

Programme National de Physique Stellaire

Jean Pierre-Chièze CEA / DSM / Irfu Service d'Astrophysique - Al

et, par ordre d'entrée en scène : L. Biennier, R. Georges, C. Winisdoerffer, S. Turck-Chièze, J.-E. Ducret, E. Falize, C. Stehlé, C. Michaut,



Colloque Prospective PNPS

Besançon 24 – 27 février 2014

Deux grandes classes d'expériences auprès des grands lasers

Acquisition de données microscopiques

Recherche de l'ETL ... ou pas.

Équations d'état

Opacités

Taux de réactions thermonucléaires

Phénomènes dynamiques dans les plasmas

Chocs dans les plasmas

Instabilités

MHD

Plasmas photoionisés

De la formation à la destruction des grains carbonés dans les enveloppes circumstellaires

L. Biennier, R. Georges - Institut de Physique de Rennes

S. Kassi - Lab. Interdisciplinaire de Physique

Collaboration : Aerospace Engineering Department (IISc, Bangalore)



La brusque élévation de température (<4000K) du mélange gazeux (H_2 et Ar) et de l'échantillon de carbone (zone 1) induite par l'onde de choc réfléchie (zone 5) conduit à la formation d'hydrocarbures volatils et modifie la structure des particules de carbone.



La pyrolyse de l'acétylène dans le réacteur à 2000 K synthétise des espèces carbonées. Un jet supersonique reproduit le fort gradient thermique qui règne dans les enveloppes circumstellaires. La part des processus chimiques et physiques qui conduisent à la formation de poussières carbonées est évaluée par spectroscopie ultra-sensible (CRDS). Modélisation de l'opacité des enveloppes des étoiles AGB carbonées:

- Une base de données spectroscopiques IR à haute température pour l'acétylène est en cours de finalisation (collaboration M.Herman/ULB et B. Plez/LUPM [3])
- Des études de cinétique réactionnelle impliquant des hydrocarbures ont été menées à haute température [1, 2] mais également à basse température pour certains PAHs [4, 5]

Formation et destruction de grains carbonés dans les enveloppes circumstellaires (ECS):

 - le PNPS a financé une part importante du spectromètre ultra-sensible CRDS
 - Cet instrument est désormais opérationnel et utilisé pour caractériser les espèces moléculaires formées à haute température en tubes à choc (A)

- Notre objectif à moyen terme est de mieux comprendre le rôle des ondes de chocs hypersoniques dans les ECS sur la physico-chimie des grains. La prochaine phase consistera à sonder les processus *in-situ, i.e.* dans le tube à choc sans procéder à des prélèvements

- Le spectromètre CRDS est également opérationnel pour sonder la formation des particules carbonées en détentes supersoniques (B). Travail en cours.

Le Laser MégaJoule – PETAL





Les 30 chaînes sont implantées dans 4 halls de part et d'autre de la chambre





De nombreux dispositifs de mesure

- ► diagnostics « laser »
- ► 36 diagnostics « plasma »
- 60 nez de chambre et systèmes de conversion de fréquence Systèmes d'alignement, porte-cibles cryogénique et non cryogénique 4000 tonnes d'équipements et de structures stables au µ

Aluminium ©~10 m e_p ~ 10 cm 203 ouvertures 110 tonnes

- OMEGA (Rochester)
 → 15 kJ, 60 beams
 National Ignition Facility (Livermore)
 → 1.6 1.85 MJ (2.2 MJ)
 Laser MégaJoule
 (CEA, Bordeaux)
 → Starting of operation: 2015 -2016
- \rightarrow PW laser beam PETAL

C. Winisdoerffer, F. Soubiran, G. Massacrier, A. Potekhin, S. Brygoo





Connaissance des **propriétés thermodynamiques** de la matière dans les conditions de température et de pression correspondant à ces objets.

Cces conditions thermodynamiques sont actuellement atteintes dans les expériences à haute pression menées aux États-Unis : NIF, «National Ignition Facility », LCLS « Linac Coherent Light Source » ... et plus tard en France au CEA sur le LMJ.

C. Winisdoerffer, F. Soubiran, G. Massacrier, A. Potekhin, S. Brygoo

La caractérisation des **propriétés thermodynamiques** des plasmas denses dans des conditions astrophysiques, ainsi que leurs propriétés de transport (diffusivité, conductivité, opacité...) est **cruciale pour la compréhension, la caractérisation et la modélisation de objets denses.**

Outils théoriques et numériques de la physique statistique et de la mécanique quantique :

- ✓ dynamique moléculaire quantique,
- ✓ simulation Monte-Carlo,
- ✓ modèles de sphère ionique.

Application de ces calculs au cas des plasmas astrophysiques:

- ✓ plasmas H/He dans les planètes géantes ;
- ✓ plasmas C/O dans les naines blanches ;
- ✓ plasmas H/Fe dans les étoiles à neutrons.

Les lasers de grande puissance sondent la matière dans des conditions thermodynamiques similaires.

Recherche de diagnostics pour les expériences de chocs afin de comparer les modèles théoriques/numériques à des résultats expérimentaux.



Équation d'état de l'Hélium dense

(I) table d'Équation d'État $[10^{-4} - 10^2 \ g \ cm^{-3}] \times [10^2 - 10^9 \ K]$

Applications aux étoiles, planètes géantes, atmosphères de naines blanches.

> Test la qualité d'une EOS: comparer ses prédictions aux résultats expérimentaux.

Détermination expérimentale de la pression en fonction de la compression le long de courbes d'Hugoniot de différentes précompressions initiales.



Les courbes correspondent aux modèles théoriques de Soubiran & al. (soumis PRE).

Les triangles indiquent les résultats de Nellis (1984) et les cercles ceux de Eggert (2008)

Plasmas denses: équation d'état de He

Métallisation de l'héliumSoubiran, Mazevet, Winisdoerffer et Chabrier

Si on analyse les calculs *ab initio* pour tenir compte d'une **dépendance sur la température de l'énergie du gap**, l'Hélium devient métallique (fermeture du gap) à des densités beaucoup plus élevées, autour de $10 g \ cm^{-3}$.

Confirmation expérimentale par la mesures de la réflectivité et de la conductivité de l'Hélium à haute densité. (Celliers et al. PRL 104,2010)



Comparaison expérience-théorie de la réflectivité de He Soubiran et al., PRB, 86 (2012)



Comparaison expérience-théorie de la conductivité de He Soubiran et al., PRB, 86 (2012)

Des expériences à haute pression sur une vaste gamme de température et de densité sont nécessaires pour déterminer correctement le comportement du gap - un problème d'une importance cruciale pour les applications astrophysiques.

Plasmas denses: stabilité du mélange H-He

Simulations directes de démixtion d'un mélange équimolaire d'hydrogène et d'hélium



Trajectoires d'un melange H-He (50%-50%) @ 2.39 g/cc, 4000K sur 120 pas de temps, illustrant la demixion du systeme.

F. Soubiran, S. Mazevet, C. Winisdoerffer, & G. Chabrier, PRB 87, 2013



Signature sur la reflectivite a 532 nm d'un melange H-He (50%-50%) @ 2.39 g/cc, 4000K

La réflectivité du plasma au cours de cette transition de phase liquide-liquide dans les conditions rencontrées dans les intérieurs planétaires géantes, présente une signature à des longueurs d'onde accessibles à une mesure par VISAR.

Échelle de temps compatible avec les mesures dynamiques

Soutien du PNPS: 2011-2014: 17.5 k€

Faut-il « revoir » les expériences ... ou la théorie ?

Probablement les deux!

Théorie l'EOS de He est un ajustement reposant sur des points issus de différentes approches.

basse densité : l'approche « chimique » de Saumon, Chabrier & van Horn densités intermédiaires: approche « DFT-PIMC » densités élevées : Chabrier & Potekhin.

approches DFT-PIMC ... pertinence des approximations (fonctionnelles) ? Limite thermodynamique avec 32-64-128-256-512 particules

Expériences EOS de normalisation du quartz en question. La forte élévation de la température en montant sur le long d'une adiabatique de choc (Hugoniot) nous éloigne du domaine astrophysique de basse entropie.

Fort potentiel de l'installation PETAL + LMJ dans ce domaine partir d'une cible suffisamment précomprimées (enclume de diamant) possibilité d'une compression élevée et quasi isentropique par des chocs multiples.

Les opacités stellaires

Validations théoriques et expérimentales sur LULI2000 et LMJ

Sylvaine Turck-Chièze, P.I., J. E. Ducret, D. Gilles, M. Le Pennec, CEA-SAp

- C. Blancard, T. Caillaud, P. Cosse, T. Blenski, J. Farriaut,
- G. Faussurier, F. Gilleron, J. C. Pain, M. Poirier, C. Reverdin, X. Ribeyre, V. Silvert,
- F. Thais, B. Villette CEA France
- F. Delahaye, C. Zeippen Obs. Meudon France
- S. Bastiani Ecole Polytechnique France
- M. Busquet, ARTEP, USA
- J. Bailey, G. Loisel Albuquerque, USA
- J. Guzik, J. Colgan, D.P. Kilcrease, N.H. Magee, Los Alamos, USA
- J. W. Harris AWE England

Cette collaboration internationale permet

- de disposer de plusieurs types de codes et de les comparer,
- de disposer de codes détaillés et rapides pour acquérir les données



Les opacités stellaires : validations théoriques et expérimentales sur le LULI2000 et le LMJ

Ingrédient essentiel pour l'astrophysique, la fusion magnétique et la fusion inertielle.

Problématique:

- ETL, HETL
- Un ingrédient essentiel est ... une boîte noire !

Deux sources de tables d'opacités pour la communauté stellaire internationale

OPAL (Livermore Rogers & Iglesias 1992) et OP (consortium académique: Seaton et al. 2004

fixed metal distribution based on <u>Grevesse</u> & Sauval (1998) solar abundances																					
form	vers	ion	Х	Z		logRs	logR_	min	logR_max	lo	gTs	logT_min	logT_	max							
1		35 0	.350000	0.080	1000	37	-8.000	000 :	1.000000		138 3	3.750000	8.700	000							
logT			log	}R = logR	lho – 3*l	ogT + 18	1														
	-8.000	-7.750	-7.500	-7.250	-7.000	-6.750	-6.500	-6.250	-6.000	-5.750	-5.500	-5.250	-5.000	-4.750	-4.500	-4.250	-4.000	-3.750	-3.500	-3.250	-3.000
3.750	-0.973	-1.034	-1.106	-1.188	-1.279	-1.375	-1.476	-1.570	4 204	4 700	4 004	4 002	2 004	2 402	2 220	0 000	0 000 C	0 400	0 AAA	0 400	2.371
3.775	-0.883	-0.911	-0.949	-0.996	-1.053	-1.120	-1.197	-1.2 -	Table	. م ا ر		álana				~ + ~ ~		-+ d	~ ~ ~ ~	ina	2.031
3.800	-0.826	-0.832	-0.846	-0.867	-0.896	-0.937	-0.989	-1.0	lable	e u u		elang	se co	uvra	ni u	n tre	S Va	sie a	oma	me	L.674
3.825	-0.808	-0.806	-0.807	-0.812	-0.820	-0.836	-0.859	-0.8		,	_					、					L.295
3.850	-0.809	-0.806	-0.802	-0.797	-0.792	-0.788	-0.785	-0.7	19 él	éme	nts a	allan	t de	ΪΉνα	drog	ène a	au N	ickel			3.911
3.875	-0.813	-0.808	-0.802	-0.792	-0.781	-0.769	-0.755	-0.7		•••••				,							3.531
3.900	-0.819	-0.814	-0.807	-0.797	-0.785	-0.770	-0.751	-0.7	122 \	ialai	irc d	△ ∩	006	T6	< 10						3.166
3.925	-0.822	-0.819	-0.813	-0.803	-0.790	-0.774	-0.753	-0.7	T20 /	aicu	115 U	ς υ.		10	V TU						3.176
3.950	-0.814	-0.814	-0.811	-0.804	-0.794	-0.780	-0.760	-0.7			-	1	_	. 1	/ 5	-3					3.477
3.975	-0.775	-0.784	-0.790	-0.793	-0.790	-0.782	-0.766	-0.7	37 v	/aleu	irs d	e –	- '/ <	(10 9	5 0 / 1	17 <					3.718
4.000	-0.729	-0.745	-0.758	-0.769	-0.774	-0.772	-0.761	-0.7					-	Z		-0	. —				3.902
4.025	-0.696	-0.705	-0.714	-0.722	-0.729	-0.733	-0.730	-0.721	-0.699	-0.661	-0.604	-0.522	-0.416	-0.282	-0.125	0.055	0.248	0.449	0.650	0.841	1.018
4.050	-0.671	-0.671	-0.672	-0.675	-0.680	-0.686	-0.690	-0.688	-0.676	-0.648	-0.599	-0.525	-0.424	-0.294	-0.138	0.044	0.243	0.454	0.669	0.881	1.084
4.075	-0.655	-0.653	-0.651	-0.651	-0.651	-0.652	-0.650	-0.645	-0.631	-0.605	-0.563	-0.499	-0.411	-0.292	-0.146	0.030	0.227	0.441	0.663	0.887	1.107
4 100	0 64E	0 642	0 638	0 634	A 620	Ø 623	0 614	0 602	0 583	0 557	Ø 518	Ø 461	0 383	Ø 276	G 142	A 0.74	G 214	G 424	0 646	0 87E	1 104

1) Qualification des calculs (précis/rapides) 2) quelle précision ?

Stratégie



Identifier les problèmes Évaluer les conséquences des améliorations sur l'objet astrophysique

Processus macroscopiques et microscopiques : les signatures des observations sismiques par satellite



SOHO 1995-2016 SDO 2009-2015? PICARD 2010-2013 COROT 2006-2010 KEPLER 2009-2013



Étoiles de type solaire 0.8 à 1.6 M_{\odot}



Turck-Chièze et al., 2010, 2011, 2012, T-C & Lopes 2013, Ceillier et al. 2012 Étoiles massives de 8 à 18 M_{\odot}



 $\frac{1}{100} = \frac{1}{1750} + \frac{1}{100} + \frac{1$

Pamyatnykh 1999, Zdravkov & Pamyatnykh, 2009 OPAL ? SPB, BCEP OPAL, OP ? Salmon et al., 2012

Le cas du **Fer** Calculs HULLAC (Saclay) et ATOMIC (Los Alamos)



Les deux calculs confirment l'importance de l'interaction de configurations (présente dans OP) pour le Fer à 27 eV et $\rho \sim 10^{-3} g \ cm^{-3}$

15-30% sur κ_{Ross}

Mais différences d'un facteur 2 sur κ_R entre ATOMIC et OP pour le Fer à basse énergie. Il faut introduire toutes les transitions n = 3 vers n = 4, 5, 6pour Fe^{3⁺} à Fe^{13⁺}

LULI2000 : Expériences sur les éléments Fe, Ni, Cr et Cu



Le 1^{er} laser **'ns'** permet de **chauffer** l'échantillon, dans une cavité. Le plasma de l'échantillon est à **l'équilibre thermodynamique.** Un 2nd laser **'ps'** crée, en arrière de la cavité, un faisceau de **rayonnement X** dont on mesure **l'absorption sur une streak** grâce à un spectromètre XUV

Le cas du Nickel

Turck-Chièze & al. 2013

Résolution expérimentale (en cours)



décalage du spectre et incomplétude.

Atelier "Opacités" Bordeaux 2013

Les différences entre les calculs pour le Fer et le Nickel ont été analysées en détails grâce au codes HULLAC, ATOMIQUE, et SCO-RCG.

Pour le Fer certaines différences proviennent du traitement de l'interaction complète de configuration (OPAL): bon accord entre HULLAC et ATOMIC, mais il subsiste des différences importantes avec OP pour le Fer à basse énergie (complétude du calcul).

Pour le Nickel les différences ont une origine différente: l'extrapolation d'OP à partir des calculs pour le Fer est incorrecte.

À partir de calculs incluant les interactions de configurations complètes, ATOMIC, HULLAC, et SCO-RCG production de meilleurs calculs.

Objectif : Produire, dans ce domaine thermodynamique, des tables spécifiques pour les cas astrophysiques - probablement cette année.

Turck-Chièze et al. HEDP, 9, 473-479 2013; Turck-Chièze et al. 2014, Gilles et al. 2014

Préparation d'une expérience sur le LMJ avec la sonde PETAL pour les intérieurs d'étoiles de type solaire

Application de la technique du double front d'ablation (Fujioka et al. 2004, Drean 2009): un ablateur de numéro atomique Z modéré permet de réduire les instabilités et créer un profil plat de densité et de température (cf. FCI attaque directe).

- Calculs hydrodynamiques réalisés avec le code CHIC : code DAM semi-accessible, opéré dans le cadre de l'Ouverture à l'UMR CELIA (... opacités GOMMES ...)
- Objectifs: environnement plasma, largeur des raies





Ce programme concernant les opacités stellaires permet d'identifier l'origine des différences entre les tables existantes et leurs limites en physique stellaire – et probablement les mêmes dans d'autres domaines (fusion).

Certaines d'entre elles sont désormais bien identifiées et confirmées par des expériences.

L'objectif est d'atteindre un accord et une complétude au niveau de 5-10%, dans les régions où l'on voit clairement des anomalies.

Améliorations grâce à de nouveaux calculs: HULLAC, SCO-RCG et ATOMIC.

Préparation de nouvelles expériences sur le LMJ, qui justifient une nouvelle enquête théorique: OPAS, codes SCO-RCG sont prêts pour ces tâches.

La construction d'un spectromètre X est nécessaire avec une haute résolution d'environ 1 eV pour étudier les effets de plasma en parallèle à la réalisation de nouvelles tables théoriques.

La physique nucléaire dans un plasma en laboratoire: quelle perspective?

1 Passage d'une vision du noyau système fermé & isolé à un système en interaction avec d'autres particules, de densité électronique élevée, à température finie.

2 Tirer parti des techniques de la physique des plasmas pour prolonger l'exploration de l'astrophysique nucléaire.

V Future Examples of experiments

• The s-process in target implosion plasmas of high neutron density by the measurement of $(n, x\gamma)$ reactions: proposal to the National Ignition Facility (NIF), L.A. Bernstein *et al.*

Measurement of nuclear fusion rates within plasmas

- Integration of the cross-sections in the Gamow window of the plasma temperature (T ~ a few keV to a few 10 keV), in particular through existing resonances + no extrapolation
- Investigation of the electron screening effects in the entrance channel of the fusion reactions
- Determination of nuclear rates in "stellar-core-like" environments

Radiative shocks in astrophysics

Planètes:

Rentrée des astéroïdes dans les atmosphères planétaires Rentrée de diverses sondes et véhicules ...

Etoiles:

Chocs dans les enveloppes circumstellaires

Pulsations des Cépheïdes

Chauffage de la chromosphère

Explosions de supernovæ,

Interaction es reste de supernovæ avec le MIS

MIS : Interaction des jets avec le MIS(chocs d'étrave)







SNR 1987A with ISM november 2003, HST.

Un exemple spécifique: l'accrétion sur une étoile.

Variables cataclysmiques : POLARS

E. Falize & al. POLAR project



Accrétion sur de Jeunes Objets Stellaires

C. Stehlé & al. ANR STARSHOCK







Température	~ 10 - 50 MK (few 100 eV)	Les courtes longueurs		
Densité	~ 1 - 10 ⁻³ g cm ⁻³	d'onde(i.e. 0.35µm) ont:		
Pression	~ 10 - 100 MBars	 efficacité hydrodynamique élevée 		
		- réduisent le nombre d'électrons		
		chauds		

Modélisation astrophysique

Observations + scenario + simulations

- \rightarrow signatures de chocs pour en déduire le taux d'accrétion
- \rightarrow simulations hydro + transfert radiatif 1D-3D

Expériences

Étude de la structure des chocs dans des régimes « similaires » à ceux de leurs analogues astrophysiques.

- \rightarrow comprendre leur signatures radiatives.
- \rightarrow analyser les expériences avec des simulations hydro-radiatives
- → fournir des tests pour les codes utilisés pour les applications à l'échelle astrophysique.

Approche duale = simulations numérique et expérimentale

Chocs radiatifs d'accrétion : I – Polars (optiquement mince)

White dwarf



Collaboration CEA/DAM, LUTH, LULI

Lois d'échelle	Polar	Laboratoire
$ ho (mg \ cm^{-3})$	10 ⁻⁵	100
Taille (m)	10 ⁻⁶	10 ⁻³
Vitesse (km s ⁻¹)	104	300
Temps (s)	1	3 10 ⁻⁸
Température (eV)	10 ⁵	100
B (MG)	10	10 ³

	сн/п	Cylinder mass equation	Cylinder length equation	Cone	Astrophysics system
ն (km1 ⁻¹)	130	170	180	170	5000
Post-shock					
density (g cm ⁻³) Post-shock	0.15	E0.0	0.04	0.02	5 × 10 ⁻⁶
temperature (eV)	45	35	45	25	104
M	2	4	2	3	> 10
Bo Fenth./Fray	10	5	.4	10	1.4.4
t _{ref} /t _{dyn}	2	2	I	E	$\ll 1$

Principe: un écoulement supersonique interagit avec un obstacle. Choc transmis + choc retour qui se refroidit

Augmenter le refroidissement Augmenter v : lasers de haute énergie. RADIATIVE SHOCK IN XENON ALE - HETL - Coulomb - Electronic conduction



code ASTROLABE (J. P. Chièze)

Aims

- strong sustained shocks (M>>1) in gases
- structured by radiation : choice of Xenon at low pressure (<1 bar)
- simple geometries

<u>PALS installation</u>: iodine laser up to 150 J at 438 nm, 0.3 ns.

Laser irradiance of ~ few 10¹⁴ W/cm² (ns pulse) allows to reach shock velocities V ~ 60 km/s



PALS iodine laser

Collaboration: LERMA, SYRTE, GEPI, LPP, CEA, Imperial College PALS team, C. Stehlé PI

Chantal Stehle, Michaela Kozlova, Jean Larour, Jaroslav Nejdl, Norbert Champion, Patrice Barroso, Francisco Suzuki-Vidal, Ouali Acef, Pierre-Alexandre Delattre, Jan Dostal, Miroslav Krus, Jean-Pierre Chièze, Matthias Gonzalez, Laurent Ibguist

Experimental setup PALS 2010



NOT TO SCALE !

PALS 2012 : more details



PALS shot 41734 (G29)





The precursor is elongated, in accordance with simulations

Diode $\Rightarrow v \approx 50 \ km/s$ XUV image at 20 $ns \Rightarrow v = 50 \ km/s$

First image of the whole shock, as the plasma is transparent at 21 nm



Section $400 \ \mu m$

Collaboration LULI, CEA-DAM, GEPI, U-Michigan, LLNL, ILE-Osaka, C. Michaut P.I.

M. Koenig, A. Pelka, R. Yurchak, J.-M. Boudenne, T. Vinci, A. Casner, S. Laffite, S. Bouquet, D. Raffestin, P. Barroso, R.P. Drake, S. Le Pape, Y. Sakawa, Y. Kuramitsu, T. Morita



- LULI2000: I~10¹⁴ W/cm² t~1 ns
 - Xe, 100-200 mbar
 - velocity [70-100] km/s
 - only radiative effects due to F_{rad}
- GEKKO: I~10¹⁵ W/cm² t~0,5 ns
 - Xe, Kr, Ar, 50-100 mbar
 - velocity [80-130] km/s
 - radiative effects due to not only F_{rad} but also P_{rad} (E_{rad})
 - $P_{rad} \sim few \% of P_{th}$
- LIL: I~7.5 10¹⁴ W/cm² t~2 ns
 - Xe, Kr, 50 mbar
 - velocity [120-165] km/s

- 12 shots
- Square pulse 2 ns
- mainly at 50 mbar
- comparison krypton/xenon
- mainly at full energy E
- comparison CH/Ti and CH/Sn







- from calibration, T_e is only at 15 eV, much less than expected!
- a bump around 5 eV is present
- RS profile changes structure, from 4 ns
- at 6 ns, shocked and hot region is large, precursor is 400 µm long

Challenges

Passer du qualitatif – forme du choc – au quantitatif : déterminer les conditions thermodynamiques locales ϱ, T ou n_e, Z_i, T

Actuellement aucune expérience ne peut être utilisée comme test des simulations . Il manque :

- soit une partie du précurseur (inaccessible au-delà de la densité critique),
- soit le post choc (opaque au visible),
- soit un diagnostic en T (accessible par des rapports de raies)

Tout ceci nécessite un gros travail sur les opacités intégrées ,et également des opacités monochromatiques de précision.

À terme sondage avec un laser XUV,

- \oplus de très bons miroirs
- un faisceau laser XUV de bonne cohérence pour l'interférométrie
- ⊕ de l'interférométrie dans le visible
- \oplus spectrométrie .
- un gaz dont les opacités intégrées et monochromatiques sont connues et publiées.

1 – Équipe C. Michaut: continuation des campagnes de chocs radiatifs sur GEKKO XII. Étude de l'interaction avec des obstacles pour étudier les fronts d'ablation.

2 – Équipe C. Sthelé: collision de chocs .

Expérience menée d'abord à PALS avec deux chocs à $60 \ km \ s^{-1}$ puis sur ORION avec deux chocs de à $150 \ km \ s^{-1}$.

La vitesse relative des deux chocs étant doublée, ceci permet d'étudier les régimes de très haute vitesse (300 km/s) inaccessibles par les schémas classiques car on ne peut dépasser $10^{14} - 10^{15} W cm^{-2}$ sans avoir de nombreux effets parasites.

3 - Expériences de A. Ciardi sur l'effet d'un champ magnétique longitudinal sur un jet de plasma et ses perspectives d'interaction de ce jet magnétisé avec une paroi fixe, pour une topologie proche de celle des colonnes d'accrétion.

4 - ... Entrée en service de PETAL couplé aux premiers faisceaux du LMJ