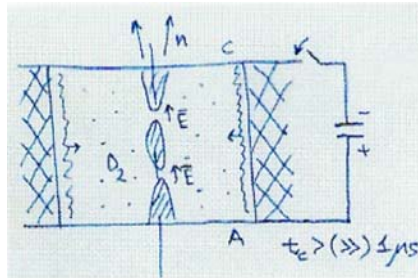
croiseur « Ordzhonikidze »



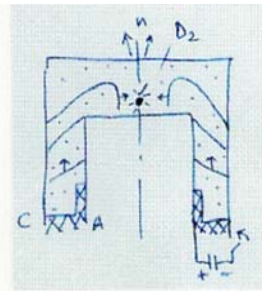
Kurchatov: « En 1952, rapidement après que les expériences avec des décharges impulsionnelles dans les gazes ont commencées, nous avons trouvé qu'au courant suffisamment élevé, la décharge dans le deutérium devient une source des neutrons... »

~10⁸ neutrons sont produits dans le plasmas de deutérium, mais il est rapidement reconnu que ces neutrons ne sont pas d'origine thermonucléaire (accélération des deutons le long de Z par un champ électrique dans les zones instable MHD m=0)

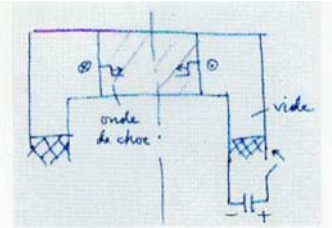
Evolution des z-pinchs 1952-1985



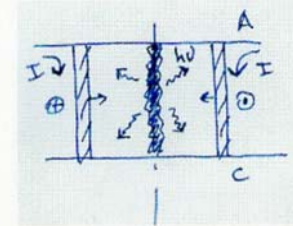
PROJET SHERWOOD



PLASMA FOCUS (>1960)



RETOUR VERS LA GEOMETRIE PLANE



COQUILLES CREUSES - LINERS (1962..., > 1984)

- 1 – 2: diélectrique est éloigné du point de pincement pour éviter les claquages de surface
- 2 – 3 : retour vers des compressions radiales pour comprimer et chauffer toute la masse
- 3 – 4 : coquilles creuses pour éviter le préchauffage par ondes de choc – liners pour une « compression isentropique »

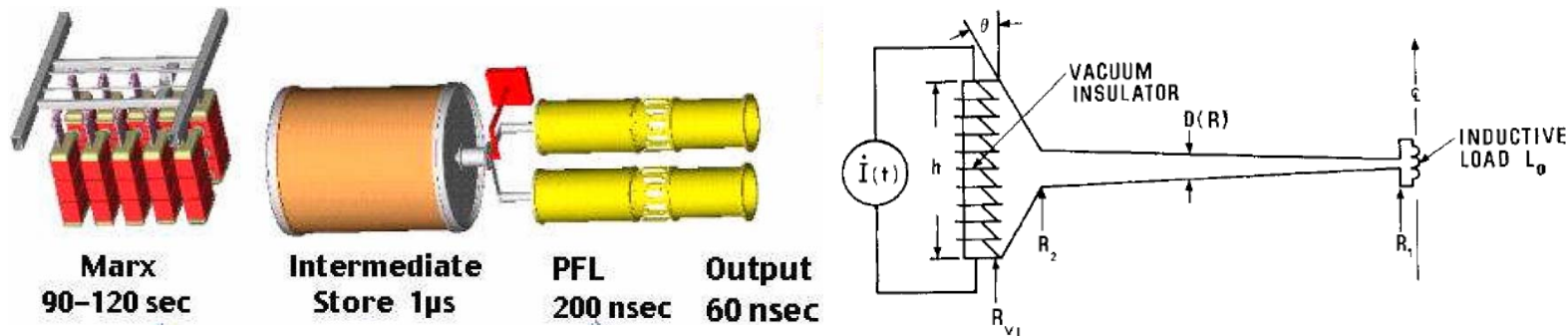
Z-pinch est trop instable pour directement chauffer D_2 , plusieurs études sur la stabilisation, c'est déjà un bon radiateur (jusqu'à 100 kJ) mais le schéma d'attaque indirecte est encore classifié

En parallèle pendant 1970's-1980's d'autres projets FCI d'attaque directe démarrent :

- faisceaux de particules - électrons (URSS, Kurchatov) ou ions légers Li (USA, Sandia)
- attaque direct par laser (USA , URSS, France,...)

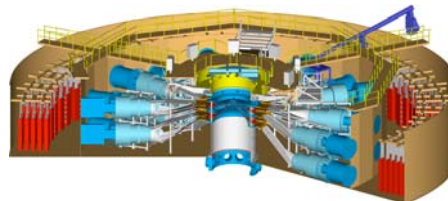
Générateurs

Pour les projets FCI par faisceaux de particules, une technique performante de hautes puissances pulsées est développée



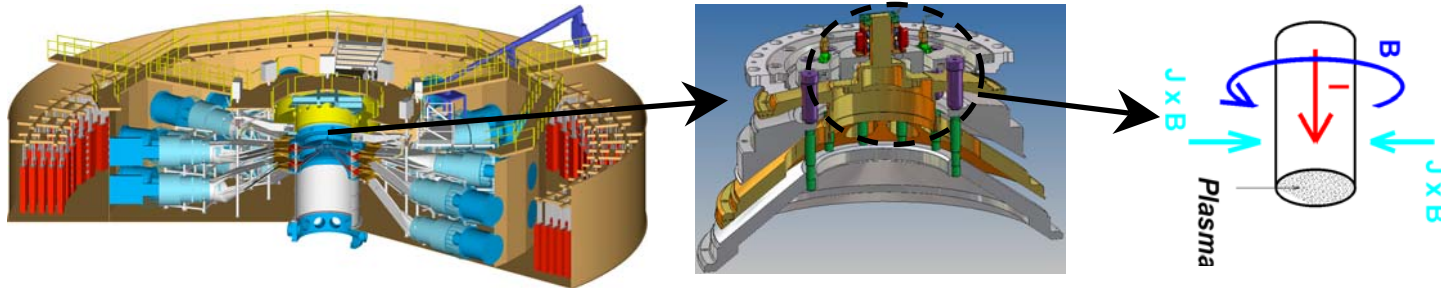
Décharge des capacités - lignes à eau (« câbles ») – diélectrique eau-vide – lignes sous vide (MITL) – charge diode à électrons ou ions

1980's - 1990's : suite aux problèmes fondamentaux de physique et technologie, les projets FCI « électrons » et « ions légers », les accélérateurs HPP sont « convertis » en générateurs de forts courants pour les charges z-pinch



Conversion faisceaux de particules – z-pinch

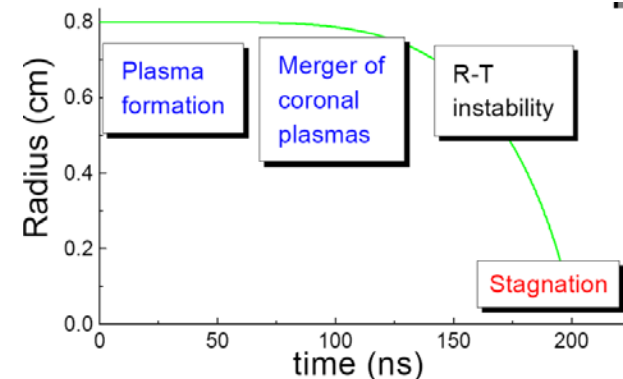
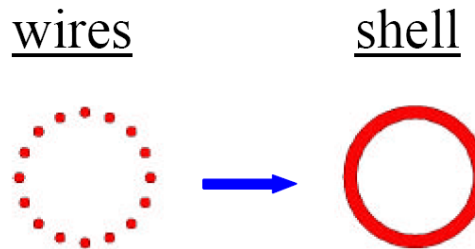
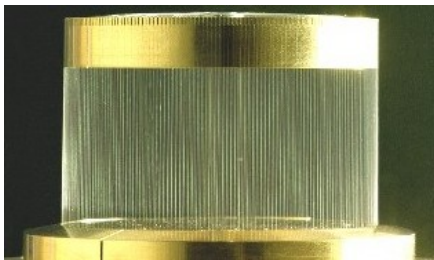
Les accélérateurs de particules sont convertis en générateurs des forts courants pour les z-pinchs : ANGARA-5 (URSS, Kurchatov) – 5 MA, PBFA-II (Sandia, USA) – 20 MA



Pour diminuer le temps de développement des instabilités de coquilles creuses accélérées (principalement Rayleigh - Taylor), le rayon initial du pinch devrait être < 1 cm

Pour convertir efficacement l'énergie magnétique M en énergie cinétique K , le champ magnétique devrait croître en $\sim 10^{-7}$ s (100 ns)

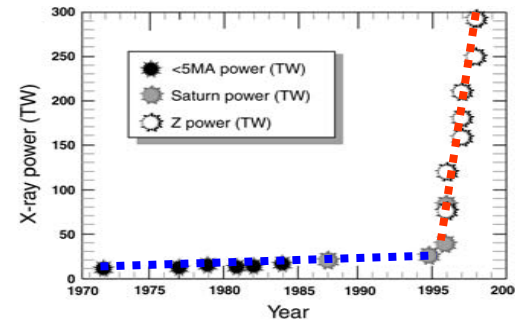
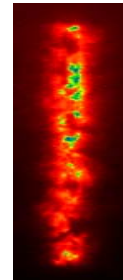
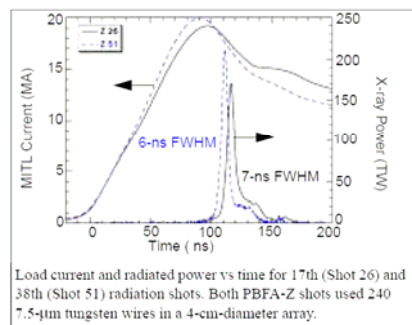
Initialisation du plasma z-pinch à partir d'un réseau de fils métallique :



Source X à 2 MJ, 300 TW

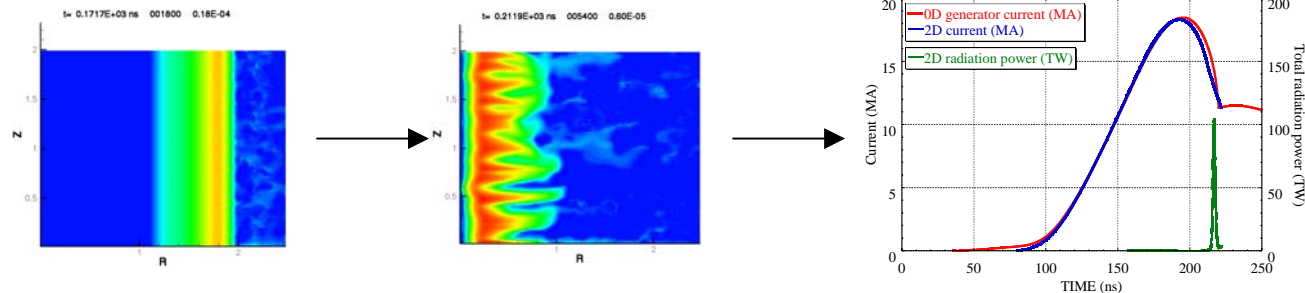
Conversion du PBFA-II en PBFA-Z (ensuite appelé machine Z) et l'augmentation du courant appliqué à un z-pinch de 6 MA (Saturn) à plus de 15 MA a permis d'augmenter le nombre de fils jusqu'à ~300 sur le rayon initial de 1-2 cm

Un tel z-pinch comprimé par un courant de ~20 MA a rayonné bientôt 1.85 MJ, 160 TW et la configuration à 2 coquille (extérieur-intérieur) a rayonnée jusqu'à 300 TW



Matzen, PoP 1997 ; Ryutov *et al*, RevModPhys 2000

Pourquoi une telle performance radiative ? Seul idée pendant plusieurs années : à cause du très grand nombre de fils on obtient la meilleure homogénéité θ -z et diminue la perturbation initiale pour RT

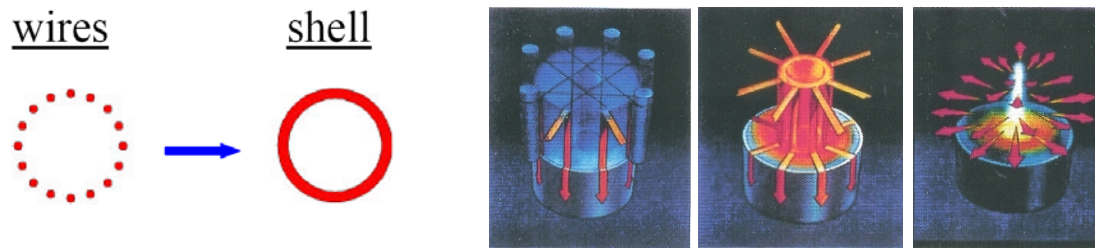


Physique 2D des z-pinch - liners

Energie magnétique M est convertie en énergie cinétique K du liner (= coquille creuse)

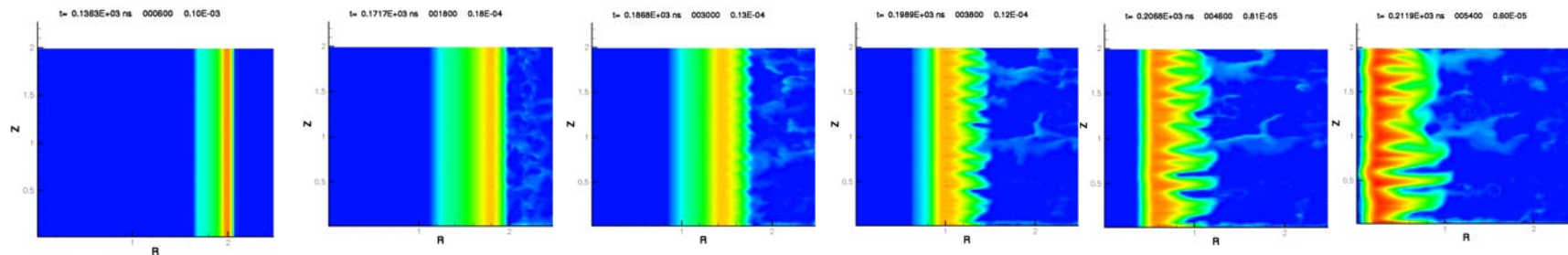
Lors de l'implosion sur l'axe, l'énergie K est convertie en énergie thermique des ions T_i

Les ions chauffent les électrons, $T_i \rightarrow T_e$ et les électrons rayonnent E_{rad}



Développement du Rayleigh – Taylor magnétique 2D augment le temps de thermalisation et limite la quantité de la masse chauffée, donc E_{rad}

Beaucoup de gens pensent toujours que c'est à cause de la meilleure homogénéité θ - z (très grand nombre de fils) qu'une telle performance radiative est obtenue et que c'est l'instabilité RT qui empêche d'avoir plus de E_{rad} , W_{rad} ...



Source pour la FCI ?

Le schéma d'attaque indirecte est déjà déclassifié (Lindl, PoP 1995)

Tout de suite après le succès, à la Sandia démarre la recherche HEDP liée à la fusion contrôlée déjà en 1997

Double-Ended Hohlraum : proposée par LLNL (Hammer, PoP 1999)

Dynamic hohlraum : proposé par IAE Kurchatov (Smirnov, PPCF 1991)

~160 articles dans des revus, plusieurs PRL après 2000:

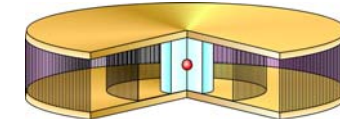
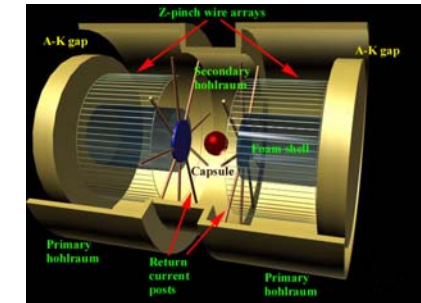
Mise en forme de l'impulsion X, excellente répétitivité de l'impulsion X, études de DEH et hohlraum dynamique, excellente symétrie d'implosion de la capsule, production des neutrons du z-pinch (3×10^{13}) et d'origine thermonucléaire DD d'une attaque indirecte (3×10^{11})...

(Bennett *et al*, PRL 2002 ; Bailey *et al*, PRL 2002, 2004 ; Vesey *et al*, PRL 2003 ; Ruiz *et al*, PRL 2004 ; Cuneo *et al*, PRL88 2002, PRL94&95 2005 ; Sinars *et al*, PRL 2004 ; Foord *et al*, PRL 2004 ; Sanford *et al*, PRL 2007)

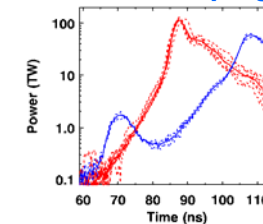
Collaboration avec LLNL et LANL (Lasnex, Sesame)

Instrumentation de plus en plus riche en diagnostics (utilisation du laser Beamlet 2 TW pour la radiographie X et passage à 4 PW en 2007-2008 pour les études d'allumage rapide)

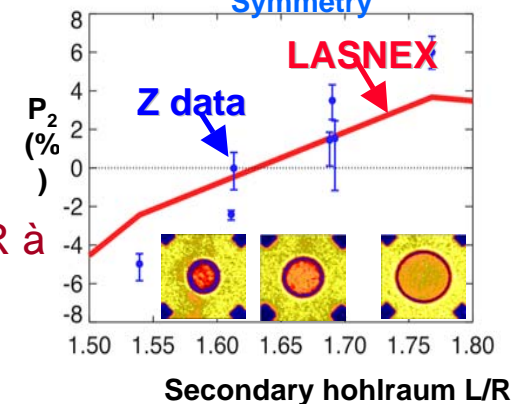
Amélioration de la machine Z à ~18 MA : passage à la machine ZR à 26 MA en 2008



Pulse shaping



Symmetry



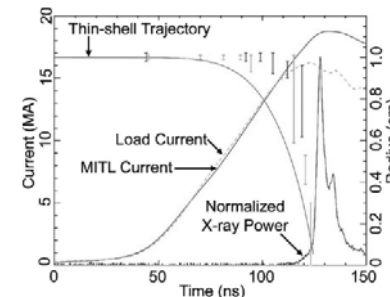
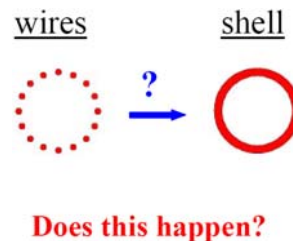
La vraie physique des z-pinches WA

WA = wire array = réseaux à fils

Physique des z-pinches, est-elle claire ? Les simulations numériques : sont elles correctes ?

Aleksandrov *et al.*, JETP 2003; Lebedev *et al.*, PRL 1998; Sinars *et al.*, PRL 2004; Aleksandrov *et al.*, JETP 2004:

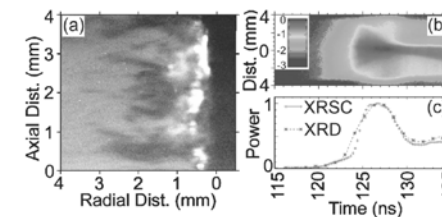
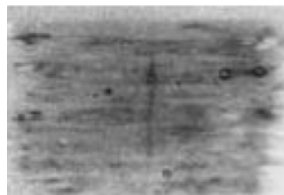
Ca se passe comme ça ? NON !



Effet precursor : une coquille creuse ne se forme jamais, chaque fil émet des centaines jets de plasma (ombroscopie laser)

Image du z-pinch dans les rayons X mou au moment proche du maximum du rayonnement X : le taux de compression est de 3-5 au lieu de 20 (ce qui expliquerait 2 MJ rayonnés)

30% du puissance X apparaît AVANT que toute la masse accélérée arrive sur l'axe



Modèle théorique

Le chauffage du plasma pourrait être chauffage Joule. Mais la résistivité Spitzer n'est pas suffisant pour expliquer la dissipation de ~ 1 MJ pendant ~ 10 ns

Dans les hautes densités, les seuils des instabilités plasma connus (i.g. $u > c_s$) ne sont pas franchi pour évoquer des résistance anormales

Chuvatin *et al.*, DZP 2005 ; Kantsyrev *et al.*, HEDP 2007, PoP 2008
(confirmation expérimentale):

Modèle du chauffage anormal d'un plasma fortement inhomogène

Le plasma du z-pinch est une colonne avec des structures 3D turbulents, où existent des hautes et des basses densités

Dans les basses densités, l'effet Hall doit être pris en compte, ceci modifie la résistivité

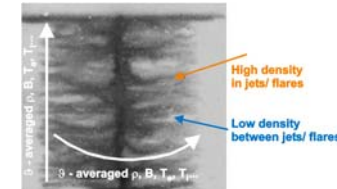
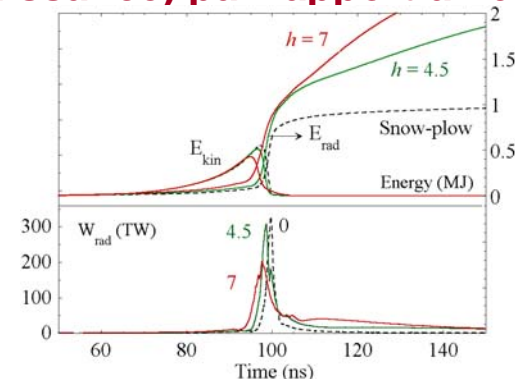
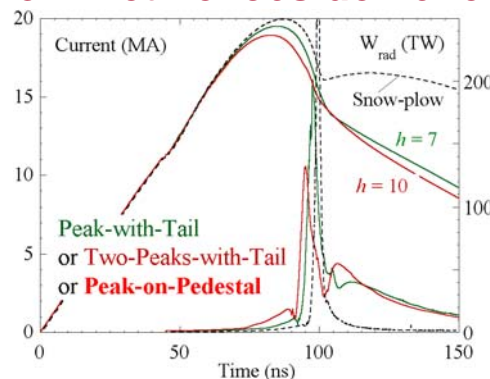
Large-scale resistivity

$$\rho = \frac{1}{\sigma} \left[1 + (h \omega_e \tau_{ei})^2 \right]$$

$h > 1$ density contrast factor
 $h = (\text{average } \rho) / (\text{low } \rho)$
Inhomogeneity length scale
 a drops out

Les basses densités sont auto-maintenues (Chuvatin *et al.*, PRL 2004)

Modélisation des pinches WA avec un code 1D MHD radiative (ρ modifiée) explique la forme de l'impulsion X et l'excès de l'énergie (puissance) par rapport à l'énergie cinétique:

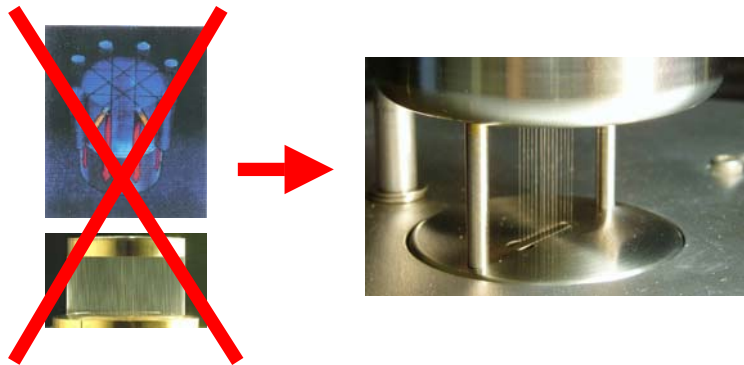


Confirmation expérimentale : z-pinches plats

Expériences collaboratrices UNR (Université de Nevada Reno), NRL (Naval Research Lab) et EP (Ecole Polytechnique)

Kantsyrev *et al*, IEEE TPS 2006, HEDP 2007, PoP 2008

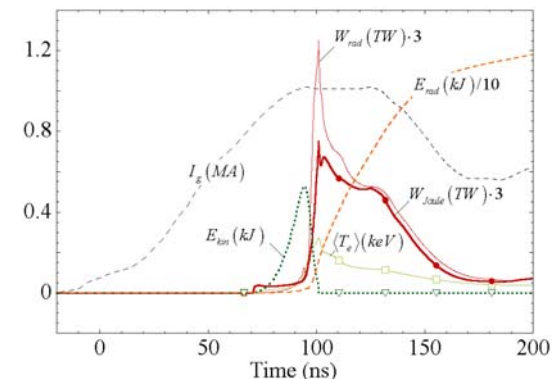
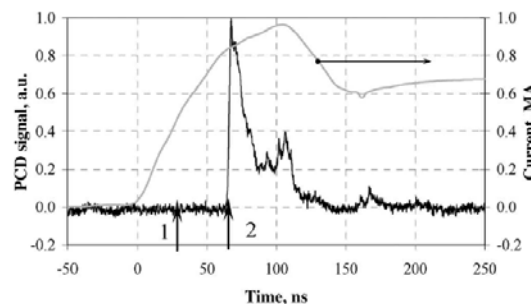
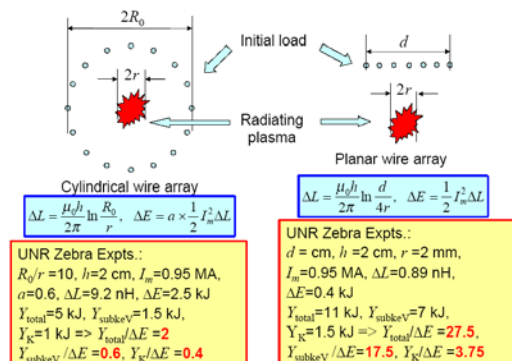
z-pinches initiés par un réseau de fils plat : PWA = planar wire arrays:



Vérification du modèle résistif : Dans les PWA la variation de l'inductance est très faible \Rightarrow énergie cinétique négligeable. Les PWA rayonneraient uniquement à cause de leur résistance

Les PWA sont meilleurs radiateurs que les z-pinches cylindriques (7 kJ au lieu de 1-2 kJ sur Zebra)!

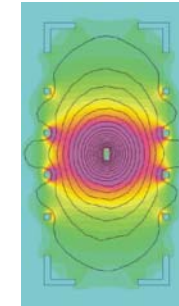
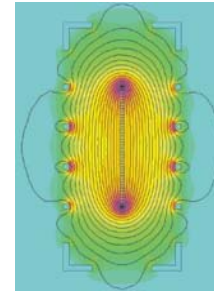
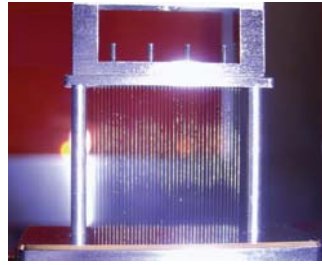
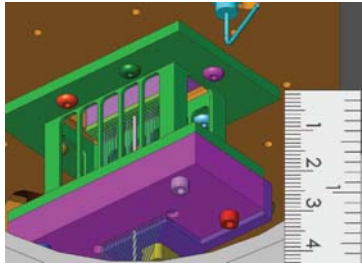
Simulation des PWA par le modèle résistif Hall reproduit bien la forme de l'impulsion et la puissance (et énergie) X



z-pinches plats à la Sandia

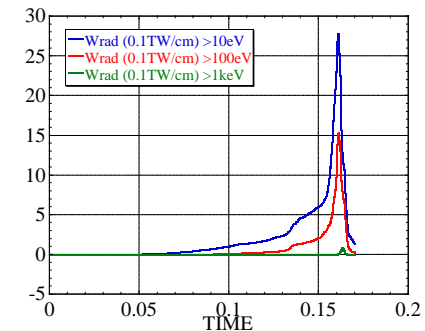
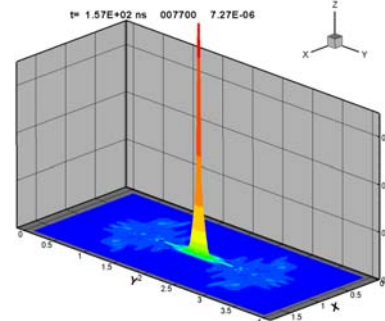
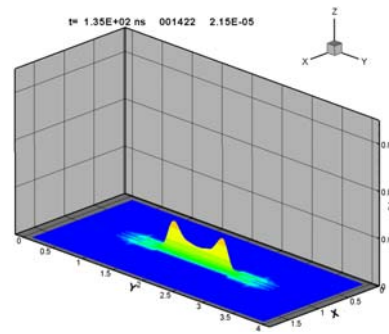
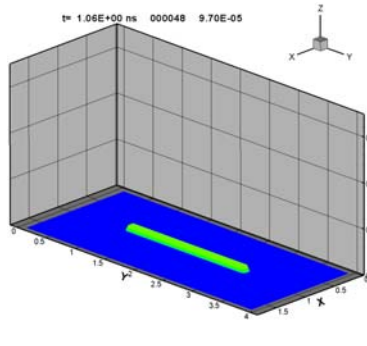
Les résultats à UNR ont motivé une expérience sur Saturne à 3 MA à la Sandia : expériences collaboratrices SNL – UNR - EP en 2007

Jones *et al*, sera présenté en 2008:



Des simulations XY MHD radiative avec ρ modifiée Hall et avec le contraste hautes densités/ basses densités de 2-3

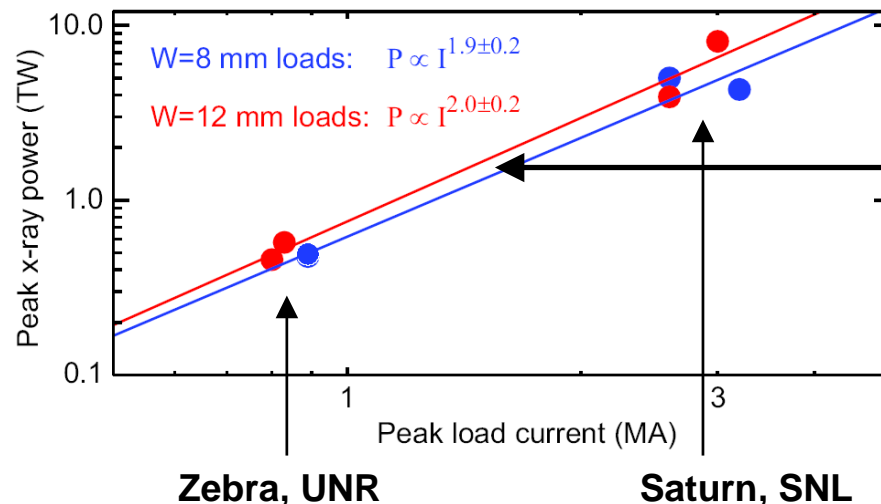
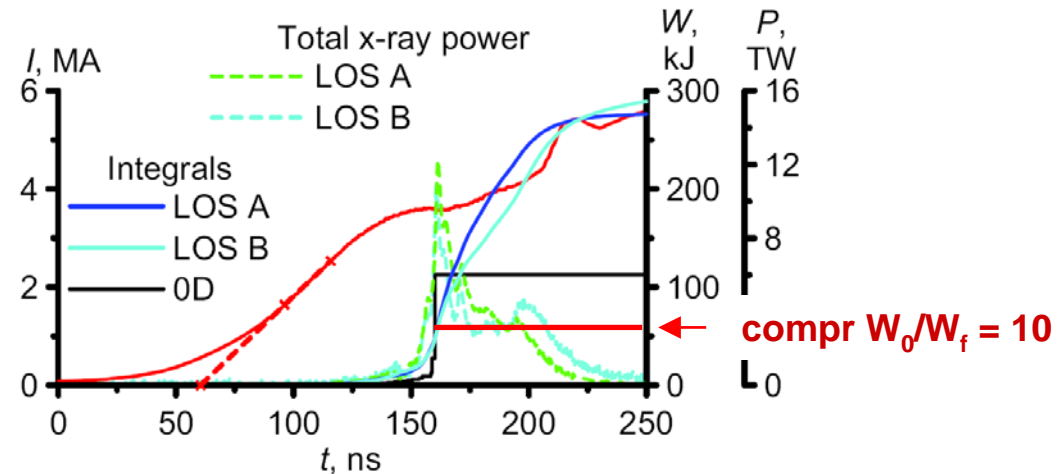
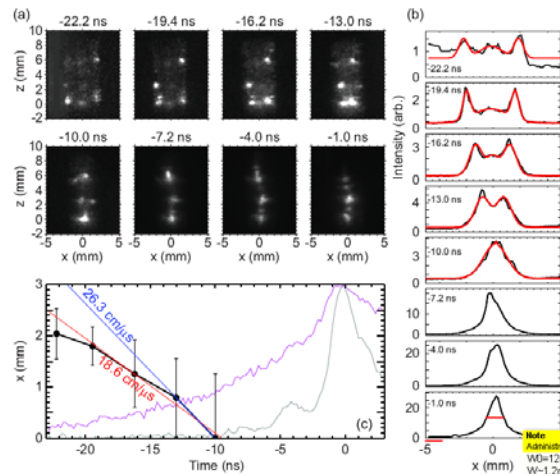
Les simulations ont prédit ~6-8 TW de la puissance X : ~10 TW est mesuré dans l'expérience !



Résultats PWA sur Saturne

Jones *et al*, sera présenté en 2008:

Le taux de compression selon les images X et $\leq 10 \Rightarrow$ L'énergie cinétique n'explique qu'environ 10-20% de l'énergie X dans l'impulsion principale



Loi d'échelle $W_{\text{rad}}(I) \propto I^{1.9-2}$, se qui correspondrait à 400 TW à 20 MA

Point supplémentaires sont indispensables : Zebra à plus fort courant en utilisant l'idée LCM

la suite... : LCM = load current multiplier

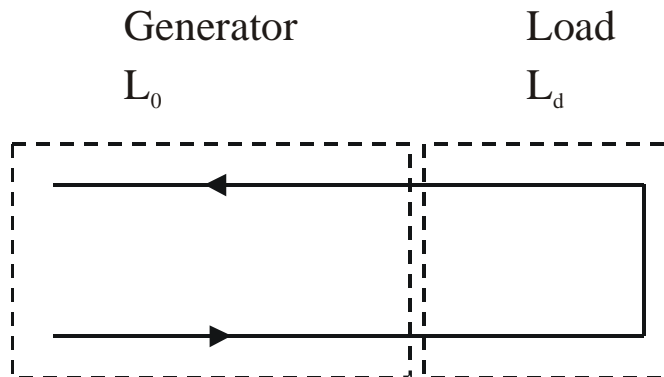
PULSE POWER GENERATOR AND LOAD

Irreducible generator inductance L_0

Load: by definition a small volume with high energy density

$L_d \ll L_0$

$E_{\text{load}}/E_{\text{generator}} = L_d/(L_0 + L_d)$



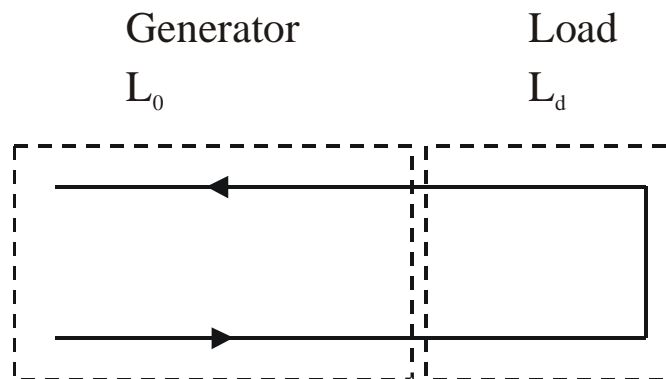
Maximum load current I_0 and minimum current rise-time t_0 are restricted by L_0 in generator circuit

LOAD CURRENT MULTIPLIER (LCM) CONCEPT

Irreducible generator inductance L_0

Load: by definition a small volume with high energy density

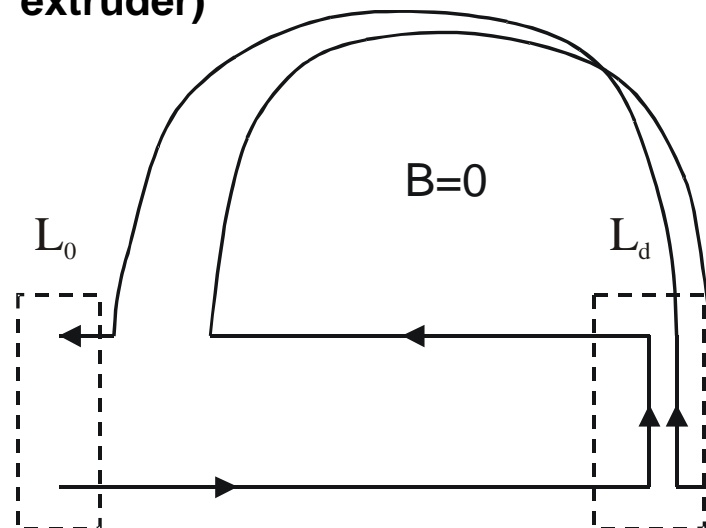
$L_d \ll L_0$



Maximum load current I_0 and minimum current rise-time t_0 are restricted by L_0 in generator circuit

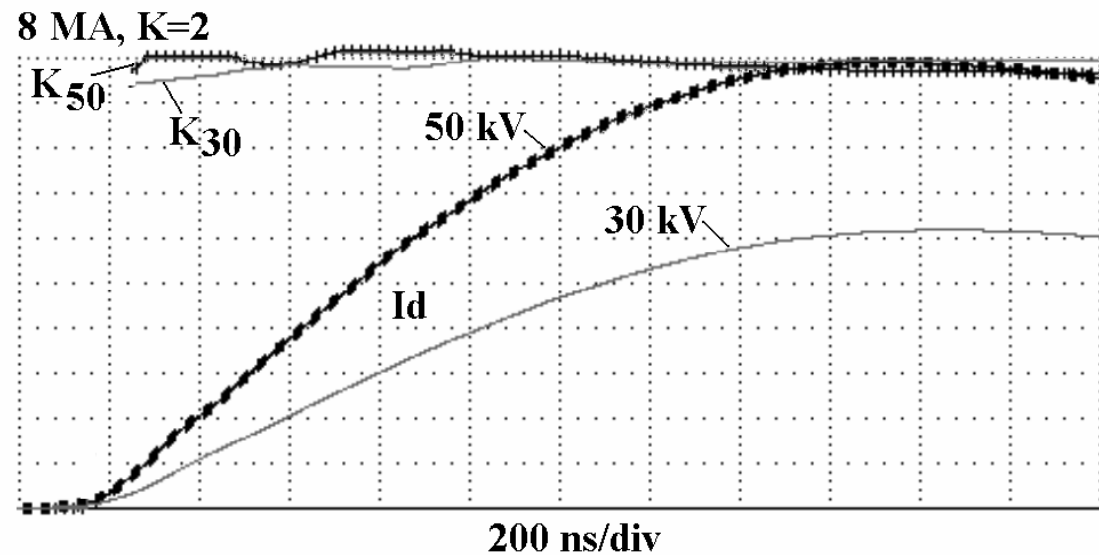
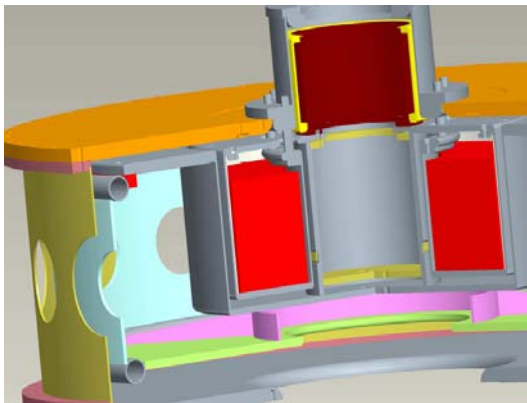
Generator current passes 2 times (N times) through load

A large volume inductance prohibits alternative current paths (magnetic flux extruder)



Ideal coupling: large volume inductance is not added to L_0 , load current is N times the generator current

CORED LCM OPERATION WITH STATIC LOAD



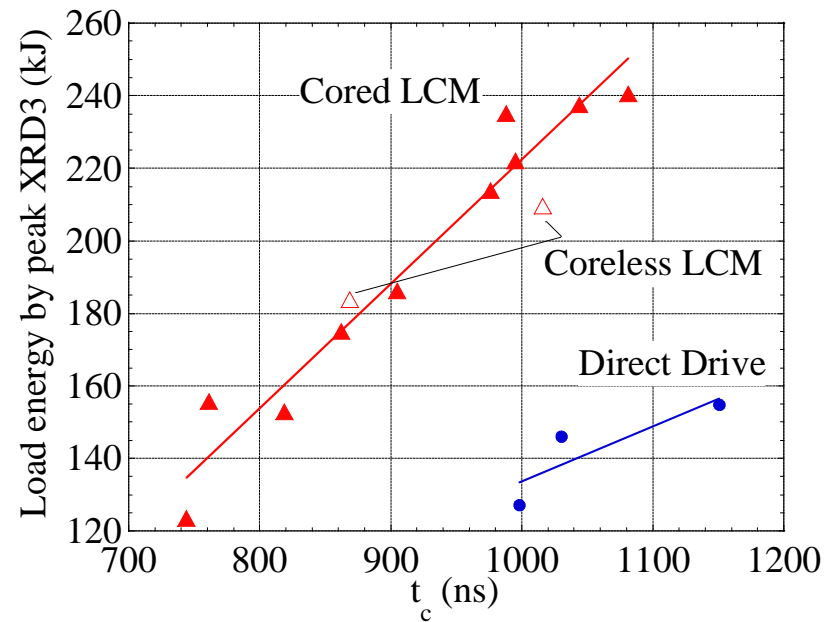
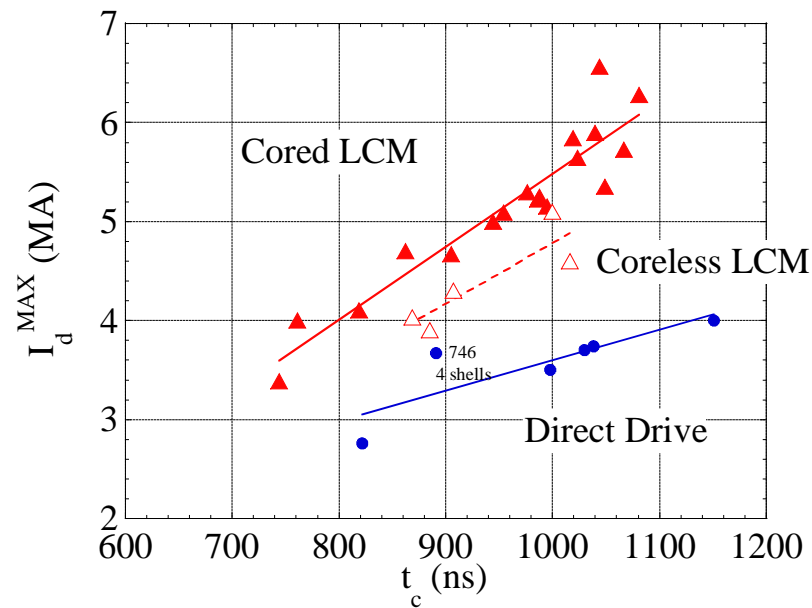
GIT12 DID NOT CHANGE WHEN LOOKING FROM OUTSIDE!

$L_d = \text{const} = 5 \text{ nH}$

Experimental generator-to-load current ratio $k \approx 2$

Load current increased from 4.7 MA @ 1.7 μs to 8 MA @ 1.7 μs

Z-PINCH CURRENT AND ENERGY



No total radiation energy/power measurements were available

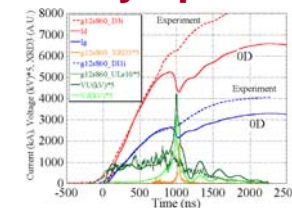
Electromagnetic energy delivered to load estimated from exp. voltage/current

(May be underestimated if the voltage probe failed...)

Increase of maximum load current before impl. and load energy at X-rays peak

From 3.6 MA (no LCM) to 6.5 MA at same impl. time

From ~130 kJ to ~220 kJ at $t_c = 1 \mu s$



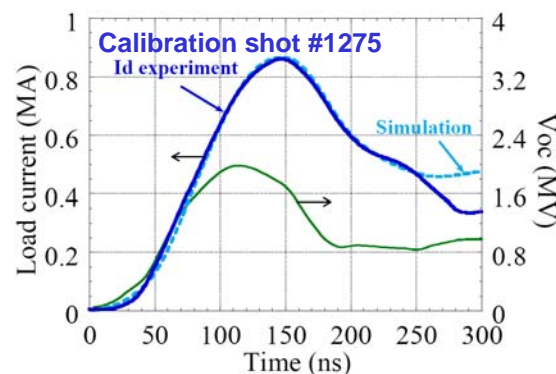
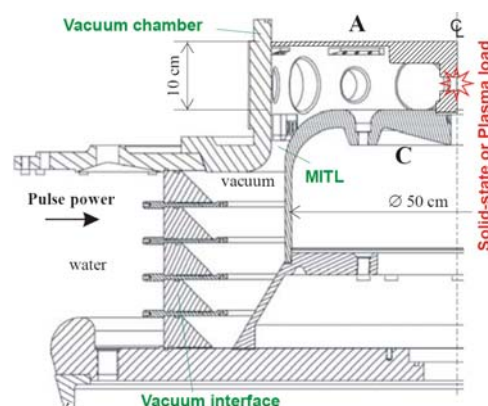
LCM = Load Current Multiplier

Chuvatin et al, Beams 2004, RSI 2005, Congès HCE 2006, PPC 2007, sera présenté en 2008:

Load Current Multipliers (LCM) is a new concept theoretically formulated in 2005

LCM improves generator-to-load energy transfer efficiency without changing generator architecture

The concept validated by 2007 on long-pulse low voltage generators in France and Russia (> 50 nH, < 300 kV, ~ 1 μ s): demonstrated current increase from 4.5 to 8 MA



Standard output hardware of Zebra @ UNR

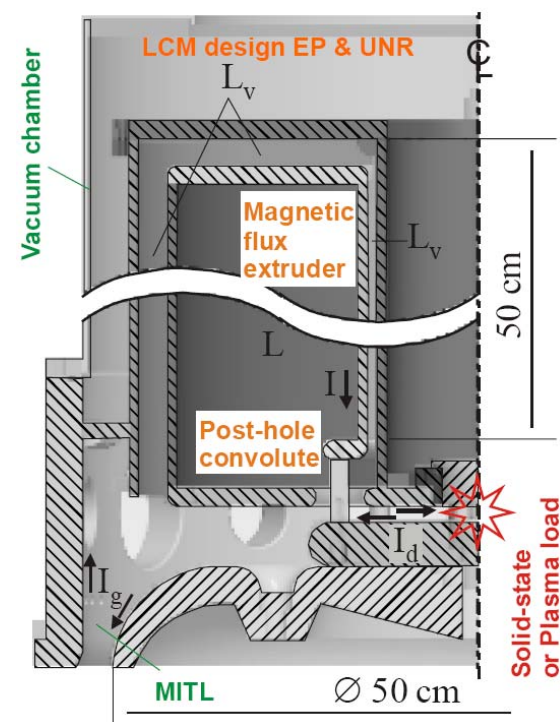
Nominal generator operation:

Open-circuit voltage $V_{oc} \leq 2$ MV, load current $I_d \leq 1$ MA

Joint experimental campaign June2007 and Oct2007 @ UNR

University of Nevada Reno - Ecole Polytechnique (France) - SNL

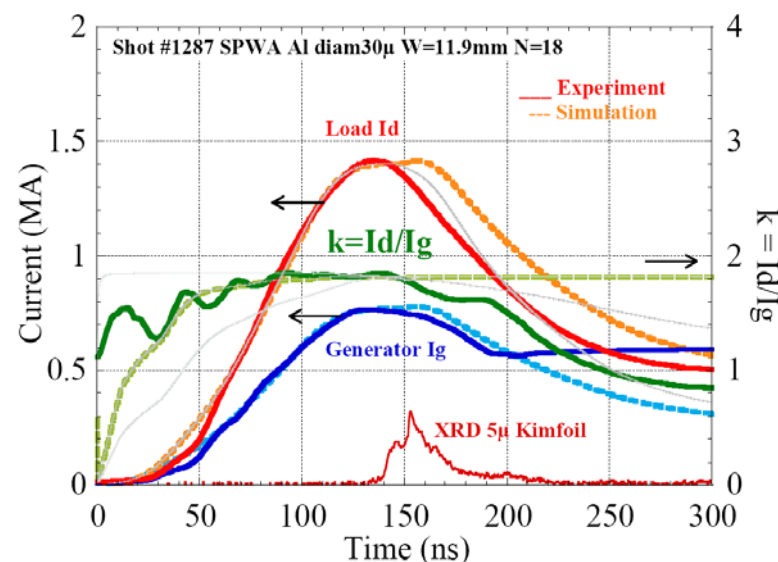
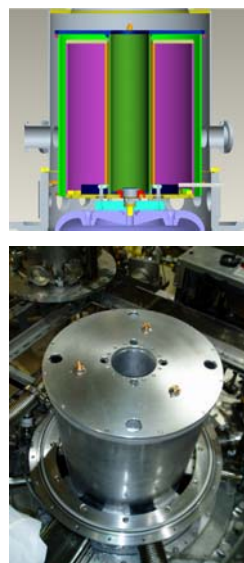
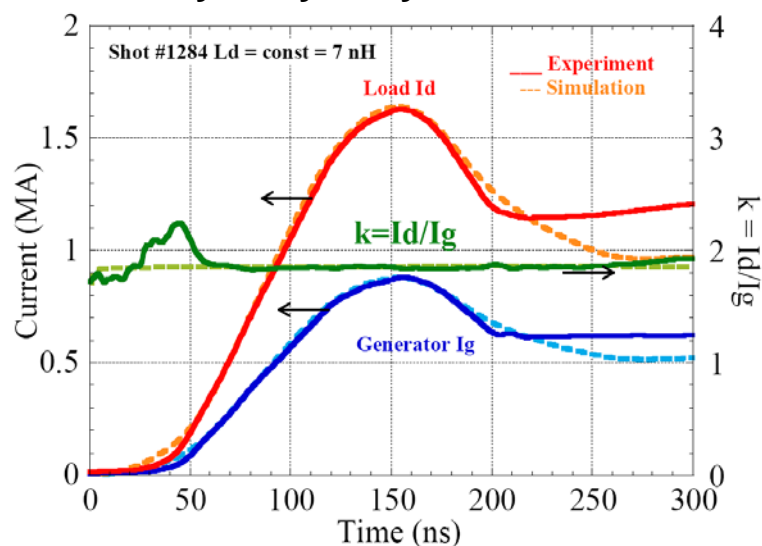
Objective: Validate the concept on a short-pulse high voltage generator at UNR (1.9 Ohm, 100 ns, $V_{oc} \sim 2$ MV)



Joint LCM experiments June2007 and Oct2007 @ UNR

Shot #1284 (LEFT): 6 mm diameter rod, constant load inductance $L_d \approx 7$ nH

Load current amplitude increased from nominal 0.8-0.9 MA to 1.62 MA in this shot, ± 0.05 MA uncertainty/ asymmetry



Shot #1287 (RIGHT): z-pinch SPWA, 18 Al wires, 30 μ diameter, width = 11.9 mm

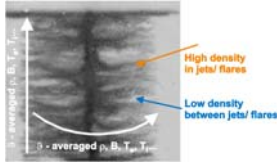
In this SPWA shot: Generator current is lower due to non-nominal Zebra operation, NOT DUE TO LCM

- ▷ Load current multiplication coeff. $\kappa = I_d/I_g \sim 1.8 \pm 0.1$ at peak current, close to theory/simulations
- ▷ \Rightarrow lossless LCM design: MITL's and PHC at high electric fields (> 1 MV/cm) and plasma radiation
- ▷ SPWA κ drops below κ^{theor} after first XRD peak w/o current asymmetry \Rightarrow pinch resistance of 0.1-0.2 Ohm

First LCM concept validation at 100 ns, high V_{oc} , constant-inductance and z-pinch loads

Demonstrated 1.6 MA load current makes UNR's Zebra generator the highest-current university pulse-power in the world

Conclusions et perspectives



Large-scale resistivity

$$\rho = \frac{1}{\sigma} \left[1 + (h \omega_e \tau_{ei})^2 \right]$$

$h > 1$ density contrast factor
 $h = (\text{average } \rho) / (\text{low } \rho)$
 Inhomogeneity length scale
 a drops out

Des mesures directes du contraste hautes densités/basses densités permettrait de raffiner le modèle de résistivité anormale Hall

La mise en marche de la machine ZR permettrait, entre autre, d'étudier la loi d'échelle $E_{\text{rad}}(I)$ et $W_{\text{rad}}(I)$

Ces lois d'échelle seront un challenge pour le modèle Hall (ou d'autres modèles qui pourraient apparaître)

Les réseaux de fils plats et/ou des réseaux de fils cylindrique compacts ($r_0 \sim 2-3$ mm) sont des « radiateurs résistive » par définition

Si leurs performances radiatives sont confirmées à >5 MA, leur compacité permettrait d'avoir des cavités de chauffage à plus haute température radiative

La suite du développement de l'idée LCM permettrait d'augmenter le courant charge pour les z-pinches et d'autres charges (ICE, Flyer = envoi de plaque)

Cette technique semble être nécessaire pour la future génération des machines haute puissance (Z : $L_0 = 8.5$ nH, ZR : $L_0 = 13$ nH, générateur PW : $L_0 = 25-30$ nH)

