

Circuit haute tension

À présent que l'analyseur électrostatique et la carte de détection ont été étudiés, ce chapitre s'intéresse à l'étude des circuits haute tension qui servent à la polarisation des sphères du spectromètre et des détecteurs.

IV-1) Polarisation des détecteurs

La première étude présentée ici porte sur le circuit de polarisation des MCP, qui doit être modifié afin de pouvoir détecter alternativement des ions et des électrons.

IV-1-1. Travail à réaliser

Comme mentionné dans le troisième chapitre les détecteurs utilisés ici sont des MCP. Ces MCP sont des galettes à micro canaux qui produisent des électrons secondaires par effet d'avalanche lorsqu'une particule est détectée. Pour les besoins d'AMBRE 2 les MCP sont utilisées en « chevron » et sont polarisées avec une tension autour de 2000V pour créer l'effet avalanche.

a) Polarisation d'un stack de MCP

Un stack de MCP est composé d'une grille en entrée pour pré-accélérer les particules entrantes (avec une énergie autour de 300eV afin de maximiser l'efficacité des détecteurs, comme discuté dans le précédent chapitre), de deux MCP polarisées avec une tension de 2400V et des anodes polarisées avec une tension supérieure à celle des MCP afin de collecter tous les électrons secondaires, comme visible sur les Figure 81 et Figure 82.

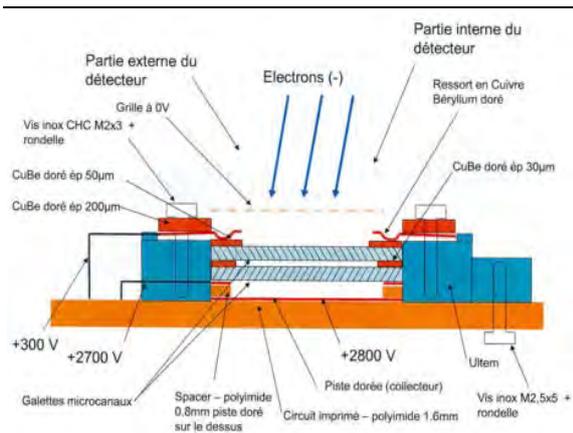


Figure 81 : Alimentation des MCP pour la détection des électrons

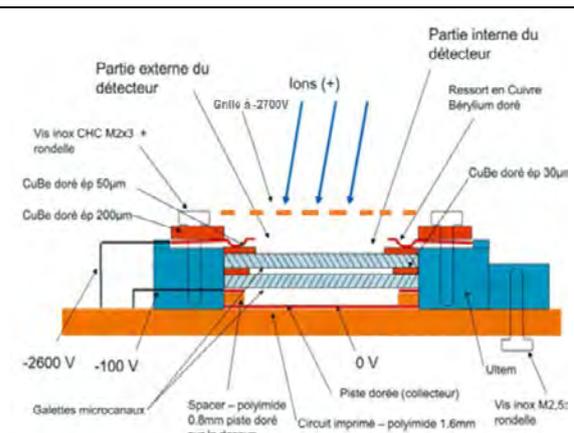


Figure 82 : Alimentation des MCP pour la détection des ions

Ces deux figures présentent l'alimentation des MCP pour la mesure des électrons (Figure 81) et des ions (Figure 82). Pour la mesure des électrons, le potentiel de la grille est à une tension nulle de façon à ne pas ralentir les électrons incidents, tandis que les MCP sont à des potentiels supérieurs pour accélérer tous les électrons et les collecter au niveau de l'anode avec un potentiel autour de 3000V. Pour la mesure des ions, la grille est à un potentiel négatif autour de -3000V (pour accélérer les particules incidentes et maximiser l'efficacité des MCP [15]) tandis que l'anode est à la masse pour la collecte des électrons secondaires.

Les différentes tensions intermédiaires (entre la grille et le collecteur) sont générées avec des diodes Zener, de telle sorte que seuls les potentiels de la grille et des anodes sont reliés à la sortie de la HT, comme illustré sur la Figure 83.

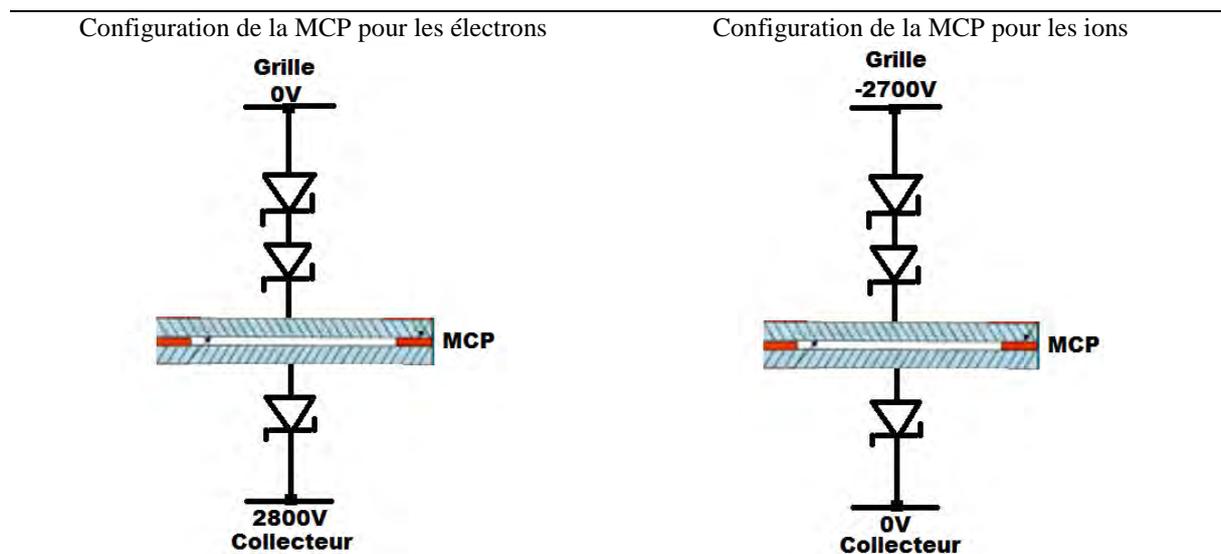


Figure 83 : Connexion des MCP avec le circuit de polarisation

L'enjeu pour la conception des circuits haute tension de AMBRE 2 consiste donc à concevoir un circuit qui permette de changer la configuration des MCP en générant en sortie une tension contrôlable et régulée autour de 3kV, qui devra soit être positive pour les électrons soit négative pour les ions.

b) Architecture des circuits haute tension à utiliser

Le travail à réaliser consiste donc à polariser les détecteurs de manière à pouvoir changer la configuration en fonction du type de particule à mesurer. Les circuits haute tension utilisés pour AMBRE 2 reprennent globalement les principes des structures utilisées pour MEA de BEPI COLOMBO et AMBRE 1, afin de pérenniser les développements réalisés à l'IRAP.

La Figure 84 illustre le principe du circuit de polarisation des détecteurs sur MEA. Celui-ci est composé, tout d'abord, d'un oscillateur à transistors qui, à partir des tensions d'alimentation continue 12V et -12V, génère une tension sinusoïdale au primaire du transformateur qui fournit en sortie une tension sinusoïdale avec une amplitude environ vingt fois supérieure à celle du primaire. Cette tension est ensuite redressée et multipliée grâce à un circuit multiplicateur composé de capacités et de diodes. La régulation de la haute tension se fait avec un régulateur PI (proportionnel intégral) qui compare une partie de la tension fournie en sortie (facteur 1 %) avec la tension de référence.

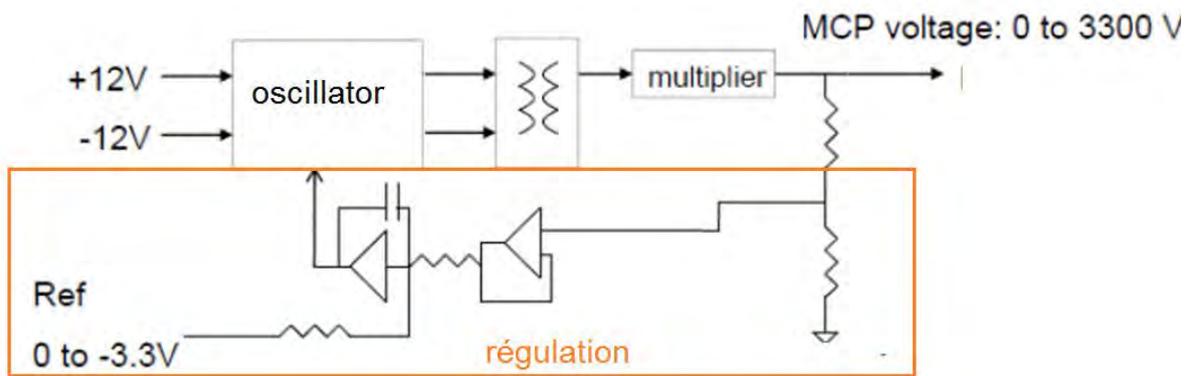


Figure 84 : synopsis du circuit utilisé pour fournir la haute tension des MCP de MEA

Le circuit présenté sur la Figure 84 est la cellule élémentaire qui sera utilisée pour la polarisation des détecteurs d'AMBRE 2. Pour la suite, la description des solutions possibles sera faite par rapport au nombre et à la configuration de ces cellules nommées « HT ».

IV-1-2. Etat de l'art des circuits de polarisation

Dans cette partie, différentes structures pour polariser les détecteurs ont été étudiées. Elles sont présentées ici, avec les résultats obtenus en simulation et les remarques associées.

a) Utilisation de deux HT référencées à la masse

Principe

Un premier circuit qui permet de réaliser la fonction désirée consiste à utiliser 2 « HT » reliées à la masse qui imposent leurs tensions aux bornes de la MCP. Parmi ces HT, l'une fournit une tension positive autour de 3000V aux anodes de la MCP lorsqu'elle est activée, tandis que l'autre fournit à la grille une tension négative autour de -3000V, comme visible sur la Figure 85. Lorsqu'une des deux HT est désactivée celle-ci présente une tension nulle, en sortie qui est appliquée soit au collecteur soit à la grille.

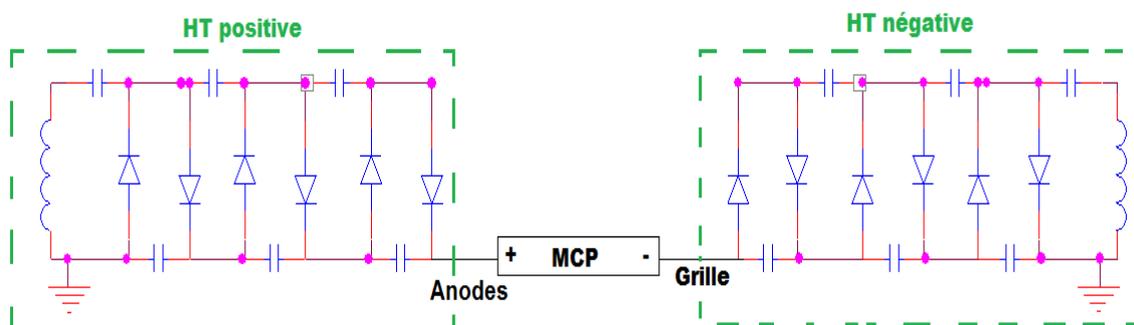


Figure 85 : Principe de la première structure

Ainsi pour la détection des électrons, la HT positive est activée tandis que la HT négative est éteinte. Alors que pour la détection des ions, les états des HT sont inversés.

Simulation avec LTspice

Les résultats de simulations sont présentés sur la Figure 86, qui montre l'évolution de la tension entre les bornes du stack de MCP (en rouge), du potentiel des anodes (en orange) et du potentiel de grille (en bleu) pour des mesures alternées entre ions et électrons. Cette solution permet bien de changer la configuration des détecteurs. Cependant, un temps mort doit être respecté entre le changement de configuration pour éviter toute surtension aux bornes des MCP.

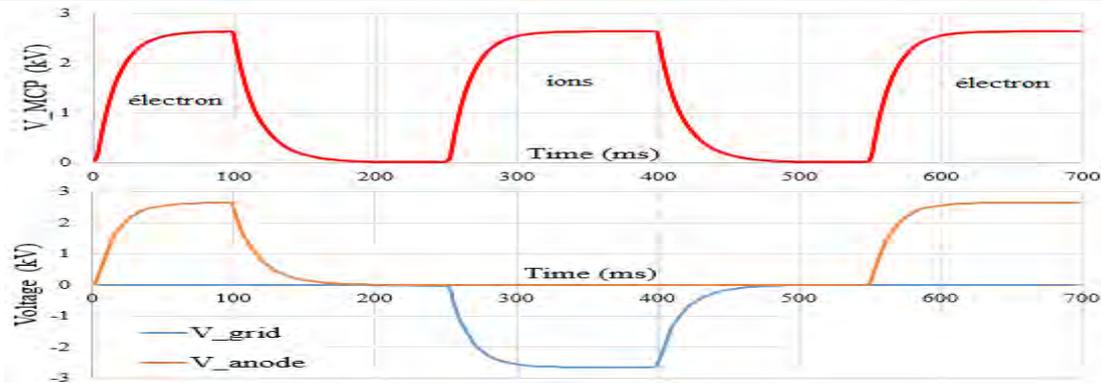


Figure 86 : Chronogramme des tensions de sortie pour la 1ère structure

Une autre limitation avec cette solution vient du fait qu'entre chaque changement de polarisation la MCP doit se décharger, puis se recharger comme visible sur la Figure 86, ce qui peut dégrader la durée de vie ainsi que les performances des MCP.

b) Utilisation d'une HT flottante

Principe

Pour cette structure, l'idée est de conserver une tension constante aux bornes de la MCP entre la mesure des ions et celles des électrons, afin d'éviter tout stress de tension pour les détecteurs. Pour cela, deux « HT » sont utilisées, une qui fournit une tension constante autour de 3000V entre les bornes du stack, tandis que l'autre HT fixe l'offset entre la grille et la masse, comme visible sur la Figure 87. En fonction de l'offset appliqué (-3kV ou 0V) la configuration des détecteurs sera soit conforme à la mesure des ions, soit à celle des électrons.

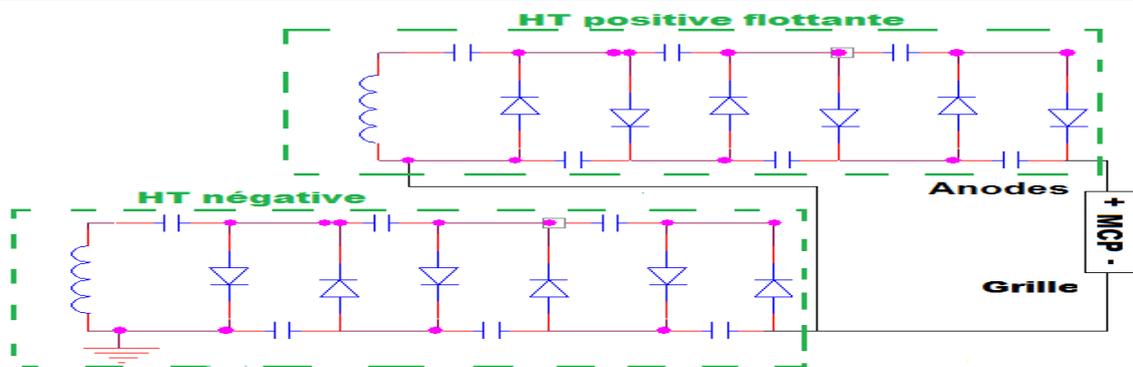


Figure 87 : Principe de fonctionnement solution 2

Pour la mesure des électrons, la HT négative est désactivée de façon à avoir un potentiel nul sur la grille et une tension positive de 3kV au niveau du collecteur. Dans le cas des ions, cette HT fournit une tension négative (égale en valeur absolue à la tension fournie par la HT flottante) de façon à avoir une tension nulle au niveau des anodes.

Simulations LTspice

Les résultats de simulations sont présentés sur la Figure 88 avec l'évolution de la tension entre les bornes du stack (en rouge), du potentiel des anodes (en orange) et du potentiel de grille (en bleu) pour des mesures alternées entre ions et électrons. Cette solution permet bien de changer la configuration des MCP avec l'avantage de conserver une tension constante entre les détecteurs. Un autre avantage pour cette solution est d'avoir une meilleure dynamique puisque contrairement à la solution précédente, il n'y a plus de risque de surtension pour les MCP.

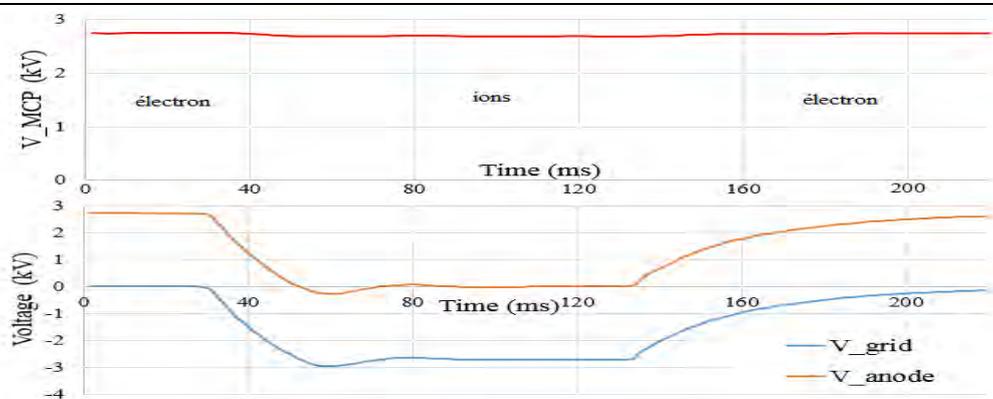


Figure 88 : Chronogramme des tensions de sorties pour la 2ème structure

Cependant, avec cette configuration un problème subsiste. A savoir le fait que, pour fonctionner, la HT flottante doit avoir un transformateur avec une tenue en tension supérieurs à 3kV entre son primaire et son secondaire tout en limitant l'encombrement du circuit.

c) Utilisation d'une HT avec masse point milieu

Principe

Enfin, la dernière solution étudiée et présentée ici consiste à n'utiliser qu'une « HT » qui délivre une tension double par rapport au cas précédent. La masse, quant à elle, est connectée à un point milieu comme visible sur la Figure 89. La sélection du type de particule à détecter se fait en fonction de l'état des switches S. Pour le cas des électrons ce sont les Switches $S1$ et $S1'$ qui sont passants, alors que pour le cas des ions ce sont les switches $S2$ et $S2'$.

Pour les simulations les switches sont considérés idéaux avec une résistance et un courant de fuite nuls.

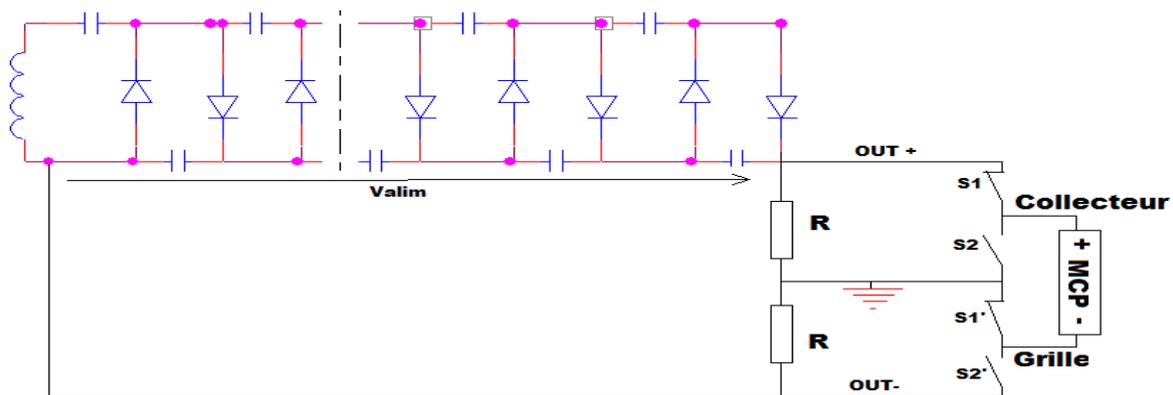


Figure 89 : principe de la troisième solution

Simulation

Lors de la simulation un déséquilibre a été mis en avant lors de l'insertion de la MCP, comme visible sur la Figure 90 où les switches S2 et S2' sont actifs. En effet les détecteurs avec leur impédance autour de 50MΩ déséquilibrent le pont diviseur à cause du courant qu'ils absorbent. Pour limiter ce déséquilibre, le courant de sortie (qui circule dans la MCP) doit être négligeable devant le courant du pont diviseur. Ceci se traduit par une diminution de la valeur des résistances R et donc par l'augmentation de la consommation.

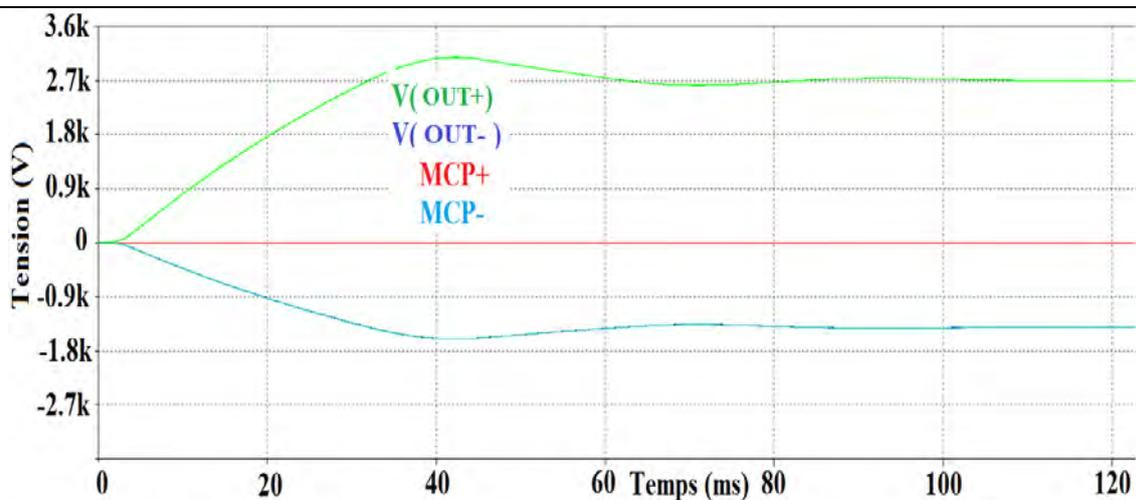


Figure 90 : Chronogramme des tensions de sortie pour la 3ème solution

En plus du problème du déséquilibre du pont diviseur, il faut savoir que les interrupteurs « hautes tensions » ne sont pas disponibles sur le marché. Seuls des optocoupleurs pourraient être utilisés mais les photodiodes (hautes tensions) présentes dans ceux-ci entraînent une chute de tension importante, ce qui ne permettrait pas de réguler la tension aux bornes de la MCP à partir de la régulation de la tension de sortie du circuit haute tension.

d) Comparatif entre les différentes solutions étudiées

Dans cette partie, un comparatif entre les trois structures est présenté afin de déterminer celle qui présentera le meilleur compromis entre encombrement, consommation et performances.

Comparaison en termes de consommation

Le Tableau 3 résume les principales caractéristiques des trois solutions étudiées précédemment. Les paramètres qui déterminent l'encombrement de chaque solution sont le nombre de « HT » utilisées ainsi que leur tension fournie (qui conditionne le nombre d'étages pour le multiplicateur) et le nombre de switches. Même si, à première vue, la troisième solution était plus intéressante de par l'utilisation d'une seule HT, l'utilisation de switches pour cette application n'est pas envisageable, puisque les composants qui s'en rapprochent le plus sont des optocoupleurs qui ont une chute de tension trop importante à leurs bornes à l'état actif. De plus, les simulations de cette structure ont montré que le pont diviseur se déstabilisait pour des faibles valeurs de R (et donc faible consommation). Le choix de la solution utilisée va donc se faire entre les deux premières structures. Au niveau de la consommation la première solution est légèrement plus intéressante que la seconde mais il faut aussi les comparer en termes de performances.

Critère	Solution 1	Solution 2	Solution 3
Nombre d'HT présente	2	2	1
Tension des HT	±3kV	±3kV	≈ 6kV
Switches	0	0	4
Nombre d'HT actives	1	1,5	1
Impédance de sortie	50MΩ	50MΩ ; 50MΩ->1GΩ	50MΩ // (2.R)
Puissance moyenne consommée	0.6W	0.75W -> 0.9W	-----

Tableau 3 : Comparatif des trois solutions pour la polarisation des détecteurs

Comparaison en termes de performances

L'étude des performances se fait sur deux critères : la dynamique et l'impact sur la durée de vie des détecteurs. Pour la première solution, les MCP sont déchargées puis rechargées entre chaque changement de polarisation, ce qui limite la dynamique du circuit puisque les MCP sont généralement montées en tension par palier de 200V pour laisser le temps de chauffer et de dégazer. De plus, l'impact d'un stress de tension continue aux bornes des MCP est méconnu, et risque de dégrader les performances ainsi que la durée de vie des détecteurs. La seconde solution, quant à elle, a pour avantage d'appliquer une tension constante aux bornes des détecteurs même lors du changement de configuration, mais l'utilisation d'une HT flottante complique la réalisation du circuit.

Après discussion au sein de l'IRAP, ainsi qu'avec le CNES et EREMS, sur le choix de la solution à utiliser pour les MCP, le critère qui s'est avéré être le plus important est la durée de vie des MCP. Pour être sûr que celles-ci ne seraient pas dégradées, la deuxième structure a été sélectionnée pour leur polarisation.

IV-1-3. Polarisation des MCP : tests sur pailleasse

Cette partie est consacrée à la réalisation de la structure présentée précédemment afin de vérifier que cette solution fonctionne et que ses performances sont cohérentes avec celles annoncées par les simulations.

a) Réalisation de la HT flottante

Problème de régulation

Lors des simulations, un premier problème est apparu lorsque la HT qui fixe l'offset est désactivée. En effet, au lieu d'avoir une tension nulle à la sortie V_{mcp-} , une haute tension négative est observée. Cette tension est générée par le courant de mesure de la tension V_{mcp+} (courant qui circule dans la résistance $R+$) et qui revient de la masse par la résistance $R-$ comme illustrée sur la Figure 91. Les résistances $R+$ et $R-$ créent un diviseur de tension qui entraîne une chute de tension entre V_{mcp-} et la masse.

Pour les simulations, la valeur de la résistance $R-$ était choisie de façon à être négligeable par rapport celle de $R+$, ce qui réduisait cette effet mais augmentait la consommation de la HT et donc limitait ses performances.

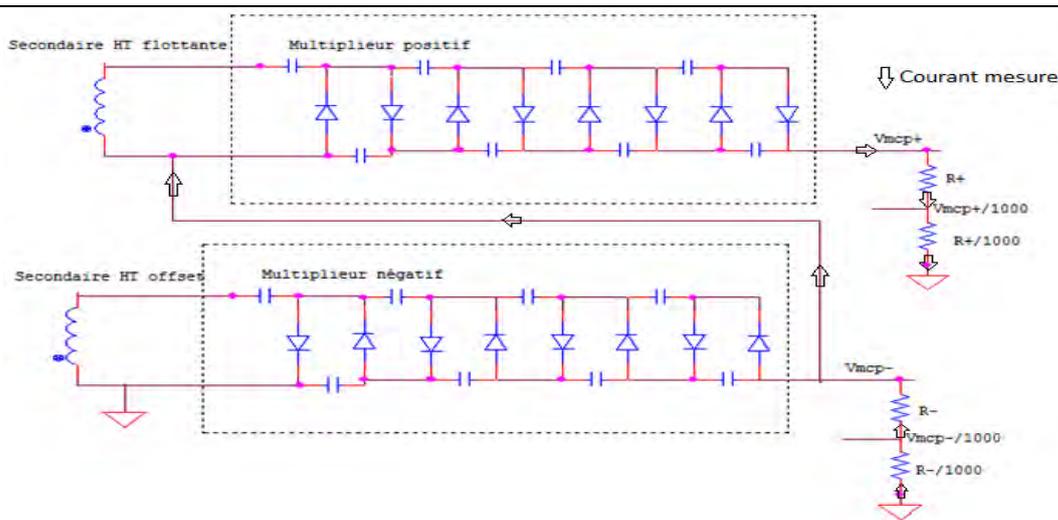


Figure 91 : schéma de l'étage de sortie avec problème de régulation

Pour corriger ce problème tout en limitant la consommation, une solution consiste à supprimer la partie du courant en sortie du multiplieur flottant qui circule jusqu'à la masse. Ceci nécessite l'utilisation d'une autre méthode pour la régulation. Une idée pour cela consiste à prélever l'image de la tension de sortie à travers le primaire du transformateur ce qui supprimera la résistance $R+$ ainsi que le courant qui la traverse (et qui est la source du problème), comme détaillé dans la suite de cette partie.

Régulation à partir du primaire

Lorsque la HT est en marche, l'oscillateur crée une tension alternative au niveau de l'inductance primaire (L_p) du transformateur, celle-ci est recopiée avec un facteur m (autour de 30) au niveau de l'inductance secondaire (L_s). Puis la tension alternative au secondaire est redressée avec un gain g (égal à 4) par le multiplieur qui fixe la tension de sortie à réguler. Il est donc possible à partir de l'amplitude crête-crête de la tension alternative du primaire d'en déduire la valeur de la tension continue en sortie.

L'idée à présent consiste à modifier le circuit précédent afin de prélever la tension crête-crête du primaire. Pour cela une capacité de découplage est insérée afin de couper la partie continue de la tension primaire et de n'avoir en sortie que la partie alternative qui nous intéresse, comme présenté sur la Figure 92.

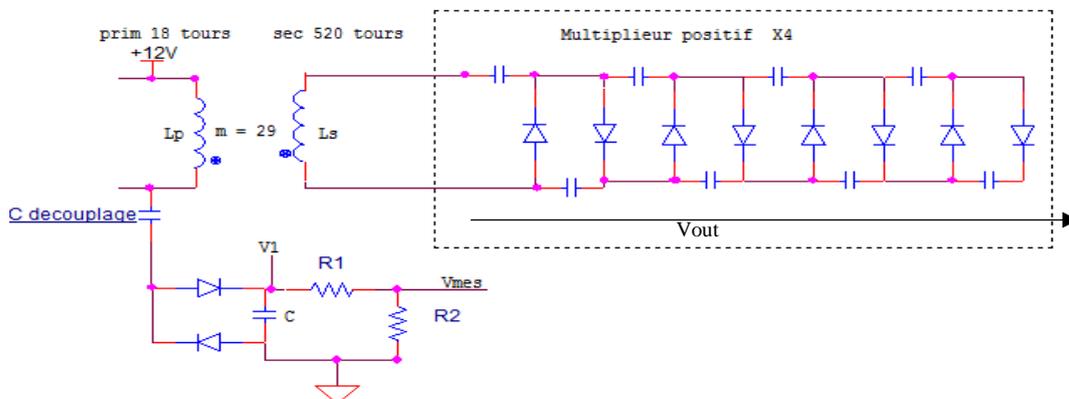


Figure 92 : schéma de prélèvement de la tension primaire

Cette tension alternative est ensuite redressée avec deux diodes et une capacité pour donner une tension $V1$ dont la valeur continue est égale à l'amplitude crête-crête du primaire. Les résistances $R1$ et $R2$ insérées entre le redresseur et le signal de sortie $Vmes$ ont deux objectifs. Elles permettent d'insérer une constante de temps RC entre la variation de $V1$ et celle de $Vmes$ qui doit être réglée de manière à avoir la même dynamique qu'en sortie de la HT. Ces résistances permettent aussi d'adapter l'amplitude de la tension $Vmes$ en divisant la tension $V1$ par 10 de façon à avoir en sortie un signal qui soit compris entre 0V et 5V.

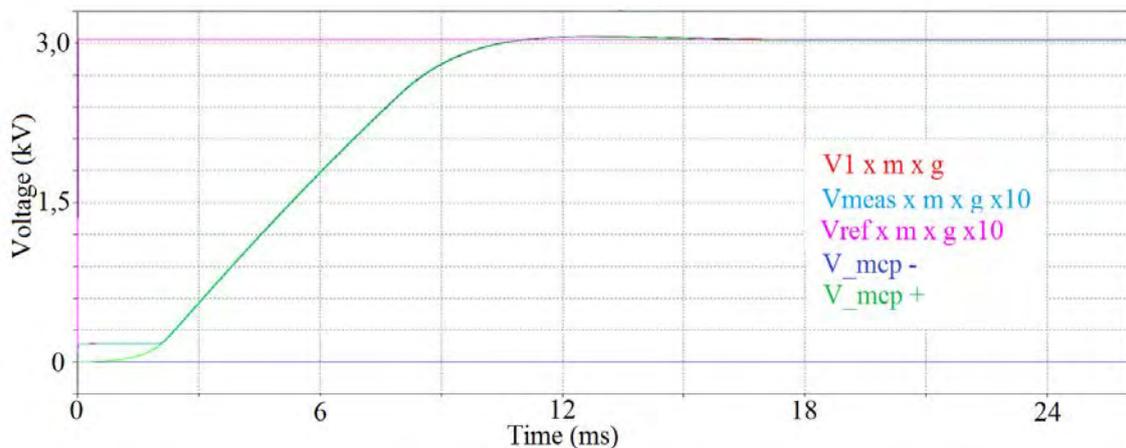


Figure 93 : Résultat de simulation avec une régulation au primaire

Les résultats présentés sur la Figure 93 montrent que la tension V_{mcp-} (bleu foncé) reste nulle, tout en ayant une régulation de la tension de sortie (tracé en vert), qui suit l'échelon de référence (tracé en mauve). L'utilisation d'une régulation au primaire permet bien de corriger le problème observé en simulation.

Remarque : Ce circuit serait identique pour réguler une tension négative en sortie. Afin d'économiser un AOP cette régulation sera utilisée pour générer la tension négative, qui sera donc fournie par la HT flottante tandis que la HT offset fournira la tension positive avec une régulation au secondaire.

Isolation DC du transformateur

Une dernière étude qui doit être réalisée pour la HT flottante porte sur l'isolation du transformateur. En effet, lors de l'activation de l'offset, une tension continue de 3000V est appliquée au niveau du secondaire du transformateur de la HT flottante. Le primaire, quant à lui, étant autour de 12V, un risque de claquage entre le primaire et le secondaire apparaît. Pour remédier à cela, une isolation importante doit être réalisée à l'intérieur du transformateur, ce qui augmente l'encombrement du système.

Une autre solution consiste à couper la composante continue de 3000V entre la tension V_{mcp-} et le transformateur à l'aide d'une capacité de découplage. Ainsi le secondaire du transformateur pourra être connecté à la masse, ce qui permettra de diminuer la taille et l'encombrement du transformateur.

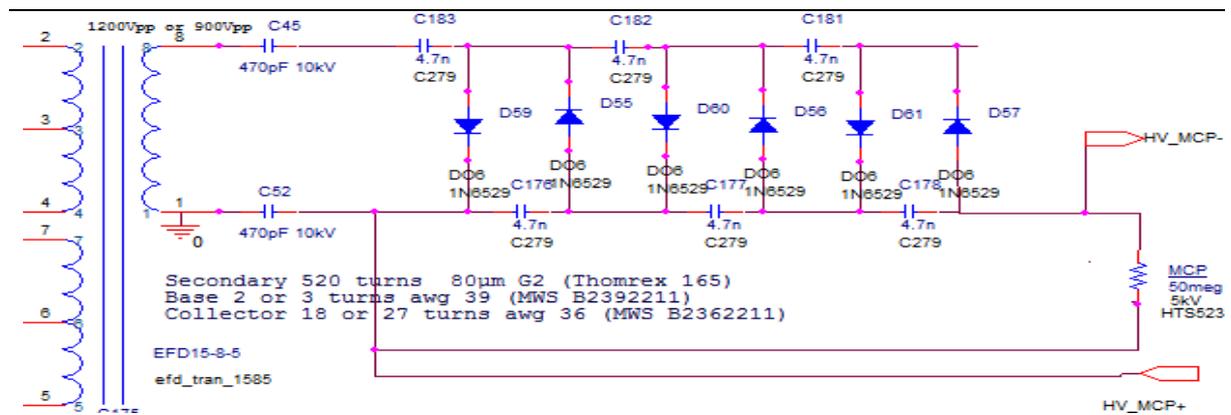


Figure 94 : Schéma finale du secondaire de la HT flottante

Le schéma modifié du secondaire de la HT flottante est présenté sur la Figure 94 avec les deux capacités de découplage.

b) Réalisation de la HT qui fixe l'offset

Pour la réalisation de la HT qui fixe l'offset, la modification qui est apportée par rapport au circuit de simulation est l'ajout d'un circuit qui permet de contrôler la dynamique de la tension de sortie lors de l'activation, comme détaillé dans ce paragraphe.

Amorçage de la HT

Le contrôle de la dynamique de la HT flottante, se fait en l'activant avec une tension de référence nulle, puis une fois que la tension de sortie est stable cette référence augmente jusqu'à atteindre la valeur souhaitée. Cependant si on veut que les tensions de référence soient fournies à partir du même DAC afin de réduire l'encombrement de la carte numérique, le circuit de la HT qui fixe l'offset doit être modifié afin de contrôler la dynamique d'amorçage. Une idée pour cela est d'utiliser le signal logique *On/Off* de la seconde HT pour déclencher la génération d'une rampe qui part de 0V jusqu'à atteindre la valeur de la tension de référence.

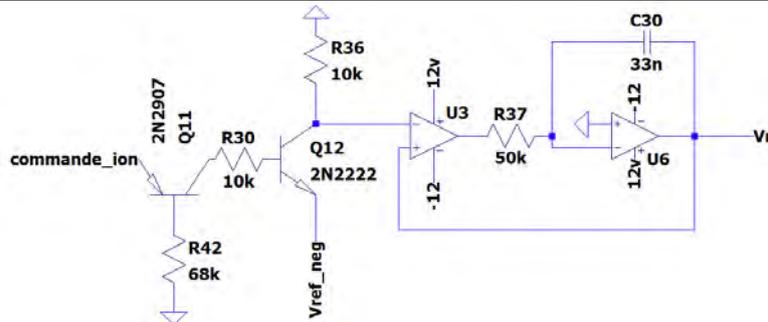


Figure 95 : Schéma du circuit de montée en rampe de la consigne

Le circuit qui permet de réaliser le contrôle de la dynamique d'amorçage est présenté sur la Figure 95 : lorsque le signal *On/Off* passe à l'état actif les transistors *Q1* et *Q2* deviennent passants et l'entrée non inverseur de l'AOP *U1* devient égale à la tension de référence, qui est négative. L'ensemble des AOP *U1* et *U2* permet de charger la capacité *C2* avec un courant constant contrôlable avec la valeur de la résistance *R4*, ce qui entraîne l'augmentation de la tension de sortie *Vr* avec une rampe jusqu'à ce qu'elle atteigne la valeur de la tension de référence.

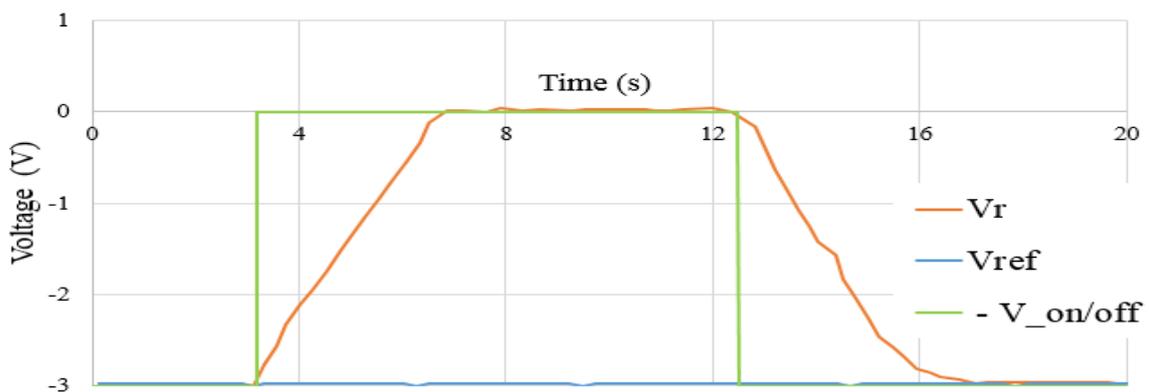


Figure 96 : Résultat après câblage du schéma de la Figure 95

La Figure 96 montre les résultats obtenus après câblage du circuit d'amorçage pour le contrôle de la dynamique de la HT qui fixe l'offset. Dans un premier temps la constante de temps pour l'augmentation de la tension de référence est fixée à 4s de façon à pouvoir arrêter la manip en cas de problème.

c) Assemblage des deux HT

A présent que le design du circuit de polarisation des détecteurs est terminé, il reste à déterminer ses performances en pratique et à vérifier que la structure fonctionne.

Mesure des tensions de sortie

Après avoir assemblé les deux hautes tensions, un test est réalisé avec une charge résistive de $50M\Omega$ simulant la présence des MCP. La tension d'offset est mesurée avec un oscilloscope relié à la masse et une sonde haute tension, tandis que la tension entre les bornes de la MCP est mesurée avec un

oscilloscope branché en flottant. Les résultats des mesures obtenues sont tracés sur la Figure 97, où les tensions $MCP+$ et $MCP-$ évoluent bien de façon à changer la configuration des MCP tout en conservant une tension constante entre ses bornes, comme visible avec la mesure tracée en rouge.

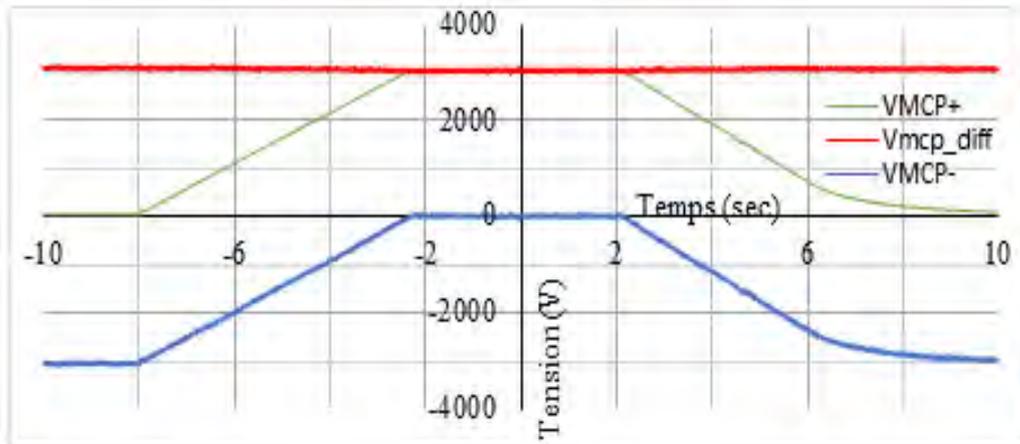


Figure 97 : Résultat obtenue pour les deux Hautes Tensions connectées

Dynamique et consommation

Le principe de fonctionnement de la HT étant validé (tension constante aux bornes de la MCP), il reste à étudier les performances de cette solution. Au niveau de la consommation, les valeurs correspondent avec celles déterminées depuis la caractéristique présentée en annexe 3, à savoir 0.62W pour la mesure des ions et 0.95W pour celle des électrons, ce qui donne une consommation moyenne de 0.8W.

Au niveau de la dynamique, il est possible d'accélérer l'amorçage de la HT qui fixe l'offset jusqu'à des temps autour de 250ms sans surtension, en réduisant la constante de temps du circuit de contrôle de l'amorçage de la HT offset. Cependant, la suppression de l'offset est plus longue à cause de la décharge du circuit RC en sortie de la HT (la résistance étant due à la régulation et la capacité au multiplieur et au filtrage) qui entraîne dans les conditions actuelles une décharge supérieure à 5s comme visible sur la Figure 98.

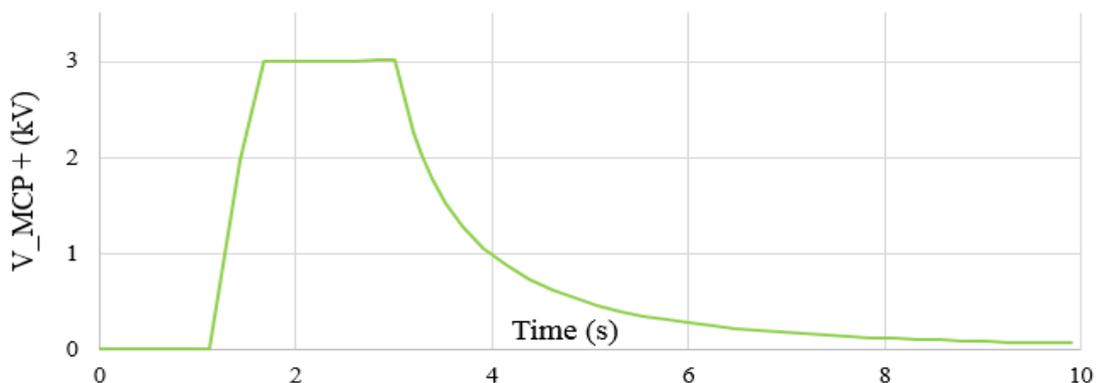


Figure 98 : Chronogramme obtenue pour un cycle ion électron

La consommation obtenue en pratique correspond à ce qui était attendu lors de la simulation. En revanche, la durée de transition est trop élevée, une solution doit être apportée pour augmenter la dynamique du circuit, c'est l'objet de la prochaine partie.

d) Modification à apporter pour la dynamique de la HT des MCPs

Afin de diminuer le temps de transition entre la mesure des ions et celle des électrons, deux solutions sont envisageables. La première consiste à réduire la résistance de charge de la HT qui fixe l'offset, de façon à diminuer la constante de temps, mais cela entraîne l'augmentation du courant statique et donc de la consommation. Une seconde solution consiste à forcer la décharge de la capacité de sortie en la court-circuitant un court instant avec un optocoupleur (seul interrupteur haute tension disponible). Lorsque l'on compare ces deux solutions, au niveau de l'encombrement la première solution est la plus intéressante puisqu'aucun composant n'est ajouté. Cependant, au niveau des performances c'est la solution avec la décharge forcée qui permet d'avoir la consommation la plus faible (en activant l'optocoupleur uniquement le temps de la décharge) et une plus grande rapidité, comme résumé dans le Tableau 4.

	Diminuer la résistance de charge	Forcer la décharge de la capacité
Consommation	0,76W (1GΩ) → 0,95W (50MΩ)	0,78W (1GΩ)
Temps de décharge	> 4s (1GΩ) → 957ms (50MΩ)	< 150ms (avec temps mort)
Ajout de composant	-----	BJT + optocoupleur + buffer

Tableau 4 : Comparatif entre les deux solutions pour réduire le temps de décharge

La solution avec l'utilisation d'un optocoupleur haute tension a été câblée pour déterminer les performances au niveau de la rapidité de décharge. Les chronogrammes mesurés sont tracés sur la Figure 99, où la décharge de la tension se trouve accélérée puisqu'elle se fait en moins de 150ms dès l'activation de la décharge.

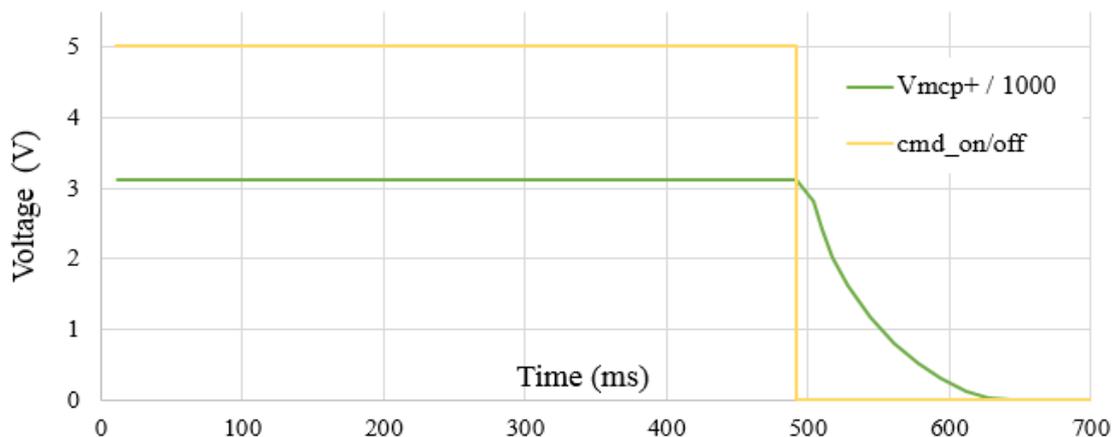


Figure 99 : Chronogramme obtenu avec la décharge forcée de l'offset

La solution de la décharge forcée est la solution choisie et sera davantage étudiée lors de la caractérisation du prototype, afin de déterminer l'impact de cette solution sur la tension flottante (cf. Chapitre V).

L'étude du circuit de polarisation des détecteurs étant réalisée et le schéma électrique défini, il reste à étudier le circuit de polarisation du spectromètre en énergie.

IV-2) Polarisation du spectromètre en énergie

L'étude présentée ici porte sur le circuit de polarisation du spectromètre qui doit être conçu de façon à sélectionner alternativement les ions et les électrons.

IV-2-1. Travail à réaliser

Comme mentionné dans le deuxième chapitre, le spectromètre en énergie utilisé pour AMBRE 2 est un analyseur électrostatique de type « top hat » qui est composé de deux hémisphères, une interne polarisée à une tension V_1 et une externe reliée à la masse électrique. Les particules entrantes dans l'analyseur voient leurs trajectoires modifiées par le champ électrique généré entre les deux hémisphères pour sélectionner en sortie seulement les particules qui ont une énergie appartenant à la gamme désirée, comme visible sur la Figure 100. Une particularité du spectromètre utilisé pour AMBRE 2 est le contrôle du taux de transmission, qui est réalisé en séparant l'hémisphère interne en deux électrodes polarisées avec des tensions contrôlées de manière indépendante.

a) Polarisation des sphères

Pour la mesure du plasma thermique il faut pouvoir mesurer des particules avec une énergie allant de quelques électronvolts à la trentaine de kilo électronvolts ce qui entraîne une plage nécessaire pour la tension de polarisation allant de 0V à une valeur proche de 3kV, en valeur absolue, en vue des performances obtenues lors du design présenté dans le second chapitre.

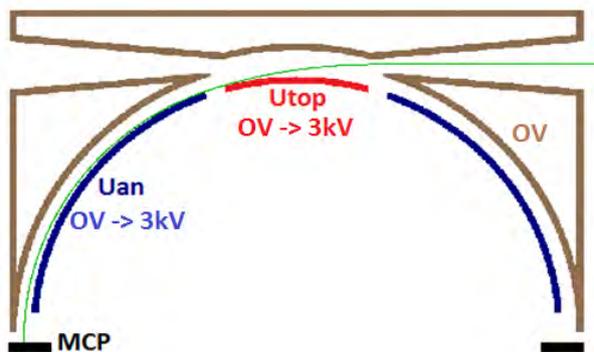


Figure 100 : Polarisation des sphères de l'analyseur pour la mesure des électrons

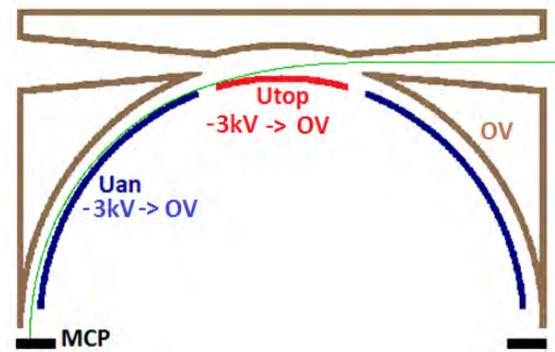


Figure 101 : Polarisation des sphères de l'analyseur pour la mesure des ions positifs

La Figure 100 et la Figure 101 montrent les plages de tensions nécessaires pour la mesure du plasma thermique avec, sur la Figure 100, la configuration pour la mesure des électrons et, sur la Figure 101, la configuration pour la mesure des ions. Pour la mesure des électrons les tensions appliquées sur les électrodes internes sont positives afin de dévier les particules incidentes en direction des MCP alors que pour la mesure des ions les tensions appliquées sont négatives. Pour le contrôle du taux de transmission de l'analyseur une seconde tension doit être générée U_{top} . Elle doit être du même signe que la tension appliquée sur l'électrode U_{an} avec une amplitude inférieure ou égale (en valeur absolue).

L'enjeu pour la conception des circuits haute tension consiste donc à fournir en sortie deux hautes tensions variables, de manière indépendante, sur une plage allant de -3kV à +3kV.

b) Architecture des circuits haute tension à utiliser

Pour cette étude, le circuit de polarisation d'AMBRE 2 est, au premier, ordre basé sur celui de MEA (BEPI COLOMBO), puis modifié afin de le rendre utilisable pour la sélection des ions et des électrons, tout en tenant compte du contrôle du taux de transmission.

Le principe du circuit de polarisation des sphères de l'analyseur est présenté sur la Figure 102, où une « HT » (composée d'un oscillateur, d'un transformateur et d'un multiplicateur) est utilisée pour générer deux tensions de bus non régulées Hv_NR+ et Hv_NR- qui sont respectivement égale à une tension supérieure à 3kV et -300V. Ces deux tensions de bus sont ensuite utilisées pour générer les tensions de l'analyseur (U_{an}) et de la calotte supérieure (U_{top}) à l'aide de quatre optocoupleurs, qui, commandés deux à deux, permettent de faire varier les tensions de sortie entre la tension min Hv_NR- et la tension max Hv_NR+ (comme visible sur la Figure 102-a).

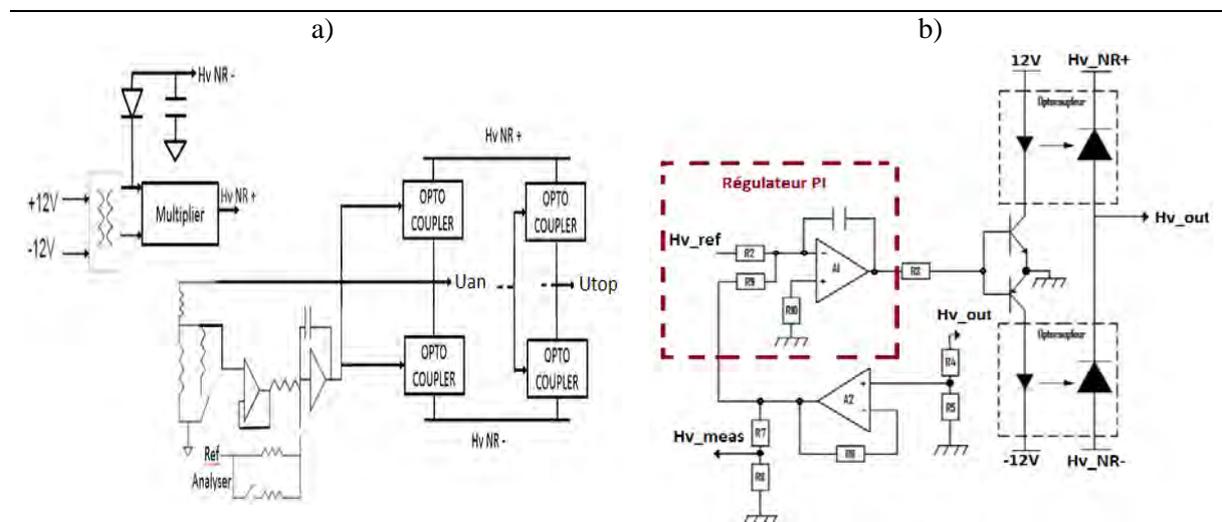


Figure 102 : Principe du circuit de polarisation de l'analyseur

La régulation des tensions de sorties se fait à travers les optocoupleurs qui imposent les niveaux de sorties. Une partie de la tension de sortie est prélevée (à travers les résistances $R4$ et $R5$) pour être comparée avec la tension de référence par un régulateur de type PI. En fonction du résultat du correcteur, les transistors bipolaires vont commander soit les diodes de l'optocoupleur proche de Hv_NR+ soit celles proches de Hv_NR- . Ceci va respectivement augmenter ou diminuer le potentiel de sortie, comme visible sur la Figure 102-b.

L'étude par la suite va consister à comparer différentes structures qui permettent d'obtenir des tensions de bus (Hv_NR+ et Hv_NR-) à des niveaux supérieurs en valeur absolue à 3000V. La régulation, quant à elle, est identique à celle présentée ci-dessus.

IV-2-2. Polarisation du spectromètre : état de l'art

Cette partie présente trois structures étudiées en simulation pour répondre aux besoins d'AMBRE 2 pour la polarisation du spectromètre afin de déterminer celle qui présente le meilleur compromis.

a) Utilisation de deux HT

Principe

La première structure présentée ici consiste à utiliser deux HT: une pour générer la tension Hv_NR+ avec une amplitude supérieure à 3000V et une pour la tension Hv_NR- avec une amplitude inférieure à -3000V. La régulation des tensions de l'analyseur et du facteur de géométrie se font comme précédemment avec des optocoupleurs sauf que, dans le cas des ions, la tension de référence en entrée du correcteur PI sera négative. La Figure 103 présente le schéma de cette structure avec les étages secondaires des 2 HT (transformateur et multiplicateur) ainsi que les optocoupleurs qui contrôlent le niveau de tension de la sortie.

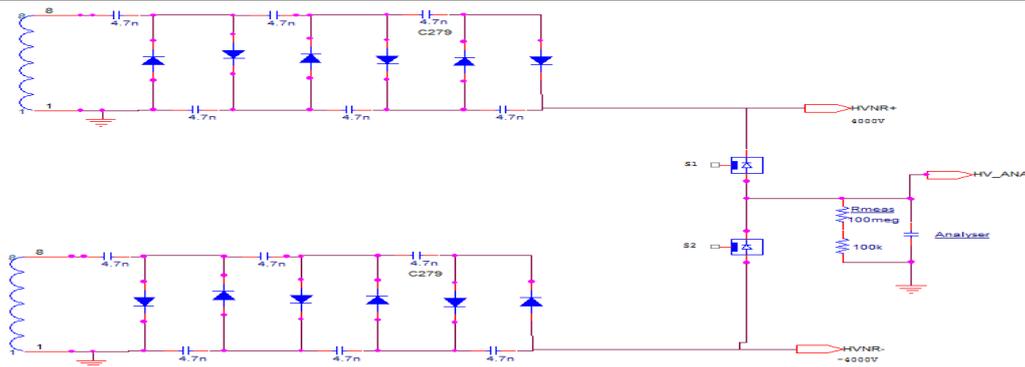


Figure 103 : Schéma de la première structure (2 HT)

Simulation

Afin de diminuer la durée de la simulation ainsi que la place occupée dans le disque dur (supérieur à 50 Go), la simulation est réalisée pour une seule tension de sortie (U_{an} représentée en rouge). Les résultats de simulation pour cette structure lors de la sélection des ions et électrons sont présentés sur les Figure 104 et Figure 105 où une variation entre -3kV et +3kV est visible pour la tension de sortie, comme désiré.

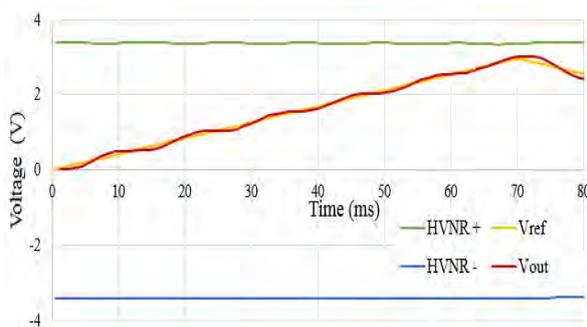


Figure 104 : Résultat de simulation pour détecter des électrons

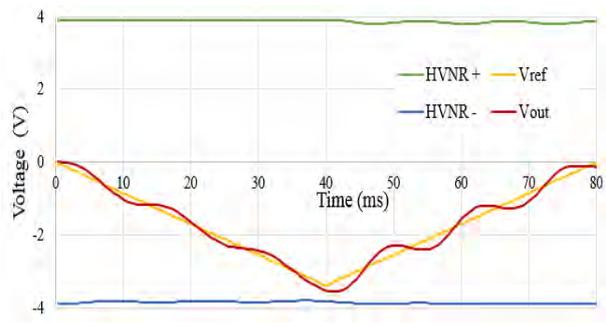


Figure 105 : Résultat de simulation pour détecter des ions

Des oscillations au niveau de la tension de sortie sont présentes, elles sont dues à la capacité utilisée en simulation pour représenter l'analyseur qui est 10 fois plus élevée que la valeur en pratique, ainsi que du modèle utilisé pour les optocoupleurs où aucune résistance n'est prise en compte. En pratique, ces oscillations ne sont pas visibles.

Les tensions U_{an} et U_{top} étant toujours de même signe, il est possible d'activer une seule HT à chaque instant, ce qui permet de diminuer la consommation.

b) Utilisation d'une HT avec masse point milieu

Principe

L'idée de cette structure est de n'utiliser qu'une seule HT qui délivre une tension double par rapport au cas précédent. De façon à avoir une tension positive et négative, un pont diviseur est utilisé, dont la tension milieu est reliée à la masse, comme présenté sur la Figure 106 (où les tensions de bus Hv_NR+ et Hv_NR- sont reliées aux deux extrémités du multiplieur). Le principe de régulation est le même que précédemment.

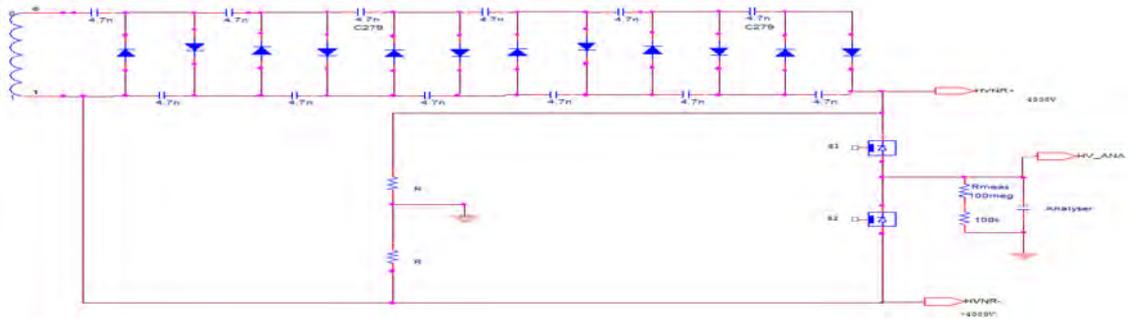


Figure 106 : Schéma de la deuxième structure (point milieu)

Simulation

Les résultats de simulation obtenus pour les ions et les électrons sont tracés sur les Figure 107 et Figure 108, où les tensions Hv_NR+ et Hv_NR- présentent de grosses variations (supérieures à 4kV). Ces variations sont dues au courant de sortie qui déséquilibre le pont diviseur. Ceci fait osciller le point milieu qui est connecté à la masse. Ces variations deviennent gênantes lorsque les tensions de bus deviennent inférieures (en valeur absolue) à la tension de sortie désirée, qui n'est plus atteignable. Ces observations sont similaires à celles faites lors l'étude de la solution avec pont diviseur pour la polarisation des détecteurs.

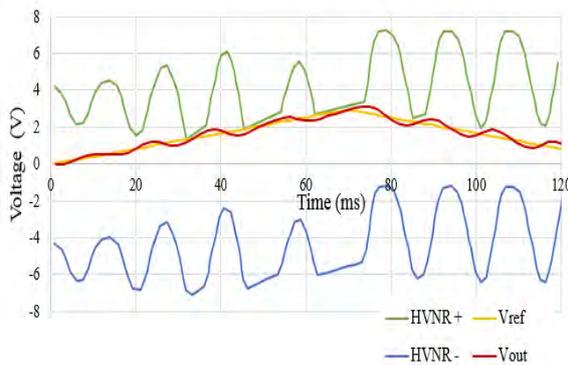


Figure 107 : Résultat de simulation dans le cas des électrons

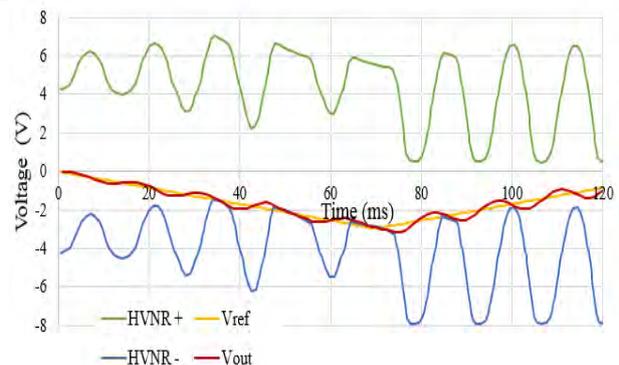


Figure 108 : Résultat de simulation pour le cas des ions

Pour diminuer les variations des tensions de bus, la valeur des résistances R (du pont diviseur) doit être diminuée mais cette diminution entraîne une augmentation de la consommation, ainsi que la baisse du gain du multiplieur à cause de l'augmentation du courant de sortie. Pour compenser cette baisse de gain, les tailles du transformateur et du multiplieur devront donc être augmentées.

c) Utilisation d'une HT flottante

Principe

Le principe de cette dernière structure consiste à n'utiliser qu'une HT qui délivre une tension proche de 3kV, dont les niveaux des tensions Hv_NR+ et Hv_NR- sont flottants et varient en fonction de l'état des optocoupleurs qui forment le point milieu où est connectée la masse, comme visible sur la Figure 109-a. Ainsi la plage disponible de 3kV suit la tension de référence de façon à avoir une plage disponible en sortie de 6kV centrée sur 0V.

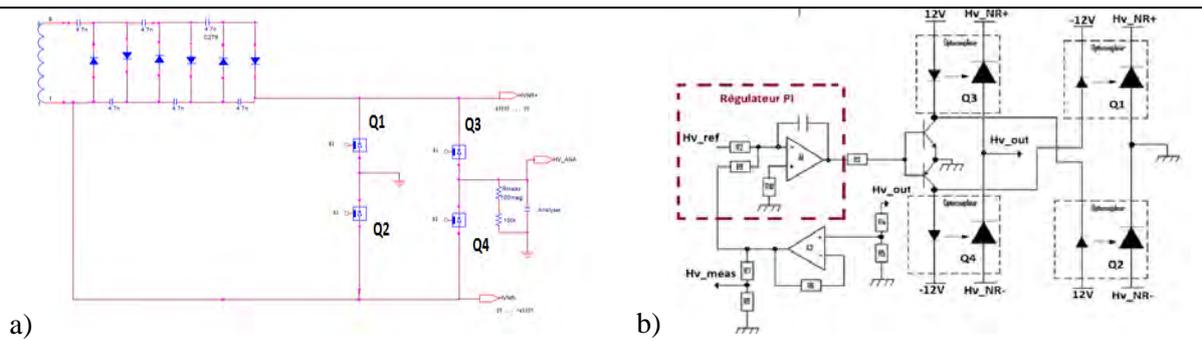


Figure 109 : Schéma de la troisième structure (flottante)

Lorsque la consigne est supérieure à la tension de sortie, le correcteur met en conduction le transistor NPN qui active les optocoupleurs Q3 et Q2. Ceci entraîne la diminution de la tension entre Hv_NR- et la masse, ainsi qu'entre Hv_NR+ et la sortie, sa tension va donc croître. Et inversement lorsque la tension de sortie est supérieure à la consigne le correcteur met en conduction le transistor PNP qui active les optocoupleurs Q1 et Q4, ce qui entraîne la diminution de la tension de sortie.

Simulation

Les résultats de simulations obtenus respectivement pour les ions et les électrons sont tracés sur les Figure 110 et Figure 111, où les tensions de bus Hv_NR+ et Hv_NR- suivent la tension de référence, comme prévu lors de la conception. Ceci permet avec une seule HT de 4kV d'avoir une plage de tension en sortie comprise entre -4kV et 4kV.

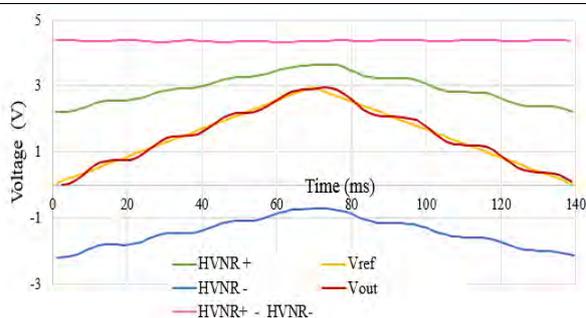


Figure 110 : Résultat de simulation pour la mesure des électrons

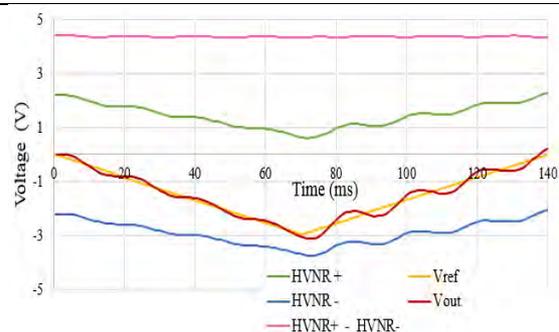


Figure 111 : Résultat de simulation pour la mesure des ions

Cette solution utilise deux optocoupleurs de plus, ce qui augmente l'encombrement, même si celui-ci est limité en utilisant le même circuit de commande pour les optocoupleurs Q1 et Q4, ainsi que Q3 et

Q2, comme visible sur la Figure 109-b. L'augmentation de l'encombrement dû aux optocoupleurs supplémentaires reste inférieur à l'ajout d'une HT.

La HT étant flottante, des capacités de découplage devront être insérées pour éviter le claquage entre le primaire et le secondaire du transformateur (primaire relié au 12V / secondaire relié à Hv_{NR-}).

d) Comparatif des solutions de HT pour l'analyseur

Dans cette partie, une étude comparative entre les trois structures présentées précédemment est réalisée afin de déterminer celle qui présente le plus faible encombrement avec une consommation minimale.

Comparaison de l'encombrement

Le Tableau 5 ci-dessous résume les principales caractéristiques des trois solutions étudiées précédemment. Les paramètres qui déterminent l'encombrement de chaque solution sont le nombre de HT utilisées, leur tension fournie (qui conditionne le nombre d'étages pour le multiplieur ainsi que la tenue en tension nécessaire pour les optocoupleurs) et le nombre de switches à utiliser. La deuxième structure est la moins intéressante à cause de la tension à fournir en sortie, qui est deux fois plus importante qu'avec les autres solutions, ainsi que la présence des résistances haute tension qui sont encombrantes (davantage que les optocoupleurs). La solution la moins volumineuse est la troisième, qui n'utilise qu'une HT contrairement à la première solution et n'utilise qu'une tension de $\approx 4\text{kV}$ qui nécessite des optocoupleurs avec une tenue en tension plus faible et donc plus compacte qu'avec les autres solutions.

	Solution 1	Solution 2	Solution 3
Nombre de HT utilisée	2	1	1
Tension en sortie des HT	$\approx 4\text{kV}$ (chacun)	$\approx 8\text{kV}$	$\approx 4\text{kV}$
Nombre d'optocoupleurs	4	4	6
Nombre de HT active	2/1	1	1
Consommation (pour $I_{out} = 75\mu\text{A}$)	0.96W	1.76W	0.75W

Tableau 5 : Comparatif entre les trois structures possibles pour la polarisation de l'analyseur

Comparaison des performances

La consommation déterminée en simulation pour un même courant est présentée dans le tableau ci-dessus, la deuxième solution est celle qui consomme le plus, cela est dû en partie au pont diviseur qui entraîne des pertes statiques. De plus, le fait d'avoir une tension double entraîne un rendement plus faible et une diminution du gain des multiplieurs. La première structure présente une consommation légèrement supérieure à celle de la dernière structure, à condition qu'une seule HT soit activée à la fois, ce qui nécessite d'avoir deux transformateurs et deux oscillateurs (ce qui augmente l'encombrement).

L'étude en simulation a permis d'étudier le principe de trois solutions possibles pour que l'analyseur puisse sélectionner des ions et des électrons. Deux seulement semblent raisonnables au vue de la forte consommation de la deuxième structure. Du point de vue de l'encombrement et de la consommation, la dernière structure est la plus intéressante. La consommation de la polarisation des MCP étant déjà autour de 0.8 W, la solution qui est choisie ici est celle qui présente la consommation la plus faible, c'est-à-dire la dernière solution. Il faut savoir toutefois que cette solution présente des inconvénients. Les six optocoupleurs sont des composants chers et sensibles. En particulier, ils sont sensibles aux radiations induisant un risque de diminution de la durée de la mission.

IV-2-3. Polarisation du spectromètre : réalisation sur paillasse

Une fois la structure avec les six optocoupleurs validée en simulation, celle-ci a été câblée afin de valider son bon fonctionnement en pratique et de mesurer ses performances, notamment en termes de rapidité, avec comme charge une capacité de faible valeur (autour de 10 pF).

Pour valider le fonctionnement, un premier test est réalisé avec comme signal de référence, un triangle d'amplitude 3V de façon à avoir en sortie un signal variant sur toute la plage [-3 kV ; +3 kV]. La mesure faite à l'oscilloscope est présentée sur la Figure 112, où la tension de sortie (bleu) suit bien la tension de référence (vert). La tension délivrée par la HT est tracée en jaune, ce qui montre une tension constante d'amplitude 3,2 kV, ce qui valide le fonctionnement du circuit puisqu'il permet de générer en sortie un signal variant entre 3 kV et -3 kV à partir d'une HT de 3,2 kV.

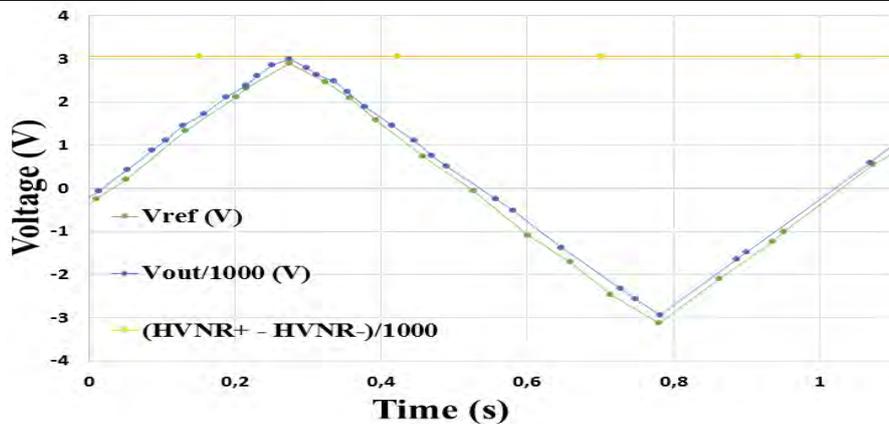


Figure 112 : mesure de la tension délivrée en sortie de la HT analyseur pour un signal triangulaire

Afin de déterminer les caractéristiques dynamiques de ce circuit, un second test est réalisé avec comme signal d'entrée un carré d'amplitude crête-crête de 6 V. Les résultats obtenus sont tracés sur la Figure 113, où un temps de charge et de décharge de 15 ms est nécessaire pour passer de -3 kV à +3 kV.

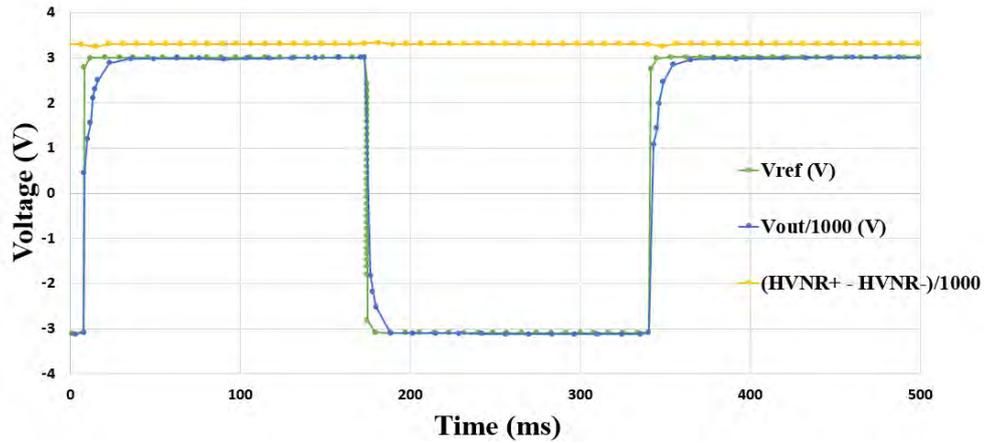


Figure 113 : mesure de la tension délivrée en sortie de la HT analyseur pour un signal carré

Il est possible de réduire ce temps de 15 ms en augmentant la tension en sortie de la HT, mais cela entraîne une augmentation de la consommation. Il faut noter qu'après la réalisation du prototype, la rapidité sera adaptée de façon à avoir un bon compromis entre consommation et performances.

L'étude des circuits de polarisation étant terminée, le prochain chapitre traite de la réalisation du prototype AMBRE 2.0 avec les différentes études qui sont réalisées pour optimiser les performances de l'instrument.

