

دراسة تجريبية للاستجابات العابرة لمنظومة "حزمة أيونات-بلازما" - الأنماط الانتشارية واللاستقرارية الصوتية الأيونية -

الدكتور عبد الوهاب قعقع*

تاريخ الإيداع 20 / 3 / 2012. قِيل للنشر في 28 / 6 / 2012

□ ملخص □

لقد أظهرت الدراسة التجريبية لمنظومة "حزمة أيونات-بلازما" التي تم إنجازها في جهاز توليد البلازما المضاعفة متعددة القطبية المغناطيسية أن تشكل الدوامات في فضاء الأطوار الأيونية يجسد النظام اللاخطي للاستقرارية في المنظومة "حزمة أيونات-بلازما".

لقد تم ذلك من خلال دراسة الاستجابات المختلفة للمنظومة السابقة تجريبياً عند تحريض يعتمد على موجة صدم، وقد أظهرت دراسة انتشار الهبوط الذي تمت ملاحظته خلف موجة الصدم وكذلك دراسة تابع توزع السرعة للأيونات في هذا الهبوط أننا فعلاً بصدد نظام لاخطي للموجة البطيئة "النمط البطيء للحزمة" للمنظومة "حزمة أيونات-بلازما".

لقد بينت التجارب التي تم إنجازها ضمن ذلك الجهاز تشكل بنية من نوع "قمة و قعر" خلف جبهة موجة الصدم المحرّضة بوساطة إحداث اضطراب درجي في سرعة حزمة الأيونات. تمثل "القمة" موجة انضغاط سريعة يكون من أجلها تموج الكثافة على توافق في الطور مع تموج السرعة وهي تمثل النمط السريع للحزمة في المنظومة "حزمة أيونات-بلازما". أما "الحفرة أو البئر" فتمثل موجة تخلخل بطيئة تكون من أجلها تموجات الكثافة والسرعة على تعاكس في الطور وهي تمثل النمط البطيء للحزمة في تلك المنظومة.

ومن خلال تلك التجارب وفي نفس السياق تم أيضاً تسجيل التحريض المتموضع للاستقرارية الصوتية الأيونية ودراسة تأثيرها ببعض المتحولات الأساسية وذلك من خلال تبيان وتوضيح تطوّر هذه اللاستقرارية بتابعية تلك المتحولات.

الكلمات المفتاحية: بلازما مضاعفة، انقراغ كهربائي، عمدة أيونات، مسابر لانغمير، منظومة "حزمة أيونات- بلازما"، لاستقرارية صوتية أيونية، تفاعل "موجة-جزئية"، سرعة صوتية أيونية، أنماط إلكتروستاتيكية انتشارية، أمواج صدم إلكتروستاتيكية.

*مدرس - قسم العلوم الأساسية - كلية الهندسة الكهربائية والإلكترونية - جامعة حلب - سورية.

Étude Expérimentale des Réponses Transitoires d'un Système " Faisceau d'ions-Plasma" -Les Modes Propagatifs et L'instabilité Acoustique Ionique-

Dr. Abdulwahab Queka *

(Déposé le 20 / 3 / 2012 . Accepté 28 / 6 /2012)

□ Résumé □

L'étude expérimentale du système "faisceau d'ions-plasma" effectuée dans une machine double plasma multipolaire magnétique a montré que la formation de tourbillons dans l'espace des phases ionique représente le régime non-linéaire de l'instabilité du système "faisceau d'ions-plasma".

Cela était réalisé expérimentalement en étudiant les différences réponses du système "faisceau d'ions-plasma" à une excitation du type onde de choc, où l'étude de la propagation de la dépression observée derrière l'onde de choc, et de la fonction des vitesses ioniques dans cette dépression montrent qu'il s'agit vraiment d'un régime non-linéaire de l'onde lente (le mode lent du faisceau) du système "faisceau d'ions-plasma".

Des expériences, réalisées dans cette machine, montrent la formation d'une structure de type "bosse et creux" derrière le front de choc induit par une perturbation en échelon de la vitesse du faisceau. Le "bosse" représente une onde de compression rapide (mode faisceau rapide) pour laquelle la fluctuation de densité est en phase avec la fluctuation de vitesse, tandis que le "creux ou puit" représente une onde de raréfaction lente (mode faisceau lent) pour laquelle les fluctuations de densité et de vitesse sont en opposition de phase.

L'excitation localisée de l'instabilité acoustique ionique est également enregistrée et une étude de son affection avec certains paramètres principaux est effectuée en montrant son évolution en fonction de ces paramètres.

Mots-clés: Double-Plasma, Décharge électrique, Gaine d'ions, Sondes de Langmuir, Système faisceau d'ions-plasma, Instabilité acoustique ionique, Interaction onde-particule, Vitesse acoustique ionique, Modes électrostatiques propagatifs, Ondes de choc électrostatiques.

* Maître de Conférences, Département de Sciences Basics, Faculté de Génie Électrique et Électronique, Université d'Alep-Syrie.

مقدمة:

من المعروف نظرياً أنّ نظاماً ما، حتى ولو كان مستقراً خطياً، يمكنه أن يصبح لاستقراراً نتيجة تأثيرات لاختطية. لقد تمت دراسة اقتران ومزاوجة الأنماط اللاخطية بين ثلاث أمواج مترابطة في المنظومة "حزمة أيونات-بلازما" حيث إنّ نوع التحريض المستخدم وثوابته يوافقان طريقة أساسية في اقتران ومزاوجة النمط اللاخطي. إنّ متغيراً أساسياً يسمى الكثافة النسبية لحزمة الأيونات يلعب دوراً هاماً في نشوء أنماط انتشارية في المنظومة "حزمة أيونات-بلازما"، تتحكم السرعة التي تملكها حزمة الأيونات، والتي هي عبارة عن متغير آخر، في كلّ من نوع واقتران هذه الأنماط. لقد درسنا تبدّد تلك الأنماط في هذا النظام لفهم كيفية وآلية تفاعل حزمة الأيونات مع أيونات البلازما وبالتالي لتحديد نوع الاقتران الذي يوصل النظام إلى حالة اللااستقرار. كما درسنا أيضاً تبدّد حزمة الأيونات على محور انتشارها نتيجة الاضطراب الصوتي الأيوني لما له من أهمية في تطوّر المنظومة "حزمة أيونات-بلازما". أخيراً تمت دراسة اللااستقرارية الصوتية الأيونية والتركيز على المتحوّلات التي تؤثر في تطورها.

أهمية البحث وأهدافه:

يهتمّ هذا البحث بشكل عام بالاضطراب الصوتي الأيوني في البلازما من خلال النظام "حزمة أيونات-بلازما" التي يمكن تشكيلها ضمن المنظومة التجريبية المسماة "جهاز توليد البلازما المضاعفة متعدّدة القطبية المغناطيسية" والتي يتمّ فيها عادة دراسة الأمواج وانتشارها. ويركّز تحديداً على دراسة اللااستقرارية الصوتية الأيونية التي تنشأ في هذه المنظومة وبالمتحوّلات الأساسية التي تؤثر في تطورها. وتأتي أهمية هذا العمل بشكل خاص من خلال دراسة الأنماط الانتشارية وتبددها ضمن المنظومة "حزمة أيونات-بلازما" لما لذلك من أهمية لمعرفة الشروط وتحديد المتحوّلات التي تؤدي بالنظام إلى الوصول إلى حالة اللااستقرار، لذلك كان من الطبيعي أن نهتم بالكشف عن اللااستقراريات الصوتية الأيونية التي تظهر في البلازما وعن الشروط والظروف المناسبة التي تؤدي إلى ظهورها، وأيضاً من خلال دراسة المتحوّلات التي تؤثر في حزمة الأيونات.

فالهدف الأساسي من عملنا هو دراسة الأنظمة اللاخطية للمنظومة "حزمة أيونات-بلازما" انطلاقاً من أنظمة خطية منتشرة بوساطة المنظومة وتوصيف الاضطراب الصوتي الأيوني من خلال دراسة الأنماط الانتشارية للمنظومة "حزمة أيونات-بلازما" وتبدّد حزمة الأيونات الحادث بالاضطراب.

طرائق البحث ومواده:

سنقوم أولاً بعرض موجز مبسط لمنظومة العمل التجريبية المتمثلة بجهاز توليد البلازما المضاعفة متعدّدة القطبية المغناطيسية وكيفية إنتاج البلازما فيها ومن ثم توصيفها وعرض متحوّلاتها الأساسية التي تمّ قياسها بمساعدة مسابر لانغيمير المتنوعة ومحلّ طاقة إلكتروستاتيكي للأيونات، وأيضاً كيفية تحقيق النظام "حزمة أيونات - بلازما" في هذا الجهاز [1]. سنعرض أيضاً الأدوات ونظام اقتناء المعطيات وتسجيل البيانات المتمثلة برواسم الإشارة ومحلّلات الطيف ووسائل المراقبة والتحكّم. في النهاية سنقدم النتائج العملية المتعلقة بالأنماط الانتشارية للمنظومة "حزمة أيونات-بلازما" ويتطوّر تلك المنظومة وكذلك النتائج المتعلقة باللااستقرارية الصوتية الأيونية والمتحوّلات التي تؤثر في تطورها.

منظومة الأجهزة التجريبية

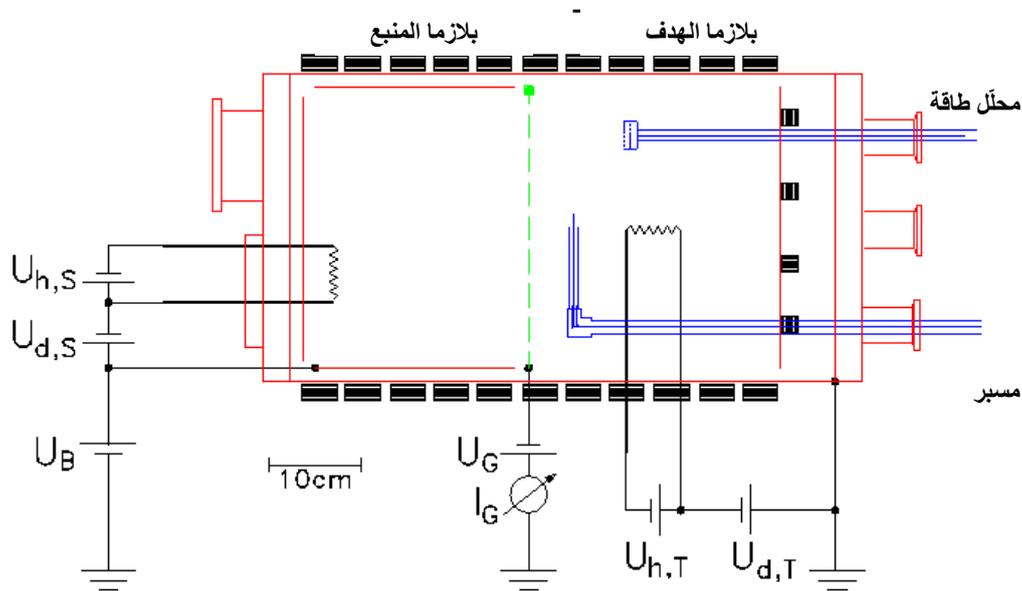
إن المنظومة الموصوفة هنا هي بلازما مضاعفة متعددة القطبية المغناطيسية كلاسيكية تُستخدم بشكل أساسي في بحوث فيزياء الأمواج داخل البلازما (تفاعل موجة-جزئية)، وقد استخدمت هذه المنظومة بشكل خاص في التجارب المتعلقة بالمنظومة "حزمة أيونات-بلازما".

البلازما المضاعفة متعددة القطبية المغناطيسية وخواصها

يتم توليد البلازما ضمن مولدات البلازما بوساطة انقراض كهربائي تحت ضغط منخفض وذلك ضمن حجرة ذات حجم كبير مفرغة من الهواء حيث يتم إصدار الإلكترونات الابتدائية بالطاقة بوساطة سلسلة من الفتائل المسخنة. نشير إلى أن هناك حقلاً مغناطيسياً متعدّد القطبية على جدار الحجرة يقوم بعملية عكس وحصر الإلكترونات المؤيئة ويضمن في الوقت نفسه تزايداً كبيراً للكثافة الإلكترونية كما يضمن أيضاً انتظام وتمائل البلازما بشكل أفضل. علاوة على ذلك فهو يضمن أيضاً أن يكون مستوى الضجيج ضعيفاً، ويعزى هذا الضجيج إلى آلية إنتاج البلازما ضمن تشكيلنا الموصوف [2, 3]. يمكن عرض مخططاً مبسطاً لهذه المنظومة في الشكل (1).

يتكوّن هذا الجهاز من حجرة أسطوانية من الـ "الستانلس ستيل" قطرها 34cm وطولها 60cm مفرغة من الهواء تحت ضغط منخفض من المرتبة 10^{-6} mBar، حيث تُدخل بدورنا غاز الأرجون الخامل المثبت تحت ضغط من المرتبة 10^{-4} mBar (ضغط العمل). هذه الحجرة الأسطوانية مقسّمة بوساطة شبكة معدنية دقيقة ذات معدل شفافية عالٍ (80%) إلى غرفتين منفصلتين الأولى توافق طرف المنبع (الغرفة التي تُولّد فيها البلازما المنبع) والأخرى توافق طرف الهدف (الغرفة التي تُولّد فيها البلازما الهدف). في غرفة المنبع وإلى داخل الحجرة يوجد أسطوانة إضافية معزولة كهربائياً عن الحجرة بطريقة يمكننا بها تقطيب البلازما المنبع بوساطة جهد معين U_B (U_{Bias})، حيث نستطيع من خلال هذا الجهد تحديد سرعة حزمة الأيونات المحقونة من غرفة المنبع إلى غرفة الهدف. ويوجد فتائل تسخين في كلّ من غرفة المنبع وغرفة الهدف من التنغستين لها مواصفات متكافئة (قطر وطول كل منها على الترتيب: 0.2mm، 9cm) حيث تكوّن هذه الفتائل المهابط، على حين أن جدار الجهاز الكلي لطرف الهدف والأسطوانة الداخلية لطرف المنبع يكوّنان المصاعد. يمكن تكوين البلازما في كل غرفة بتطبيق جهد تسخين U_h (U_{heat}) على كل فتيلة من فتائل التنغستين، هذا الجهد يعادل تقريباً 4volts لكل فتيلة والذي يقابل تياراً كهربائياً شدته 4ampères لكل فتيلة. يحثّ هذا التسخين الفتائل على إصدار الإلكترونات بوساطة الفعل الكهرحراري، وتسمى هذه الإلكترونات الصادرة "الإلكترونات الابتدائية" أو "الإلكترونات الطاقية" التي يمكن تسريعها وذلك بتطبيق جهد انقراض $U_{d-s,T}$ ($U_{discharge-source,Target(cible)}$) مقابلاً لفرق الطاقة المطبّق بين المهبط والمصعد. هذه الإلكترونات الطاقية (نموذجياً طاقتها 40eV) تدخل في تصادمات متعاقبة مع الذرات المعتدلة لغاز الأرجون المستخدم فتؤيّنّها لتخلق بدورها إلكترونات تسمى "الإلكترونات الثانوية" التي تشكّل الإسكان الإلكتروني للبلازما [1]. يتراوح تيار الانقراض ($I_{discharge}$) بين (10 - 500) mA، أمّا جهد التحيز السلبى للشبكة الفاصلة بين الغرفتين فيتراوح بين 0 - 150 V.

فيما يتعلّق بمتغيّرات البلازما، فإنّ الكثافة الإلكترونية n تتراوح بين $10^8 - 10^9 \text{cm}^{-3}$ ، ودرجة الحرارة الإلكترونية Te محصورة بين $(2 - 4) \text{eV}$ ، أما درجة الحرارة الأيونية Ti فهي محصورة بين $(0.06 - 0.1) \text{eV}$. أيضاً فإنّ طول ديبي λ_{De} محصور بين $(0.013 - 0.13) \text{cm}$ [4, 5, 6].



الشكل(1): مخطط عام وبسيط لجهاز مولّد البلازما المضاعفة المولّدة بالانفراغ الكهربائي.

من أجل توسيع حقل التجارب الممكن ومن أجل الحصول على إنتاج فعّال للبلازما، تمّ تجهيز الحجرة الأسطوانية بمغانط دائمة من الحديد المطاوع مثبتة على سطحه الخارجي وفقاً لمولّدات الأسطوانة بحيث تكون خطوط هذه المغانط مفصولة عن بعضها البعض بمسافة 8cm تقريباً، وأيضاً بمغانط دائمة أخرى مثبتة على سطح القاعدة للطرف الهدف بشكل قطري. بتوزّع المغانط بهذا الشكل يكون الحقل المغناطيسي B في مركز الوعاء معدوماً. يجب لفت الانتباه إلى أن هذه المغانط موزّعة وموجّهة بطريقة تضمن حصر الإلكترونات الابتدائية (أي بالترتيب: $N-S \dots$), كما تضمن زيادة احتمال التصادمات المؤيّنّة قبل ضياع هذه الإلكترونات في خطوط التهريب للبنية متعددة القطبية المغناطيسية المكوّنة بالشكل المذكور [2].

وسائط التشخيص

لدراسة البلازما والتعرّف على مكوّناتها بشكل جيد، نحتاج لأدوات تشخيص. من بين أدوات التشخيص هذه المستخدمة في فيزياء البلازما الأكثر بساطة للاستخدام والأكثر قدماً هي مسابر لانغمير (Sonds de Langmuir) [7]، حيث تمكننا مسابر لانغمير من دراسة البلازما من خلال تحديد متحولاتها الوصفية [4, 5, 7]، أهم هذه المتحولات: الطاقة الكامنة للبلازما، الكثافة الإلكترونية، درجة الحرارة الإلكترونية، والطاقة الكامنة العائمة (potentiel flottant). من أجل ذلك نقطّب المسبر إيجابياً وندرس الميزات "تيار-جهد" لهذا المسبر. إضافة إلى المسابر فقد استخدمنا أيضاً محلّ طاقة إلكتروستاتيكي (analyseur électrostatique) مؤلف من شبكتين ومجمّع وذلك لتحليل طاقة الأيونات، فهو يعطينا تماماً تابع توزع السرعة لأيونات الحزمة وأيونات البلازما. إنّ تابع التوزع هذا يعطي قياساً صحيحاً لدرجة الحرارة لطلالما أنها أكبر من السرعة الحرارية لأيونات (السرعة الصوتية الأيونية). سيكون

لدينا في هذه الحالة قمتان اثنتان على تابع التوزع منفصلتان تماماً عن بعضهما البعض موافقتان على الترتيب إلى أيونات البلازما وأيونات الحزمة. إن الفرق الطّاقّي بين هاتين القمّتين (الفرق بين الطّاقّتين الكامنتين) يعطينا مباشرة طاقة حزمة الأيونات.

الأدوات ونظام اقتناء المعطيات

الأدوات: إن البلازما الموصوفة في تشكيلنا السابق تُبدي ضمن شروط معينة ميّزة اضطرابية، فهي إذاً بلازما مضطربة. وتحليل هذا الاضطراب (اضطراب صوتي أيوني-turbulence acoustique ionique) المنتشر بترددات قريبة من تردد البلازما الأيوني يتطلّب تسجيلاً للإشارات الكهربائية ضمن سلّم للترددات من الصفر (تيار مستمر) وحتى 1MHz بشكل مُعلن على شاشة إظهار. من أجل ذلك استخدمنا راسمي إشارة رقميين من طراز Locroy 9403 C كل منهما له أربع قنوات حيث إن كل قناة بوسعها أن تسجل في الذاكرة 50000 نقطة (عينة). نشير إلى أن تردد العينات (تردد المسح) محقق على 200 MHz بقوة فصل 8 بايت (8 Bits). كما استخدمنا أيضاً راسم إشارة رقمي ثالث لإظهار السوليتونات Les solitons ومراقبة انتشارها. أخيراً كُنّا قد استخدمنا راسم اهتزاز تشابهي (analogique) رابعاً يفيد في الإظهار الدائم لمميّزات المسبر "تيار- جهد" لبلازما المنبع.

أما التحليل الطيفي للأمواج فقد تمّ بوساطة محلّل طيف تشابهي (analyseur de spectre analogique)، كما أن تضخيم الإشارات وترشيحها (مرشّح: عصابة- سفلي) قد تمّ بوساطة جهاز من طراز Tektronix AM 502 حيث إن التضخيم والترشيح يتّمان بوساطة عدّة معدّلات من خلال عدة سحّابات (صناديق) مُدرّجة داخل الصندوق (الشاسيه) لهذا الجهاز والتي هي بدورها أيضاً مولدات إشارة.

المراقبة والتحكم - نقل وتحويل المعطيات: تتصل التجهيزات والمعدّات بحاسوب آلي عالي الدقّة وذلك بتوسط البرنامج المنطقي LaboWindows of National Instruments. إن برامج هذا النظام مكتوبة بلغة الـ C التي تسمح لنا بتسهيلات كبيرة في تغيير وتطوير نهج وطرائق الاقتناء وكذلك في المراقبة والتحكم. وبشكل خاص إظهار الصور والرسومات "الزمانية- المكانية" (spatio-temporels) الموافقة لأنظمة مضطربة بزمن حقيقي (أي بمقياس زمن حقيقي).

النتائج والمناقشة:

1- الأنماط الانتشارية للمنظومة "حزمة أيونات - بلازما"

لنعتبر منظومة فيزيائية مكوّنة من حزمة أيونات محقونة ضمن بلازما. تُعرّف الكثافة النسبية لحزمة الأيونات هذه بالعلاقة $\alpha = n_{ib} / (n_{ib} + n_{ip})$ حيث n_{ib} هي كثافة أيونات الحزمة المتحركة بالسرعة v_b ($v_{beam} \equiv v_{faisceau}$) و n_{ip} هي كثافة أيونات البلازما. يتحقّق التعادل الكهربائي بوساطة إسكان الإلكترونات (الإسكان الإلكتروني) للبلازما ذات الكثافة n_e المساوية للكثافة الأيونية الكلية. مع افتراض أنّ توابع توزّع السرعة هي توابع توزّع ماكسويل (Maxwelliennes).

كما تتطلّب دراسة الأنماط الانتشارية للمنظومة "حزمة أيونات - بلازما" الأخذ بالاعتبار المتغيّرين $T_{i,b}$ و $T_{i,p}$ اللذين يمثلان على الترتيب درجتي الحرارة الأيونية لأيونات الحزمة وأيونات البلازما، وكذلك الأمر بالنسبة للمتغيّر v_b الذي يمثل سرعة أيونات الحزمة في جملة المختبر العطالية. تحدّد هذه المتغيّرات الكميات الوصفية

المميّزة للمنظومة مثل تردد البلازما الإلكتروني ω_p وتردد البلازما الأيوني Ω_p ، يضاف إليهما السرعة الصوتية الأيونية $C_s = \left(\frac{KT_e}{M_i} \right)^{\frac{1}{2}}$ والنسبة $T = T_e/T_i$ ، حيث M_i هي كتلة الأيون، T_i درجة الحرارة الأيونية، T_e درجة الحرارة الإلكترونية و K ثابت بولتزمان.

يمكننا باستخدام النظرية الحركية للبلازما الحصول على علاقة التبند للأنماط الإلكترونية استاتيكية لهذه المنظومة والتي يمكن وضعها في الحالة التي تكون فيها توابع توزّع السرعة هي توابع توزّع ماكسويل على الشكل التالي [8]:

$$1 + \frac{1}{K^2} [1 + \zeta_e \cdot Z(\zeta_e)] + \frac{T_e(1-\alpha)}{T_i} \frac{1}{K^2} [1 + \zeta_i \cdot Z(\zeta_i)] + \alpha \frac{1}{K^2} \frac{T_e}{T_b} [1 + \zeta_b \cdot Z(\zeta_b)] = 0$$

حيث إنّ $K = \frac{k}{k_{De}} = k \lambda_{De}$ هو العدد الموجي المختزل الذي يمثل نسبة العدد الموجي k إلى العدد الموجي

لديباي Debye k_{De} (λ_{De} طول موجة ديباي)، وأنّ $\Omega = \frac{\omega_p}{\Omega_p}$ هو التردد الزاوي (النبض) المختزل الذي يمثل

نسبة تردد البلازما الإلكتروني ω_p إلى تردد البلازما الأيوني Ω_p . أما Z فهو تابع تبند البلازما، وأما المقادير ζ المختلفة فهي على النحو التالي [8]:

$$\zeta_e = \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{\Omega_p}{\omega_p} \frac{\Omega}{K} \quad \zeta_i = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{\frac{T_e}{T_i}} \frac{\Omega}{K} \quad \zeta_b = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{\frac{T_e}{T_b}} \frac{\Omega - v_b}{K}$$

كما أنّ سرعة الحزمة v_b منسوبة إلى السرعة الصوتية الأيونية C_s .

بالمحصلة النهائية تُظهر علاقة التبند أن الطول، وبالتالي مختلف الأنماط الانتشارية، لا تعتمد إلا على المقادير (النسب) T_e/T_i ، T_{ib}/T_i ، ω_p/Ω_p و $\alpha = n_b/n_0$ المستقلة عن الأبعاد حيث وجدنا في معظم تجاربنا أنّ $T_e/T_i \approx 20$ ، $T_{ib} \approx T_i$ و $\alpha \approx 0.1$ وذلك من أجل سرعة للحزمة أكبر من السرعة الصوتية الأيونية $(v_b > C_s)$.

يلعب المتغير α الذي يمثل الكثافة النسبية لحزمة الأيونات دوراً مهماً:

(1) فمن أجل $\alpha=0$ ، أي في حال عدم وجود حزمة، يكون لدينا نمط وحيد مخمّد بشكل ضعيف بوساطة مفعول لانداو Effet Landau (أمواج صوتية أيونية) الذي من أجله يكون التبند ضعيفاً (عندما $\Omega \ll 1$). أما الأمواج منخفضة التردد بالنسبة لتردد البلازما الأيوني فإنّها تنتشر بنفس سرعة الطور C_s .

(2) ومن أجل $\alpha=1$ ، تتحرّك كل الأيونات بسرعة الحزمة v_b ، الأمر الذي يعطي نمطين اثنين للحزمة متحركين بوساطة مفعول دوبلر Effet Doppler. ونرصد عندئذ في جملة المختبر العطالية نمط حزمة سريع mod faisceau rapid ذو سرعة طورية $(v_b + C_s)$ ونمط حزمة بطيء mod faisceau lent ذو سرعة طورية $(v_b - C_s)$.

(3) أمّا من أجل $0 < \alpha < 1$ (الحالة العامة أو الحالة المتوسطة)، فإنّ سرعة الحزمة v_b هي المتغير الذي يحدّد وجود مختلف فروع علاقة التبند، أي مختلف فروع المنحنيات البيانية (أنظر الشكل-2):

- فمن أجل القيم الكبيرة لـ v_b ($v_b > 2C_s$)، يوجد ثلاثة أنماط مخمّدة، نمط صوتي أيوني mod acoustique ionique ذو سرعة طورية C_s $v_i = \left(\frac{n_{ib}}{n_e}\right)^{1/2}$ ، ونمطان للحزمة (نمط سريع + ونمط بطيء -) بسرعتين طوريتين قريبتين من القيمتين C_s . $v_{\pm} \approx v_b \pm \left(\frac{n_{ib}}{n_e}\right)^{1/2}$. (عندما $\alpha \ll 1$).
- ومن أجل قيمة لـ v_b قريبة من C_s ($v_b \approx C_s$)، فإن النمط الصوتي الأيوني والنمط البطيء للحزمة يلتحمان معطيين بذلك نمطاً لا مستقراً حتى قيم لـ v_b مجاورة للقيمة $2C_s$ ($v_b \approx 2C_s$). وتكون قيمة السرعة الطورية لهذا النمط قريبة من C_s . نشير إلى أنه من الممكن ضمن هذا المجال، $C_s < v_b < 2C_s$ ، تحديد معدّل نمو زمني أو مكاني.

- أما من أجل $v_b \rightarrow 0$ ، فيصبح نمط الحزمة البطيء من جديد النمط الصوتي الأيوني. نشير هنا إلى أنّ الشرط الضروري لحدوث اللااستقرارية "حزمة أيونات - بلازما" هو:

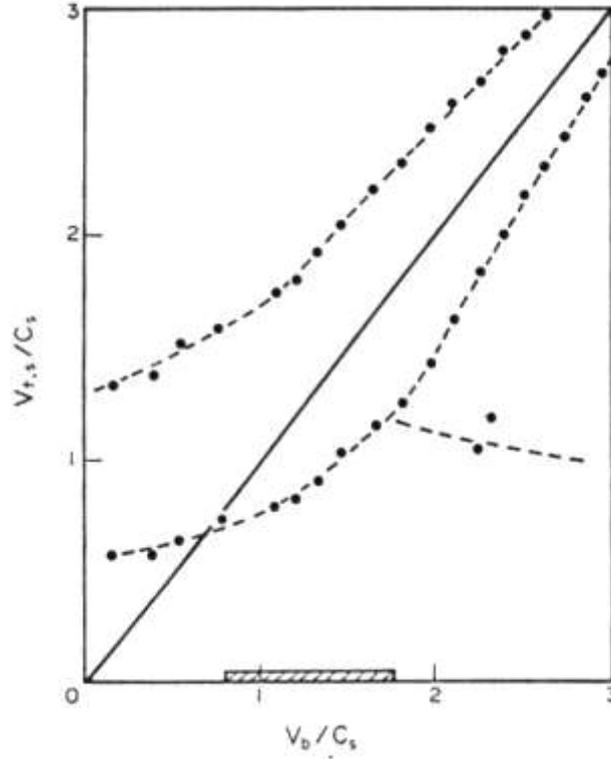
$$\left\{ v_b > \frac{C_s}{\beta} \quad \& \quad \beta = \left(1 + \frac{K^2}{K_D^2}\right)^{1/2} \right\} \Leftrightarrow C_s < v_b < 2C_s$$

يُظهر الحلّ العددي أنّ المجال اللامستقر السابق يكون منزاحاً بشكل طفيف إلى ما دون القيمة C_s كما بيّنه القسم المظلل على الشكل (2).

1-1- اللا استقرارية في منظومة "حزمة أيونات - بلازما":

إنّ اللا استقرارية في منظومة "حزمة أيونات-بلازما"، وغيرها من المنظومات اللا مستقرة، معروفة منذ زمن بعيد في فيزياء البلازما. ومن أجل فهم كيفية تفاعل الحزمة والبلازما (تفاعل موجة-جزيئة) فإنّه يتوجب علينا دراسة علاقة التبديد للأنماط الإلكترونية لهذا النظام (الأنماط المذكورة سابقاً)، أي حل المعادلة التي تمّ الحصول عليها عددياً في نطاق النظرية الحركية للبلازما. ولتوضيح الظاهرة بإيجاز كافٍ فإننا نقول: إنّ المُواوَجَة بين قسم الحزمة البطيء المقيد على مفعول دوبلر Doppler والقسم الصوتي الأيوني هي التي تسبب عدم الاستقرار.

على سبيل المثال، نوضح على الشكل(2) علاقة التبدد التجريبية التي تم الحصول عليها ضمن بلازما مضاعفة متعددة القطبية المغناطيسية، فقد استخدمت أمواج دائمة ضعيفة المستوى للحصول على هذه القياسات. يمكن تعديل هذه الطريقة أي طريقة "أمواج-اختبار" باستخدام تحريصات عابرة للمنظومة تسمح بقياس أكثر سهولة لسرعة



الشكل(2): علاقة التبدد التجريبية التي تم الحصول عليها انطلاقاً من زمن انتشار مختلف الاستجابات الخطية (السريعة، البطيئة، والسرعة الصوتية، بتابعة سرعة الحزمة). تنتج اللاستقرارية في المجال المظلل لسرعة الحزمة.

المجموعة للأمواج *vitesse de groupe* والقريبة جداً من سرعة الطور *vitesse de phase* ما دامت الترددات بعيدة بشكل كافٍ عن تردد البلازما الأيوني. يجب مع ذلك الحرص المحافظة على الطابع الخطي للاستجابة.

1-2- أمواج - الاختبار:

لنتذكر بأن موجة صدم إلكتروستاتيكية يمكن أن تظهر إثر اضطراب عابر لمنظومة "حزمة أيونات-بلازما". يمكن تحقيقه هذا الاضطراب بزيادة سرعة الحزمة خلال زمن قصير وذلك بتطبيق درجة موجبة من الطاقة الكامنة بين البلازما المنبع والبلازما الهدف بتردد تكراري قدره 1 kHz مثلاً. عندئذ نلاحظ وراء الموجة القذفية المصاحبة لأيونات غمد الشبكة المعدنية، التي أبعدت عنه أثناء التحريض، اضطراباً في الكثافة وفي الطاقة الكامنة ضمن البلازما الهدف. هذا الاضطراب مركّب من موجة انضغاط (تمثل النمط السريع للحزمة) وموجة تخلخل (تمثل النمط البطيء للحزمة) [9].

لقد طبقنا على المصدد المنبع (الأسطوانة الداخلية في الحجرة للطرف المنبع) دفقةً من الطاقة الكامنة على شكل اندفاع سعتها قريبة من درجة الحرارة الإلكترونية استمرّ دوامها بضعة أدوار من دور البلازما الأيونية. ثم قمنا بتسجيل تموجات التيار الإلكتروني الملتقط بوساطة مسبر مسطح محيّر إلى طاقة أكبر بقليل من الطاقة الكامنة للبلازما وثبتت على بعد بضع سنتيمترات من الشبكة المعدنية. حيث وجدنا أنّ موجة الانضغاط المحرّضة تتطور بشكل

سريع متحركة على شكل قطار أمواج صوتية أيونية وحيدة (قطار من الأمواج الصوتية الأيونية المنفردة). في النظام اللاخطي شديد التحريض يكون لكل من سعة وعرض إشارة التحريض وشكلها أيضاً تأثير مهم على شكل الاستجابة [10,11].

لقد استخدمنا خواص أمواج الاختبار ضمن المنظومة "حزمة أيونات - بلازما" كأداة تشخيص لتبديد حزمة الأيونات بالاضطراب الصوتي الأيوني ضمن جهاز توليد البلازما المضاعفة متعددة القطبية المغناطيسية. إن أمواجاً أيونية محرّضة تحريضاً خارجياً [8]، بتطبيق نبضة موجبة ترددها التكراري $10kHz$ ($T = 100\mu S$) وسعتها $A = 2.5V$ ($A < T_e \& T_i$)، تزداد مكانياً في الحالة التي تكون فيها سرعة حزمة الأيونات مساوية للسرعة الصوتية الأيونية ($v_b \approx C_s$) حيث يكون تموج الكثافة الإلكترونية $\delta n_e / n_e = 15\%$. ومن المعروف جيداً أنّ هذا المستوى للاضطراب يعني تماماً أننا أمام لاستقرارية قد بلغت مستوى كافياً لإظهار وتبيان التأثيرات اللاخطية [9].

2- تطوّر المنظومة "حزمة أيونات - بلازما"

تقتضي الدراسة التجريبية إجراء مرحلتين اثنتين: تشتمل المرحلة الأولى على دراسة مكانية لتبديد حزمة الأيونات على محور الانتشار، والمرحلة الثانية على دراسة ميّزات الحزمة بتابعية طاقتها.

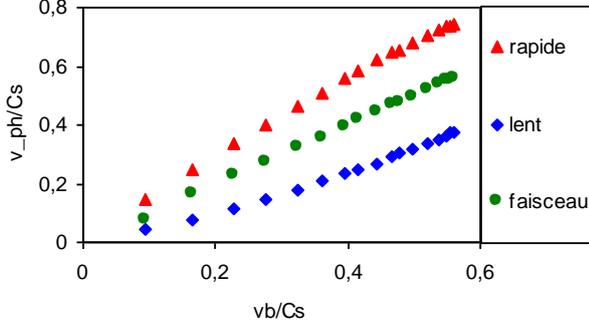
2-1- دراسة التبديد المكاني لحزمة الأيونات على محورها:

قمنا باستخدام أمواج الاختبار بهدف توصيف حزمة الأيونات، حيث تم إنجاز تسجيل نموذجي من أجل سرعة للحزمة قدرها $v_b \approx 0.9 C_s$. تمّت إعادة هذا التسجيل من أجل 12 موضعاً للمسبر يفصل بين كلّ موضعين سنتيمتر واحد. لقد سمح لنا ذلك باستقبال استجابات نموذجية على راسم الإشارة كالتالي بيّنها الشكل (3)، حيث نلاحظ على هذا الشكل وفي كل موضع للمسبر وجود "قمة" Bosse و "قعر" Puits لكثافة إلكترونية. يمكن مطابقة هاتين الاستجابتين (القمة والقعر) بنمطي الحزمة السريع ($v_{rapide} = v_b + \alpha^{1/2} C_s$) والبطيء ($v_{lent} = v_b - \alpha^{1/2} C_s$) على الترتيب. كما يمكننا متابعة تغيّر هذين النمطين مع الزمن على مسافة 11cm وذلك بدءاً من مسافة $x = 6cm$ عن الشبكة المعدنية وحتى مسافة $x = 17cm$ بعيداً عنها حيث يختفيان. لقد سمح لنا هذا التغيّر برسم المخطّط البياني للمسافة x بتابعية زمني المسير $t = \tau_{rapide}$ للقمة و $t = \tau_{lent}$ للقعر (من أجل نمطي الحزمة السريع والبطيء على التوالي) ومن ثم حساب سرعة الحزمة $v_b = tg\left(\frac{x}{t}\right) = \frac{v_{rapide} + v_{lent}}{2} \approx 2422 m/s \approx 0.9 C_s$ (لاحظ الشكل-4)، الذي هو قياس دقيق ومضبوط إلى حد كافٍ. هذه القيمة لسرعة الحزمة محصورة ضمن المجال $[0.8, 1.8] C_s$.

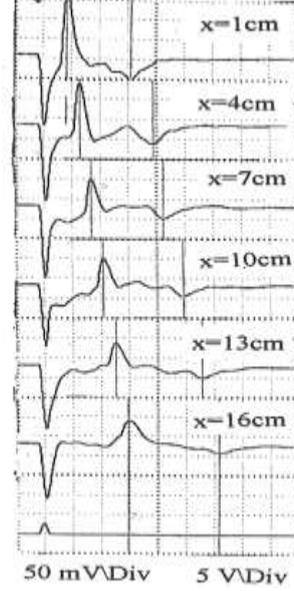
من أجل $\alpha = \frac{n_{ib}}{n_{ib} + n_{ip}} = 1$ (الكثافة النسبية لحزمة الأيونات)، أي نحن في صدد بلازما منجرفة كلياً ($n_{ip} = 0$)، فطبقاً للشروط السابقة يمكن القول بأن كلّ الأيونات تتحرك بسرعة الحزمة v_b الأمر الذي يعطي نمطين انتشاريين ($v_{rapide} = v_b + \alpha^{1/2} C_s$ و $v_{lent} = v_b - \alpha^{1/2} C_s$) متحركين بوساطة مفعول دوبلر Doppler كما بيّنهما الشكل (4).

ومن أجل $v_b \approx 0.9 C_s$ (القيمة المحسوبة سابقاً)، فإن النمط الصوتي الأيوني والنمط البطيء للحزمة يلتحمان معطين بذلك شكلاً لاستقراراً. ضمن هذا المجال الصغير ($0.8 C_s < v_b < 1.8 C_s$) من الممكن تحديد معدّل التزايد

المكاني باستخدام قطارات من الأمواج. أما من أجل قيم لسرعة الحزمة v_b تقترب من الصفر، فإن النمط السريع للحزمة يصبح النمط الصوتي الأيوني.



الشكل(4): النمط السريع للحزمة (Δ) والنمط البطيء للحزمة (\diamond) على امتداد محور الحزمة



الشكل(3): الاستجابتان السريعة والبطيئة الملتقطتان بواسطة مسبر لانغيمير وذلك بتابعية الموضع x . تردد التحريض التكراري $10kHz$ ، وسعة التحريض $2.5V$. الاستجابة ناتجة عن المتوسط لـ 128 حادثة

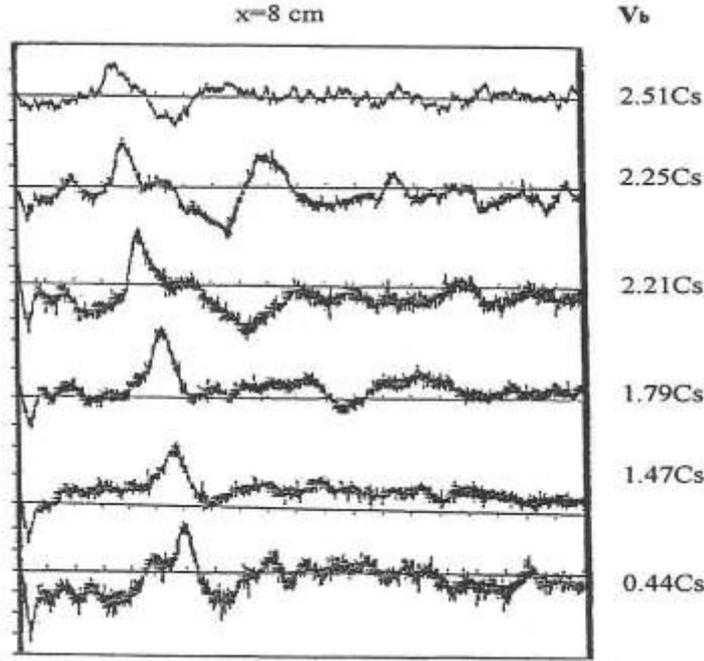
2-2- دراسة تغيير حزمة الأيونات بتابعية طاقتها:

لقد قمنا أيضاً بدراسة تغيير الميزات لحزمة الأيونات المحقونة في البلازما الهدف بتابعية طاقتها E_b ، حيث تم تثبيت سطح المسبر اللاقط على بعد $x = 8cm$ من الشبكة المعدنية. يبين الشكل(5) الاستجابات الملتقطة بالمسبر والمسجلة بواسطة راسم اهتزاز. تمثل هذه الاستجابات نمطي الحزمة السريع والبطيء اللذين من أجلهما تكون سعة التحريض العابر $0.7V$ وتردده التكراري $1kHz$. لقد تم التسجيل السابق من أجل ست عمليات حقن مختلفة لحزمة الأيونات في البلازما الهدف، كانت فيها طاقات الحزمة:

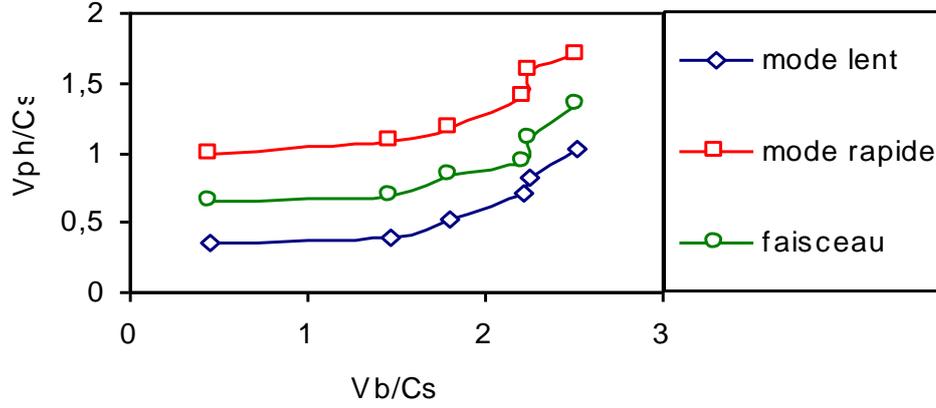
$$E_b = (0.3, 3.3, 4.9, 7.5, 7.7, 9.6) eV$$

$$v_b = (0.44, 1.47, 1.79, 2.21, 2.25, 2.51) C_s \quad \text{الموافقة للسرعات:}$$

يمثل الشكل (6) تغير سرعة الطور للنمطين السابقين بتابعية عمليات الحقن الست السابقة لحزمة الأيونات. المقصود هنا سرعة الطور لكل من نمطي الحزمة (السرعي والبطي) للمنظومة "حزمة أيونات - بلازما" بتابعية سرعة حزمة الأيونات التي تم حسابها بقياس الفرق في الطاقة الكامنة بين المصعدين المنبع والهدف. نلاحظ أنه من أجل سرعات للحزمة محصورة ضمن المجال $C_s [0.4, 1.7]$ فإن النمطين ينتشران بسرعة قريبة من السرعة الصوتية الأيونية، على حين أنه من أجل سرعات للحزمة محصورة ضمن المجال $C_s [1.7, 2.5]$ يصبح النظام لامستقرًا (غير مستقر). يمكن فهم هذه اللااستقرارية إذا اعتبرنا أن مفعول دوبلر Doppler يقود إلى تفاعل قوي بين نمط الحزمة البطيء ونمط البلازما عندما تكون سرعة الحزمة هي $C_s (v_b = C_s)$. في هذه الحالة يملك النمطان (النمط البطيء ونمط البلازما) تقريباً نفس سرعة الطور، ومن الممكن أن يكون هناك تفاعل فيما بينهما. يمكننا أن نبيّن من جهة أخرى أن النمط البطيء هو "الخزان" للاستقرارية وأنه هو الذي يسمح بنمو الأمواج. نفيد بالذكر هنا إلى أن الاعتبارات الحركية تميل إلى تعقيد هذه الصورة البسيطة وإلى تحديد عتبة سرعة للحزمة مختلفة قليلاً عن القيمة C_s .



الشكل (5): استجابات أنماط الحزمة بتابعية سرعة حزمة الأيونات. سعة التحريض العابر. 0.7 V وتردد التكرار 1 kHz . وذلك من أجل ست عمليات حقن للحزمة $(v_b \propto E_b)$



الشكل(6): سرعة الطور للأمام السابقة لمنظومة "حزمة أيونات - بلازما" بتابعة سرعة حزمة الأيونات من أجل عمليات الحقن الست السابقة ($v_b \propto E_b$) (سرعة الطور v_{ph} وسرعة الحزمة v_b منسوبتان إلى السرعة الصوتية الأيونية C_s).

3- اللااستقرارية الصوتية الأيونية - متغيرات مهمة

سوف نهتم هنا باللااستقراريات الصوتية الأيونية التي من أجلها تكون سرعة الطور للأمام ضعيفة جداً بالنسبة للسرعة الحرارية للإلكترونات ($v_{ph,i} \ll v_{Te}$)، أي سنهتم باللااستقرارية منخفضة التردد ($\omega_{pi} < \omega_{pe}$). من أجل ذلك سنفرض دائماً تحقق الشروط التالية:

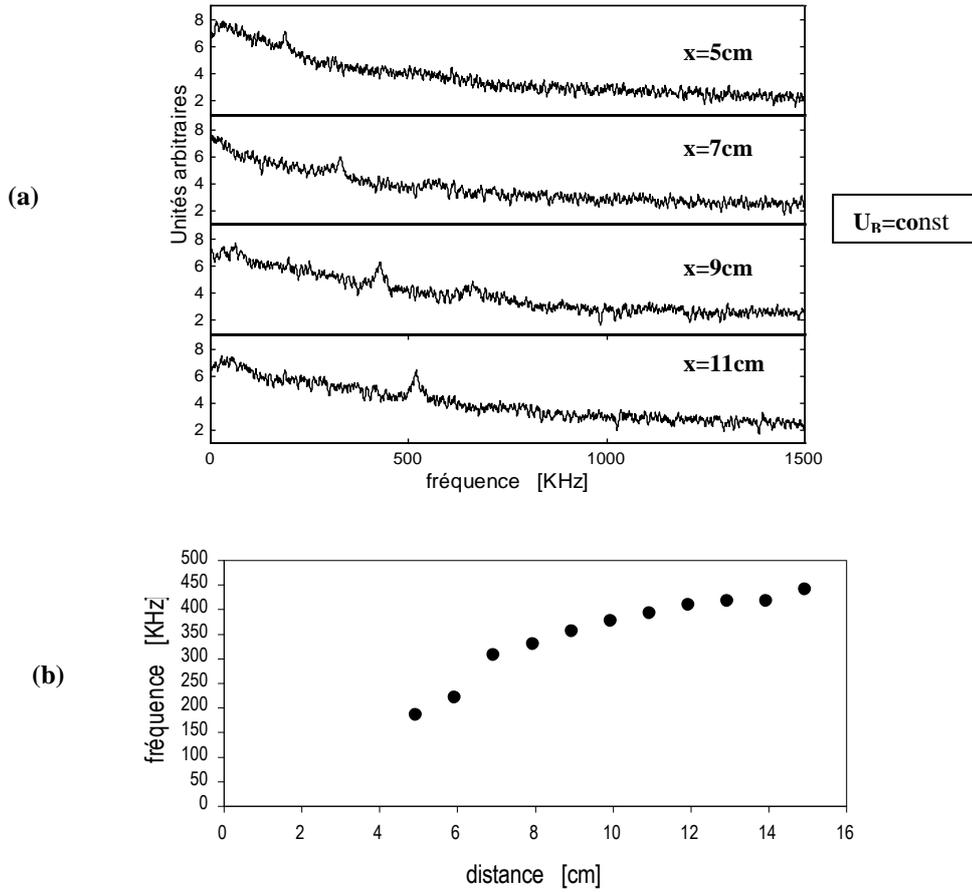
- أن تكون درجة حرارة كل من أيونات الحزمة و أيونات البلازما منخفضة،
- أن تكون كثافة أيونات الحزمة n_b ضعيفة ($\alpha \ll 1$) حتى يكون $\omega_{pi} < \omega_{pe}$ محققاً،
- أن يكون $T_b = T_i$ وأن $T_e \gg T_i$.

في الواقع إن فرضية المساواة بين درجة حرارة الحزمة ودرجة حرارة البلازما ليست سليمة إذا اعتبرنا أن تبريد الحزمة مرتبط بتسارعها.

فعلى سبيل المثال، تم الكشف في هذه التجربة عن لااستقرارية منتشرة بسرعة قريبة من السرعة الصوتية الأيونية C_s ويتردد يقع ضمن المجال $[180, 700] kHz$. نعم إنها لااستقرارية لأننا لاحظنا نمواً مكانياً في غياب التحريض، حيث تردد البلازما الأيوني قريب من $1 MHz$.

وفقاً للمخطط البياني للشكل(7) الذي يصف التغير المكاني لتردد هذه اللااستقرارية على مسافة $10 cm$ (على محور الحزمة)، فإننا نلاحظ أن تردد النمط الأقل استقراراً متماسك بما فيه الكفاية ومرتزايد عندما نبتعد عن الشبكة المعدنية ابتداءً من مسافة $5 cm$ وحتى $15 cm$. إن طول الموجة للنمط الأقل استقراراً (الأكثر تخلصاً واضطراباً) هو

$$\lambda_M \approx 5 mm \quad \text{تقريباً} \quad \lambda_M = \frac{2\pi}{k_M} = \frac{v}{f_M}$$



الشكل (7): (a) تسجيل طيف فورييه Fourier للترددات من أجل أربعة مواضع للمسبر: $x = 5, 7, 9, 11 \text{ cm}$ ($U_B = \text{const}$) (b) تغير تردد الاستقرارية على مسافة 10cm على امتداد محور الحزمة.

3-1- تغيير الكثافة النسبية لحزمة الأيونات α بتابعة المسافة x :

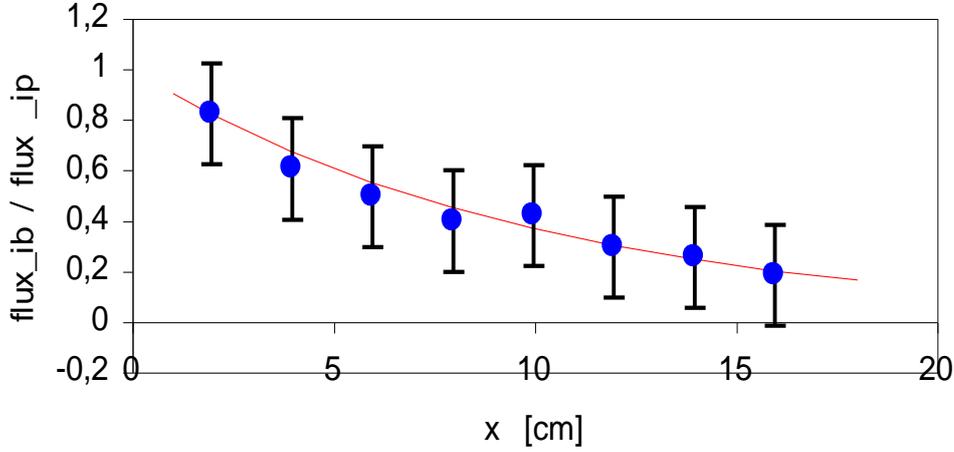
بيّنت الدراسة على أنه من أجل ضغط ثابت لغاز الأرجون المستخدم (ضغط العمل) ومن أجل سرعة حقن ثابتة لحزمة الأيونات، يكون هناك توهين *atténuation* لحزمة الأيونات على محورها سببه تبادل الشحنة الكهربائية من خلال تصادمات أيونات الحزمة مع الذرات المعتدلة لغاز الأرجون في البلازما الهدف، حيث تنقص كثافة حزمة الأيونات n_{ib} (تحييد كهربائي-*neutralisation*) وتزداد كثافة أيونات البلازما الهدف n_{ip} بحيث يكون $n_{ib} + n_{ip} \approx n_e \approx n = \text{constant}$ محققاً دائماً، حيث n هي كثافة البلازما الهدف الممتلئة أيضاً لكثافتها الإلكترونية n_e . هذا التطور لحزمة الأيونات مقيد على قسرية التعادل الكهربائي.

عملياً نبيّن على الشكل (8) التدفق النسبي لحزمة الأيونات $\frac{\Gamma_{ib}}{\Gamma_{ip}}$ (تدفق حزمة الأيونات $\Gamma_{ib} \propto n_{ib}$ منسوباً إلى

تدفق أيونات البلازما الهدف $\Gamma_{ip} \propto n_{ip}$) المتناسب مع الكثافة النسبية لحزمة الأيونات $\alpha = \frac{n_{ib}}{(n_{ib} + n_{ip})}$ وذلك

بتابعة المسافة x على محور الحزمة. نلاحظ أنّ $\alpha \approx \frac{n_{ib}}{n_{ip}} \propto \frac{\Gamma_{ib}}{\Gamma_{ip}}$ يتناقص بشكل أسّي تقريباً مع المسافة x

مفترضين أن للحزمة سرعة ثابتة (من أجل ضغط عمل ثابت). يُعزى ذلك إلى التغير في كثافة الحزمة المتناقصة من جراء تبادل الشحنة الكهربائية .échange des charges électriques

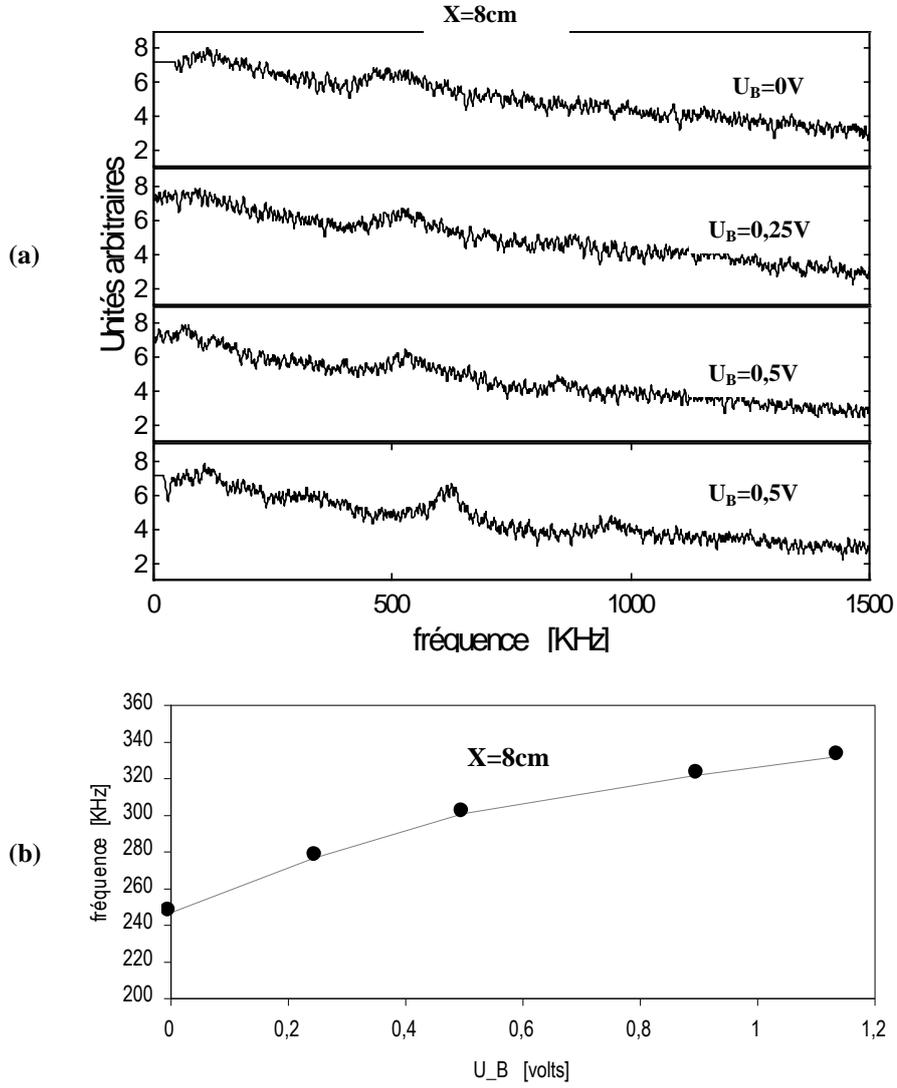


الشكل(8): تغير α بتابعة x .

3-2- تغير تردد اللاستقرارية f بتابعة جهد تحييز المصعد المنبع U_B :

قمنا أيضاً بقياس وتقدير تغير التردد في حالة لاستقرارية صوتية أيونية منتشرة بترددات واقعة بين f (250–350) kHz وذلك بتابعة طاقة الحزمة E_b المحقونة باتجاه البلازما الهدف (بتابعة جهد التحييز للمصعد المنبع U_B المتناسب مع طاقة الحزمة، $U_B \propto E_b$) عند المسافة $x=8cm$ من الشبكة المعدنية على محور الحزمة.

نلاحظ على المخطط البياني للشكل(9) أن تردد النمط الأقل استقراراً (الأكثر اضطراباً) يزداد بشكل بطيء مع U_B بدءاً من القيمة 250kHz وحتى القيمة 350kHz. بعد ذلك فإن زيادة صغيرة في طاقة الحزمة $U_B \propto E_b$ تؤدي إلى اختفاء اللاستقرارية: يوجد نطاق ضيق من المتحولات، كالسرعة التي تسمح بلاستقرارية المنظومة. في جملة المختبر العطالية، يكون تردد اللاستقرارية متزايداً بواسطة مفعول دوبلر [Doppler 12].



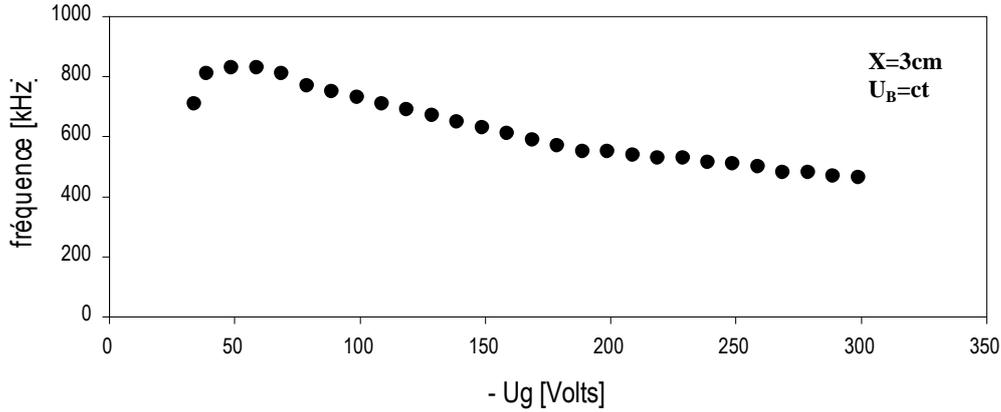
الشكل (9): (a) تسجيل طيف فورييه Fourier للترددات من أجل: $U_B = 0, 0.25, 0.5, 0.9 V$, $(E_b \propto U_B)$

(b) تغير تردد الاستقرارية بتابعية جهد تحييز المصعد المنبع.

(المسير متوضع على بعد 8 cm من الشبكة المعدنية).

3-3- تغيير تردد اللاستقرارية f بتابعة جهد تحييز الشبكة المعدنية U_G :

يتناقص تردد اللاستقرارية f مع التحييز السليبي U_G للشبكة المعدنية كما هو مبين في الشكل (10). يشير ذلك بوضوح إلى أن آلية التحريض مرتبطة بديناميكية الأيونات في الغمد المحيط بالشبكة المعدنية حيث تكون الشروط الحدية لمنظومة "حزمة أيونات-بلازما" محددة [12]. في الواقع يؤثر جهد تحييز الشبكة U_G على كثافة الأيونات في البلازما المنبع المحقونة من الشبكة المعدنية إلى غمد البلازما الهدف، مع مراعاة حفظ التدفق. يحدد المتغير U_G تردد الاهتزاز للشحنة الفراغية في منطقة الغمد للشبكة المعدنية [13, 14].



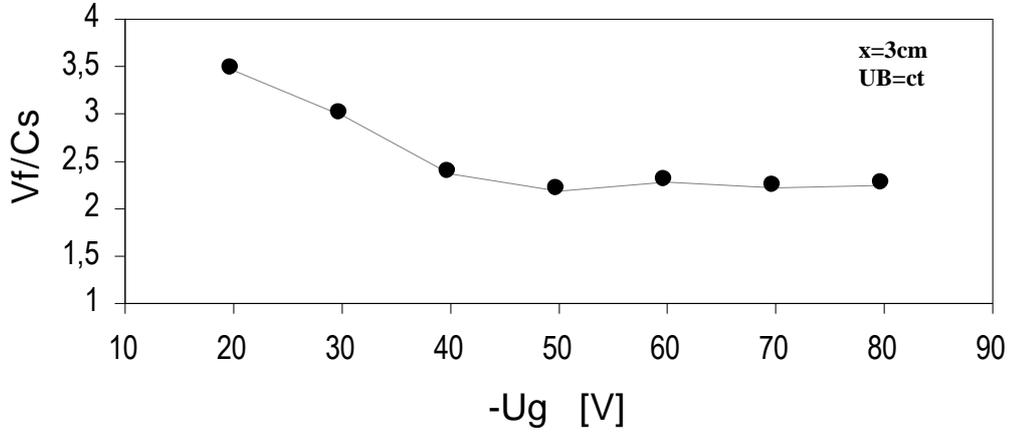
الشكل (10): تأثير التحييز السليبي للشبكة المعدنية على تردد اللاستقرارية . (بعد المسبر عن الشبكة المعدنية هو 3 cm).

3-4- تأثير جهد التحييز U_G على سرعة حزمة الأيونات v_b :

لقد أنجزنا أيضاً قياساً متعلقاً بتغيير حزمة الأيونات عند عبورها الشبكة المعدنية باتجاه الطرف الهدف وذلك بتابعة جهد التحييز السليبي U_G لهذه الشبكة (بعد المسبر في البلازما الهدف عن الشبكة $x=3\text{cm}$). نلاحظ على الشكل (11) أن سرعة الحزمة (هنا سرعة الحزمة منسوبة إلى السرعة الصوتية الأيونية) تتناقص بشكل خطي ابتداءً من القيمة $v_b/C_s = 3.45$ الموافقة لجهد تحييز الشبكة قدره $U_G = -20\text{ Volts}$ ، وحتى القيمة $v_b/C_s = 2.36$ من أجل $U_G = -40\text{ Volts}$ ، بعد ذلك وابتداءً من القيمة $U_G = -50\text{ Volts}$ لتحييز الشبكة تحافظ سرعة الحزمة على قيمتها ثابتة بجوار القيمة $v_b/C_s = 2.24$ تقريباً.

في هذه المرحلة نستطيع القول إننا حصلنا على حزمة من الأيونات تسمح لنا بإجراء القياسات على الأنظمة اللامستقرة للمنظومة "حزمة أيونات-بلازما" وتحقيقها ضمن شروط مناسبة، حيث إن الزيادة السلبية في جهد تحييز الشبكة المعدنية تصبح مستقلة عن سرعة الحزمة.

هذا التغيير يعود إلى سلوك الجسيمات المشحونة بجوار الشبكة المعدنية (قرب الغمد من الطرف المنبع). فالأيونات المسرعة (الموجبة طبعاً) تستطيع عبور المنطقة القريبة من الغمد pré-gaine والغمد gaine ثم الشبكة



(الشكل 11): تأثير جهد التحيز السليبي للشبكة المعدنية على سرعة الحزمة. ($x=3\text{cm}$ & $U_B=Ct$)

المعدنية المحيطة سلبياً. أما الجسيمات المشحونة سلبياً (الإلكترونات الحرارية "الثانوية" والطاقيّة "الابتدائية") فتعكس مرتدة عند مستوى قرب الغمد pré-gaine إذا كانت طاقتها أصغر من جهد التحيز المطبق على الشبكة المعدنية (بالقيمة المطلقة) أو تعبر الشبكة المعدنية في الحالة المعاكسة.

نلاحظ على نفس المخطّط البياني السابق (الشكل-11) أنّ حدّ الإشباع لحزمة الأيونات يبدأ من القيمة السالبة لجهد تحيز الشبكة المعدنية $U_G = -40V$ (نذكر بأنّ بعد المسبر عن الشبكة المعدنية في البلازما الهدف هو $x = 3\text{cm}$). بالفعل إنّ الإلكترونات الطاقيّة "الإلكترونات الابتدائية" (من مرتبة الـ 40eV) هي الوحيدة القادرة على تجاوز مثل ذلك الحاجز والدخول إلى الهدف، أما الإلكترونات الحرارية "الإلكترونات الثانوية" التي تملك طاقة من مرتبة الـ 3eV فهي غير قادرة على ذلك.

أخيراً يمكن القول إنّ تباطؤ أيونات الحزمة يُعزى إلى وجود الإلكترونات الابتدائية (الإلكترونات الطاقيّة) التي تصل طاقتها حتى 40eV . بعد ذلك، من أجل $U_G < -40V$ ، تنعكس كلّ الإلكترونات مرتدة باتجاه المنبع لتتفاعل مع أيونات الحزمة (عملية تعادل كهربائي) مما يشكّل منطقة إشباع للحزمة ابتداءً من $U_G < -40V$ [10, 13, 14].

الاستنتاجات والتوصيات:

تمت دراسة الأنظمة اللاخطية للاستقرارية الصوتية الأيونية في منظومة "حزمة أيونات-بلازما" وذلك انطلاقاً من الاستجابات الخطية المنتشرة من خلال المنظومة. لقد درسنا بأسلوب عام الأنماط الانتشارية لمنظومة "حزمة أيونات-بلازما" وكذلك تبدّد حزمة الأيونات الناتج بالاضطراب. تمّ التركيز على الاستقرارية الصوتية الأيونية وبالتغيرات التي تؤثر في حزمة الأيونات حيث تبين علاقة التبدّد أنّ الحلول، وبالتالي مختلف الأنماط الانتشارية،

لا تعتمد إلا على المتغيرات T_e/T_i ، T_{ib}/T_i ، ω_p/Ω_p و $\alpha = n_b/n_0$. وقد وجدنا أن طول الموجة الموافق للنمط الأكثر تخلصاً واضطراباً (الأكثر لاستقرارية) يساوي $\lambda_M \approx 5mm$.

في إطار دراستنا تم توصيف البلازما بتقانات التشخيص التقليدية، بشكل أساسي مسابر لانغمير، كما تم تعيين وتحديد الميزات الساكنة لحزمة الأيونات باستخدام محلل طاقة إلكتروستاتيكي. إن استخدامنا لطريقة حقن أمواج الاختبار المنفردة *ondes-test solitaires* كأداة تشخيص سمح لنا بتحديد وتعريف مختلف الأنماط الانتشارية لمنظومة "حزمة أيونات-بلازما".

نفيد بالذكر أن تقانة جديدة (حديثة) ليست بالتقليدية كانت قد استخدمت في أعمال كثيرة في فيزياء البلازما كأداة تشخيص لها (قياس متحولاتها الأساسية)، وكذلك لتحليل طاقة الأيونات (قياس طاقة أيونات البلازما وأيونات الحزمة المحقونة). هذه التقانة هي تقانة الفلورة بالحث الليزري *fluorescence induite par laser* التي تعتبر أداة تشخيص فعالة جداً. هذه الطريقة في القياس تزودنا بقدرة فصل أفضل من المحلل الإلكترونياتيكي في تحديد تابع توزع الأيونات (خصوصاً قدرة الفصل بين القمتين على تابع التوزع الموافقتين لأيونات البلازما ولأيونات الحزمة). لم تتوفر لدينا تلك المنظومة التجريبية حالياً، لكنها خطوة جادة في طور البحث. فمن الضروري جداً أن تتم مقارنة النتائج التي سنحصل عليها لاحقاً باستخدام التقانة الجديدة مع نتائج بحثنا هذا الذي استخدمت فيه أدوات تشخيص تقليدية (مسابر لانغمير ومحلل طاقة إلكتروستاتيكي) وذلك لمعرفة ما إذا كان ممكناً للاستقرارية أن تنشأ خارج حدود الشروط التي حددهاها وبالتحديد الشرط السفلي $v_{beam} \leq Cs$.

المراجع:

- [1] MISHRA, M. K. ; PHUKHAN, A. ; CHAKRABORTY, M. ; GOSWAMI, K. S. *Growth of electron energies with ion beam injection in a double plasma device*. The European physical journal D, Atomic, molecular and optical physics, Volume 46, N° 2, 2007, 303-306.
- [2] WAGNER, F. ; WOBIG, H. *Magnetic confinement*. Lecture notes in physics, Plasma physics, Germany, vol. 670, 2005, 137-172.
- [3] DELCROIX J-L. ; BERS A. *Physique des plasmas*, InterEditions / CNRS Edition, France, vol. 1 & 2, 1994, vol.1-375, vol.2-499.
- [4] PHUKHAN, A. ; MISHRA, M. K. ; SAIKIA, B. K. ; CHAKRABORTY, M. *Variation of plasma parameters in a modified mode of plasma production in a double plasma device*. Pramana - journal of physics, India, Volume 74, Number 3, 2010, 399-409.
- [5] PHUKHAN, A. ; MISHRA, M. K. ; CHAKRABORTY, M. *Mechanical variations of diffused plasma parameters in a double plasma device*. Journal of physics D, Applied physics, UK, vol. 40, N° 12, 2007, 3616-3619.
- [6] SCHUMACHER, U. *Basics of plasma physics*. Lecture notes in physics, Plasma physics, Germany, vol. 670, 2005, 95-116.
- [7] MERLINO R. L. *Understanding Langmuir probe current-voltage characteristics*. American Association of Physics Teachers. USA, Vol. 75, No. 12, 2007, 1078- 1108.

- [8] BONHOMME G. ; PIERRE T. ; LECLERT G. *Ion phase space vortices in ion beam-plasma systems and their relation with the ion acoustic instability : Numerical and experimental results*, Plasma Physics and Controlled Fusion, UK, Vol. 33, N° 5, 1991, 507-520.
- [9] HONZAWA T. ; HOLLENSTEIN CH. ; VACLAVIK J. *Nonlinear mode coupling and saturation of decay instability in ion beam-plasm system*, Physics of Fluids, USA, Vol. 23, N° 5, 1980, 981-984.
- [10] SARMA A. ; BAILUNG H. ; CHUTIA J. *Characteristics of sheath instability in a double plasma device*, Physics of Plasmas, USA, Vol. 4, N° 1, 1997, 61-68.
- [11] SHERIDAN, T. E. ; YI, S. ; LONNGREN, K. *On the origin of ion acoustic soliton*, Physics of Plasmas, USA, Vol. 5, N° 9, 1998, 3165-3170.
- [12] KLOSTERMANN H. ; PIERRE TH. *Frequency modulation of the ion acoustic instability*, Physical Review E, Vol. 61, N° 6, 2000, 7034-7038.
- [13] PIEL A. ; KLOSTERMANN H. ; ROHDE A. ; JELICE N. ; SCHRITTWIESER R. W. *Ion sheath oscillations in double plasma machines*, Physics Letters A, UK, N° 216, 1996, 296-302.
- [14] KLOSTERMANN, H. ; ROHDE, A. ; PIEL, A. *Van der pol behavior of virtual anode oscillations in the sheath around a grid in a double plasma device*. Physics of Plasmas, USA, Volume 4, N°7, 1997, 2406-2412.