

Quelques souvenirs de physique des plasmas au Québec Tudor Wyatt Johnston

Une voyage de 52 ans, de lundi le 2 juin 1958 à mercredi le 2 juin 2010

INTRO

- **Cambridge à RCA Victor et les plasma « re-entry »**
- **RCA Victor (1958 à 1969) et la gamme de recherche en plasma**
- **Formation groupe physique des plasmas à l'Université de Montréal**
- **Départ pour Texas et retour à l'INRS les interactions laser-plasma**
- **Mes liens avec la recherche laser-plasma en Québec et hors Québec**
- **Verdict des pairs**
- **Envoi**

Cambridge 1958 thèse de doctorat (Cantab) (en genie)

Comportement de certains faisceaux (Brillouin) des électrons utilisés pour les amplificateurs pour les micro-ondes (en fait des plasma ultra minces et longs)

Modèle idéale : Faisceaux électrons klystrons come un faisceau froid des électrons, sur un fond ionique stationnaire. ($\rho_e = \rho_{ion}$). Densité faible, tel que la largeur $\ll l_D$.

Réalité : faisceau OUI, MAIS le vide était souvent mauvaise, et en réalité, un faible plasma est produit le gaz, tel que $\rho_{plasma} \gg \rho_{faisceau}$ (mais la fréquence plasma \ll la fréquence signal)

Création d'un faisceau Brillouin ($\rho_{ion} = 0$) est possible
que dans les système à vide sont ultra bon.

Aujourd'hui : Physique des « plasmas » « pur-électrons »
comme à UCSD (San Diego) O'Neil, Dubin, Driscoll et al.
(et assez récemment aussi à UC Berkeley (Fajans et al.)

Montréal 1958 à 1969 Les laboratoires de recherche de RCA Victor

Axe majeur de recherche : Plasmas dans l'atmosphère terrestre chauffé autour des «re-entry vehicles » (missiles ou astronautes).

Problèmes : « **Blackout** » et « **Signature** »

Définition : «re-entry vehicles » (soit missiles, soit porteurs astronaute) ont été lancés dans l'espace autour de la terre et sont en train de faire leur retour à la terre

Cliché d'un simulation NASA de la Navette Spatiale



Ces plasmas créés dans l'air très chaud, après un passage par un choc très supersonique (dit «hypersonique») associé aux objets qui descend d'une orbite hors Terre vers la Terre.

On a ces plasma en avant, qui bloquant la communication terrestre (le « le Blackout »), et aussi en arrière en forme de sillage comme pour les météores.

Les objets « re-entry » peuvent être de deux classes (A ou B)

- (A) Les affaires à récupérer (comme les astronautes) pour lesquels on cherche peut-être afin de modifier le trajet, pour éviter un désastre. Les transmissions vers la Terre étaient bloquées (« **Blackout** ») parce que la fréquence plasma dépassait la fréquence de communication disponible.
- (B) Quant aux missiles ennemi, on veut les **peser** (en effet), car ce que les missiles denses qui méritent l'attention.

Le physique plasma est facile **en principe**, mais les **difficultés pratiques** sont posés par la complexité des gaz atmosphériques; plusieurs sections efficaces sont inconnues et restent difficiles à déterminer.

Résultat final? Enfin on a trouvé (par laisser aller ou par faute de mieux) que les trajectoires « re-entry » ne posait pas de problème. (On avait donc pas besoin de parler aux astronautes pendant « **re-entry** ».) Quant à « **peser** » les objets, on a jamais trouvé une diagnostique magique ou « signature » utile. Mais enfin avec la diminution des exigences de la guerre froide on avait plus besoin de la solution anti-missile.

Manip intéressante. Afin de vérifier la comportement d'un plasma dans un gaz coulant en turbulence (surtout comparer la spectre de turbulence et la diffusion microondes calculée en utilisant l'approximation Born), on a fait marché une système a gaz pour un plasma dominé par turbulence gazeuse. (chercheurs: **Alan Carswell, Claude Richard, Ashoke Ghosh et Kurt Graf**)

Même si les problèmes n'étaient pas réglés, on a fait des belles choses en route!

M.P. Bachynski, Issie Shkarofsky Tudor Johnston et al. Effets cinétiques dans les plasma réalistes.

Plus **Alan Carswell, Claude Richard, Ashoke Ghosh, Kurt Graf.**

Aussi la texte (515 pp) “**Particle Kinetics of Plasmas**” Addison-Wesley (1966) (Shkarofsky (2/3), Johnston (1/3) and Bachynski (0/3)).

Johnston s'intéressait aux termes à l'ordre élevé (les tenseurs f_1) dans l'expansion de fonction de vitesses des électrons en harmoniques sphériques une avance par rapport de la formulation en polynômes de Legendre polynomial de **William P. Allis** lié aussi au travail en France de **Jancel** et **Kahan** en France

En cherchant une méthode pour créer un plasma de taille (plus grand que sa propre longueur électromagnétique, c. à d. plus grand que c/f_{plasma}), on a travaillé sur les guides d'onde plasma à fréquence microondes (**Johnston, Vic Gore** et **Fred Smith**).

Parce que la compagnie RCA Victor étaient impliqué avec les satellites canadiens utilisé pour faire les sondage de l'autre côté de l'ionosphère (« topside-sounding ») on a fait des expériences afin de regarder le phénomène d'accumulation de charge non-prévu à cause de grand potentiel ($V \times B$)· (longueur antenne). (**Johnston, Kasha** et **Smith**). Dans les testes au labo c'est le plasma qui traverse un champ magnétique et un satellite modèle à grand vitesse (mais inférieur à vitesse Alfvén), et le résultat a été confirmé. Nous avons aussi tenté la développement d'un grand magnétoplasma pour regarder les ondes siffleur.

1963 Groupe de physique des plasmas à l'Université de Montréal

(1963 à 1971) Fondée par **Gilles Cloutier** (ex RCA) et **Guy Paquette**.

(Ajout de **Vital Glaude** en 1966, **Claude Beaudry** en 67, et **Henk van Andel** en 70)

Avec peu de chevauchement d'activités du labo RCA Victor et la groupe il y avait peu de contacte entre les deux groupes de plasmistes.

Axes de recherche:

- diagnostics: études de diverses sondes à plasma
- caractérisation de différents types de décharges luminescentes en courant continu
- interaction des ondes électromagnétiques avec les plasmas
- sélecteur de vitesses HF pour déterminer la distribution d'énergie des électrons*

Avec le départ de M. Cloutier et le nomination comme directeur de **Jiri**

Teichmann, la politique a été modifier afin pour tenir compte des interactions laser-matière, et de l'arrivée du Tokamak de Varennes en 1987.

Ions négatifs dans les plasmas un aspect en commun au début

Un contrat touchant les canons d'ions utilisés comme **accélérateurs pour satellites** nous a mené (**Gilles Cloutier** et **Tudor Johnston**) à regarder les plasmas à décharge comme source d'**ions négatifs (SF_6^-)** comme partenaire pour les ions positifs (Ar^+). C'est possible que les analyse des ions négatifs dans les plasmas à l'Université de Montréal (1963 à 1969 **Guy Paquette** et **Nguyen The Hung**) a était un peu stimulé par ce travail à RCA Victor.

Départ de Québec pour Houston, Texas 1969 à 1973

Physique des plasmas spatiales et simulation plasma PIC (Los Alamos).

Je suis parti en Texas, parce que j'ai anticipé la faillite des labos RCA, mais pas leur réincarnation comme « **MPB Technologies** ». J'ai retourné à Montréal parce que mon père a tombé malade, et j'ai assez rapidement eu un offre d'emploi de **Brian Gregory**, le Directeur de l'INRS-Énergie qui faisait bien mon affaire.

1969 à 2010 INRS-Énergie (maintenant –EMT) Groupe Interaction Laser-Plasma Phase A 1969 à 1990 Les interactions à couplage laser-plasma liées à fusion DT par laser.

Problématique

À l'INRS : Nos efforts expérimentaux au début ont été démarrés avec l'élément essentiel d'un accès privilégié aux lasers à longueur d'onde de 10 microns **CO₂ TEA** (inventé à laboratoire de défense de Canada (Valcartier, Québec) par **Jacques Beaulieu** et divulgué en 1970). Graduellement il est accepté que la taux de croissance des instabilités provenant de l'interaction laser-plasma est proportionnelle au vitesse oscillant induit sur des électrons par laser, c. à d. au flux laser (I) est le carré de longueur d'onde du laser utilisé. Mais le coût de laser utile à **Néodyme-YAG** (à longueur d'onde d'un micron) débord largement le financement possible au Canada. **La seule solution m'apparaît l'utilisation de notre laser CO₂ pour les expériences en échelle des interactions de base; en effet, on fait les expériences à 10 microns pour discuter leur impacte théoriques sur les expériences proposées typiquement à 0.35 microns** (troisième harmonique du laser Nd-YAG).

Deux volets se présentaient : (A) Rayons-X Laser-Plasma ,

(B) Diffusion Stimulé dans les Interactions Laser-Plasma

A (OUI). Rayons-X Laser-Plasma et après. Études des électrons énergétiques produit par les instabilité paramétriques. (Pour CO₂ ça marche pour SBS (diffusion stimulé par onde sonores, c. à d. Brillouin) (et **Garry Mitchel** pour sa thèse a produit beaucoup dans ce domaine avec **GreK, Johnston** et **Pépin**) mais pour diffusion Raman (déplacement ver le rouge par la fréquence plasma locale) les détecteurs sont peu efficaces. Détection des rayons-X provenant des électrons énergétiques restait comme diagnostique efficace pour nos expériences à l'INRS. Les expérimentateurs impliqués étaient **Henri Pépin, Boris Grek, Hector Baldis, Jean-Claude Kieffer** et al. Une chose à noter est le fait que ces travaux étaient le début d'une longue série de travaux qui ont continué après notre abandon éventuel de notre abandon (hélas!) du laser CO₂ TEA. Les rayons-X provenant de l'interaction laser-plasma, leurs diagnostiques, leurs utilisation et même éventuellement des utiles à vendre par une compagnie chez nous (c. à d. **AXIS Photonique**). Après une évaluation des tendances en financement de recherche au Canada et en Québec la décision était pris par **Henri Pépin** (qui m'a remplacé comme directeur de notre group Laser-Matière) d'en profiter par notre expertise acquis en rayons-X vers l'utilisation de rayons maintenant disponible. C'est **Hamid Chaker** qui l'a suivi comme directeur du groupe dans ce direction surtout dans les applications lithographie-X, et après lui **Jean-Claude Kieffer** (le directeur de la groupe suivant) dans les application comme impulsions courtes pur résolution temporelle amélioré, suivi par imagerie à rayon-X en contraste de phase. Tout ça démontre la nécessité de saisir les opportunités quand elles se présentent.

Deux volets se présentaient : (A) Rayons-X Laser-Plasma ,

(B) Diffusion Stimulé dans les Interactions Laser-Plasma

B (NON) Diffusion Stimulé dans les Interactions Laser-Plasma : Comme discuté, on peut faire les expériences à 10 microns pour discuter leur impacte théoriques sur les expériences proposées ailleurs.

En discussion avec **Hector Baldis** (qui était à l'INRS à moment donné), j'ai invoqué le concept en citant comme exemple les expériences dans le même genre utilisant les microondes au télescope radio à Arecibo. Enfin il est parti pour Ottawa et le laboratoire CNRC pour diagnostiquer les expériences interactions laser CO2 avec un laser à 1 micron.

Le concept de diffusion diagnostique expérimental était rejeté à Livermore pour plusieurs années (car on voit pas comment l'utiliser pour les géométries des Hohlräume mais il était utilisé enfin dans les expériences plus récentes d'interaction utilisant un laser Nd-YAG à un micron, diagnostiqué avec la troisième harmonique (expérience fait depuis long temps à Palaiseau (École Polytechnique) à plus petite échelle par **Christine Labaune** et al.)

Activités de Tudor Johnston en collaboration externe I

Amérique du Nord

Collaboration avec chercheurs LLNL (Livermore) (1988 à 1996)

(En guise de consultant. Pour garder contacte avec les essais en instabilités de couplage laser-plasma j'ai entré dans une collaboration pour plusieurs années avec les chercheurs à Livermore (1988 à 1996), notamment (**Paul Drake, Ed Williams, Dick Berger, Hector Baldis, Kent Estabrook, Bill Krueer, Dave Montgomery** et al.) et d'autres à Rochester (**Jacques Delettrez, Wolf Seka et Bob McCrory**). Les sujets abordés étaient diffusion stimulée; comme Raman (SRS) ou Brillouin (SBS), filamentation, etc. à pp 17 publications

Collaboration avec les chercheurs de UCLA (1992 à 1997) Il y avait aussi une

collaboration de longue durée mais hors fusion DT d'interactions mais pertinentes à l'accélération des électrons (ou des positrons) par l'onde plasma de sillage provenant d'un impulsion courte laser ou des électrons. avec des chercheurs à **UCLA (Chan Joshi, Chris Clayton, Warren Mori, John Dawson, Wim Leemans** et al.) incluant aussi **Tom Katsouleas**, qui était à **USC**. À pp 8 pub

Activités de Tudor Johnston en collaboration externe II

Lien français (« French Connection ») (1976 à 2005)

École Polytechnique à Palaiseau (1976 à 2002): Interaction laser-plasma.
Edouard Fabre, François Amiranoff, Christian Stenz, Denis Pesme, Guy Laval, Jean-Claude Adam, Jean-Paul Geindre, Patrick Audebert, Patrick Mora, Julien Fuchs, Stefan Hüller, et al.

0 pub. (Il s'agissait des contacts intellectuelles plutôt que les collaborations sur les projets concrètes .)

Nancy, Université Henri-Poincaré (1990 à 2006): Contacte à travers de **Magdi Shoucri** (IREQ) avec **Pierre Bertrand** a donné suite à plusieurs publications avec **Alain Ghizzo** utilisant leurs codes numériques fluide Vlasov Eulerienne 11/2 D pour les interactions nonlinéaires des electrons (relativistes) et les champs laser forts. À pp 15 pub

Liens avec la groupe Physique des Plasmas à l'Université de Montréal (1969 à 1992) I

Mes liens à groupe plasma de l'U de M restait qu'à travers des individus provenant du groupe plasma.

Le premier contacte était **Henri Pépin**, mais il était déjà en place à l'INRS avant mon arrivée, mais qui a fait quelque temps à la Groupe de Plasma à l'Université de Montréal.

Il y a aussi ceux qui ont passé par la Groupe de Plasma à l'Université de Montréal, mais comme étudiants à U de M.

- Claude Boucher** (thèse en instabilité de dérive dissipative, et sa stabilisation (**Teichmann**). Claude est devenu prof à l'INRS, tokamak,)
- Guy LeClair** (thèse solitons envelope (**Teichmann**), membre de l'équipe T de V)
- François Brunel** (instabilité paramétrique dans les interactions laser-plasma (**Teichmann**), et après à CNRC (Ottawa), (« **Brunel heating** »))
- Gary Mitchel** (maitrise à l'U de M. en « surfaguide » **Moisan** (?), doc à l'INRS (**Grek** et **Johnston**) SBS théorie et expériences., et après à AECL, Chalk River).

Liens avec la groupe Physique des Plasmas à l'Université de Montréal II (1969 à 2006)

Un cas spéciale : Mohamed Chaker

Mohamed Chaker a fait son doctorat avec **Jiri Teichmann** sur le grand magnetoplasma (UML) dans un effort courageux de faire les expériences dans les interactions non-linéaires ondes-plasma, et j'ai travaillé comme examinateur externe. (Il m'a raconté récemment que l'examen privé que j'ai lui a fait passer était ultra-rigoureux (peut-être un écho de mon examen doctoral à huis-clos à Cambridge?).) Malgré ça il était embauché chez par les efforts d'**Henri Pépin**, et il est devenu un des grande étoiles de l'INRS, même directeur de notre groupe, et après ça mon Directeur de Centre, et toujours un collègue superbe.

Un autre cas spéciale : Joëlle Margot

Une collaboration exceptionnelle et unique entre moi et mon collègue François Vidal et une membre de groupe Physique des Plasmas et celle avec **Joëlle Margot** (U de M) et ses étudiants sur deux projets:

(1) magnetoplasmas argon décharge à micro-onde (à pp 6 pub)

(2)diagnostique spectroscopique induit par impulsion laser (LIBS) (à pp 11 pub).

Un Éléphant dans la salle plasma à Québec : Tokamak de Varennes (1987 à 1999) à l'IREQ.

Notons les effets majeure sur les trois groupes Québécoises en plasma :

- **Groupe à l'IREQ (Richard Bolton, Réal Decoste, Vladimir Fuchs, Magdi Shoucri et al.),**
- **Groupes plasma et matériaux à l'INRS (Brian Gregory, Barry Stansfield, Claude Boucher, Bernard Terreault, Robert St. Jacques et al.)**
- **Groupe plasma U de M (Jiri Teichmann, Guy LeClair, Vital Glaude et al.)**

À l'INRS, T.W. Johnston a continué œuvré dans les interactions laser-plasma.

Dans la période 1983 à 2006 ce collaboration interne a produit 30 pub, 12 en théorie des instabilités paramétriques laser-plasma, 10 traitant les calculs Fokker-Planck (toujours avec **Jean-Pierre Matte**, notre « **M. Fokker-Planck** ») et 8 associé avec des expériences.

Dans les deux collaborations avec **Joëlle Margot** (17 pub) et les séries de publications sur le foudre (15 pub) et les travaux portant sur la formation des filaments et autre aspects hydrodynamique **François Vidal** jouait un rôle clef, pour à pp 36 publications.

Verdict des pairs (1) Deux publications de l'INRS-EMT (Varenes) en vedette

(Ils sont dans les meilleurs (222) dans *LA* revue en plasma c. à d. *Physics of Plasmas*

«Selected Highly Cited papers from 50 years of Plasma Physics»

(2 de 19 dans **Sec. 6 (Lasers, Particle Beams, Accelerators, Radiation Generation).**)

Aucun autre publication de Canada a été inclus.

INRS (1) Image d'un extrait de p. S98 de

«Selected Highly Cited papers from 50 years of Plasma Physics»

Selected Highly Cited Papers from 50 Years of Plasma Physics

Rayons-X

à courte durée

Ultrafast x-ray sources*

J. C. Kieffer,[†] M. Chaker, J. P. Matte, H. Pépin, C. Y. Côté, Y. Beaudoin,
and T. W. Johnston

*Institut National de la Recherche Scientifique-Énergie et Matériaux, 1650 Montée Ste-Julie, Varennes,
Québec J3X 1S2, Canada*

C. Y. Chien, S. Coe, and G. Mourou

Center for Ultrafast Optical Science, University of Michigan, Ann Arbor, Michigan, 48109

O. Peyrusse

Commissariat à l'Énergie Atomique, Centre d'étude de Limeil, Villeneuve St-Georges, France

(Received 18 November 1992; accepted 20 January 1993)

Time-resolved spectroscopy (with a 2 psec temporal resolution) of plasmas produced by the interaction between solid targets and a high contrast subpicosecond table top terawatt (T^3) laser at 10^{16} W/cm², is used to study the basic processes which control the x-ray pulse duration. Short x-ray pulses have been obtained by spectral selection or by plasma gradient scalelength control. Time-dependent calculations of the atomic physics [Phys. Fluids B 4, 2007, 1992] coupled to a Fokker-Planck code [Phys. Rev. Lett. 53, 1461, 1984] indicate that it is essential to take into account the non-Maxwellian character of the electron distribution for a quantitative analysis of the experimental results.

Verdict des pairs (2) Deux publications de l'INRS-EMT (Varenes) en vedette

(Ils sont dans les meilleurs (222) dans *LA* revue en la revue en plasma c. à d. *Physics of Plasmas*

«Selected Highly Cited papers from 50 years of Plasma Physics»

(2 de 19 dans **Sec. 6 (Lasers, Particle Beams, Accelerators, Radiation Generation).**)

Aucun autre publication de Canada a été inclus

INRS (2) Image d'un extrait de p. S99 de

«Selected Highly Cited papers from 50 years of Plasma Physics»

Projet Foudre

Filamentation of ultrashort pulse laser beams resulting from their propagation over long distances in air

B. La Fontaine,^{a1} F. Vidal, Z. Jiang, C. Y. Chien, D. Comtois, A. Desparois,
T. W. Johnston, J.-C. Kieffer, and H. Pepin
*Institut National de la Recherche Scientifique (INRS)—Énergie et Matériaux, 1650 Lionel Boulet,
Varenes, Québec J3X 1S2 Canada*

H. P. Mercure
IREQ, Hydro-Québec, 1800 Lionel Boulet, Varenes, Québec J3X 1S1 Canada

(Received 10 September 1998; accepted 19 January 1999)

The propagation of high-power short-pulse laser beams over considerable distances in air is studied both experimentally and via numerical simulations. Filaments are formed after 5–10 m and their propagation over distances in excess of 200 m is reported for the first time. The lateral dimensions of the filaments are found to range from about 100 μm to a few millimeters in diameter. The early values of plasma electron density have been inferred to be a few times 10^{16} cm^{-3} using longitudinal spectral interferometry. For 500 fs pulses and a wavelength of 1053 nm, the energy in the filament can be quite high initially ($\sim 8 \text{ mJ}$) and is found to stabilize at about 1.5–2 mJ, after about 35 m. A simple model based on the nonlinear Schrödinger equation coupled to a multiphoton ionization law appears to describe several experimental results quite well. © 1999 American Institute of Physics. [S1070-664X(99)00705-3]

Phys. Plasmas 6, 1615 (1999)

Envoi, À retenir

- J'ai travaillé en recherche plasma pour plus que 50 ans, mais **il fallait rester prêt à changer le domaine très rapidement.**
- Les plasmas que j'ai rencontré avaient les densités d'électrons de 10^{11} par cc à 10^{22} par cc --- **une gamme énorme, mais toujours un plasma.**
- Ou peut trouver une telle gamme de densité facilement, mais **trouver des source de finances pour une programme de recherche en plasma est moins facile.**
- Le plasma est un exemple de comportement très difficile à prévoir, même si les règles du jeu sont que les équations Maxwell les électrons et les ions.
- Je hâte à voir les applications sérieuses des grands systèmes de calcul **aux problèmes des structures compliqués en astrophysique** (comme les « jets » relativistes etc.).
- **Perspectives?** Un peu sombre, mais peut-être c'est toujours comme ça ...