

**Composition de Physique et Sciences de l'Ingénieur, Filière MP (X)****Présentation du sujet**

Le sujet proposé cette année comprend trois parties indépendantes permettant d'étudier l'effet piézo-électrique et deux de ses applications courantes. La première concerne l'analyse d'un modèle simple permettant de rendre compte du comportement piézo-électrique d'un matériau. La seconde porte sur l'étude d'un transformateur de tension électrique mettant en œuvre l'effet piézo-électrique. Enfin, la troisième partie s'intéresse au principe d'un oscillateur électrique à quartz.

La première partie propose de modéliser le comportement d'un élément piézo-électrique par une étude électrostatique puis mécanique d'un élément piézo-électrique. L'objectif est d'aboutir à un modèle électrocinétique de l'élément piézo-électrique. Le couplage électromécanique est modélisé par un transformateur parfait dont on doit déterminer le rapport de transformation. Ce modèle nécessite la définition, l'expression analytique, de l'impédance mécanique du système masse-ressort ainsi que la capacité électrique de l'élément piézo-électrique.

La seconde partie porte sur l'analyse d'un modèle électrique de deux éléments piézo-électriques en interaction. Dans un premier temps on considère un fonctionnement à vide de ce système et on propose de déterminer, par une étude fréquentielle, les composants présents dans ce modèle (composants R, L et C). Dans un deuxième temps, une analyse en charge du transformateur est demandée en modélisant l'ensemble des éléments du modèle électrique dont la charge a été ramenée au primaire du transformateur. Cette deuxième partie se termine par une analyse du point de fonctionnement d'une lampe fluorescente à cathode froide alimentée par un transformateur piézo-électrique.

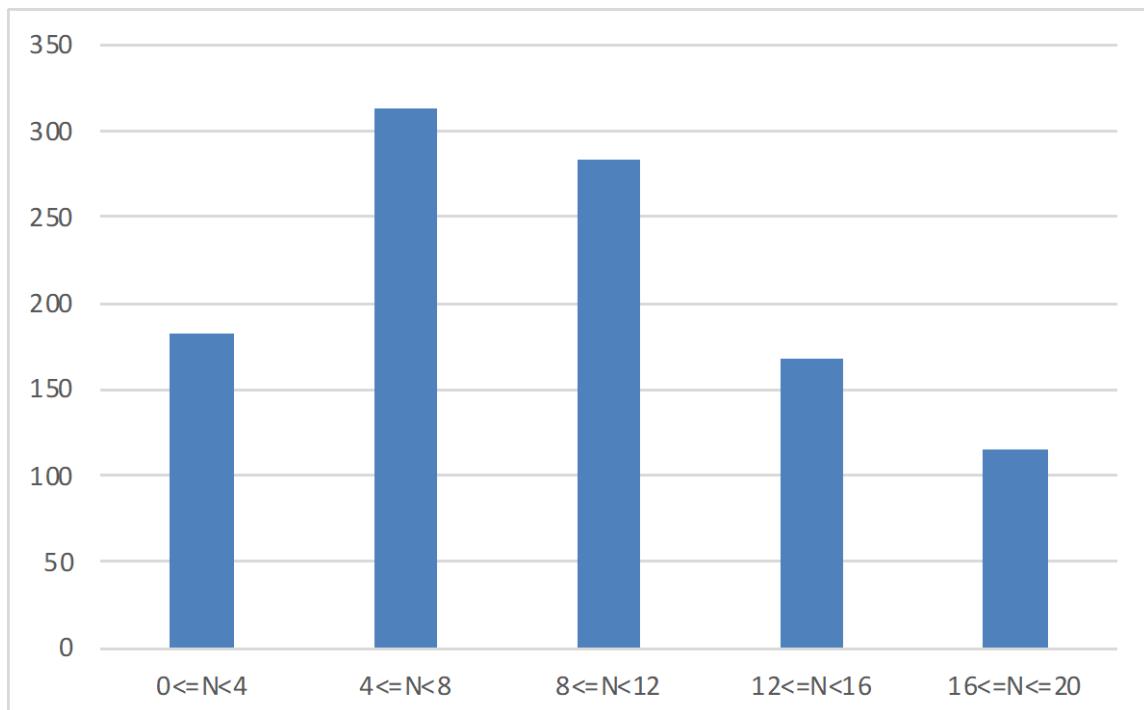
La troisième partie porte sur l'étude d'un oscillateur électrique à l'aide d'un élément piézo-électrique. Cet oscillateur est formé par un élément piézo-électrique intégré dans un filtre formant la chaîne de retour d'un système bouclé. Comme dans la partie 2, il s'agit dans cette partie d'identifier l'ensemble des impédances du modèle électrique équivalent de l'oscillateur et de déterminer, par une analyse fréquentielle, la pulsation d'oscillation du système bouclé.

**Résultats des candidats**

La moyenne des 649 candidats français est de 9,77/20 avec un écart-type de 5,01

La moyenne des 413 candidats étrangers est de 6,16/20 avec un écart-type de 4,44.

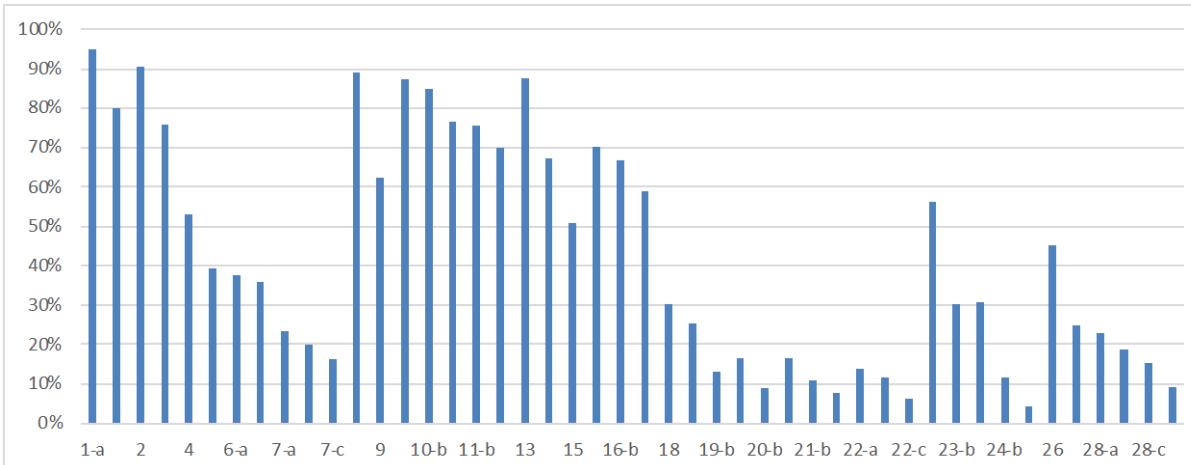
**Tableau 1 : Statistique relative à l'épreuve P & SI filière MP**



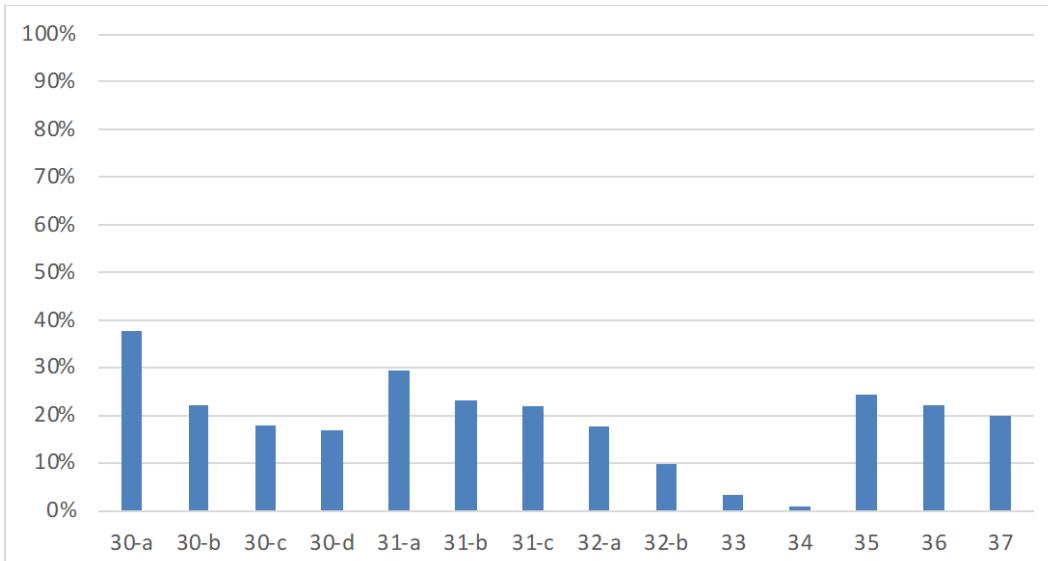
**Figure 1 : Statistique des résultats des candidats de l'épreuve par intervalle de notes**

Les figures 2a, 2b et 2c illustrent la fraction de candidats ayant abordé chaque question, respectivement pour les trois parties.

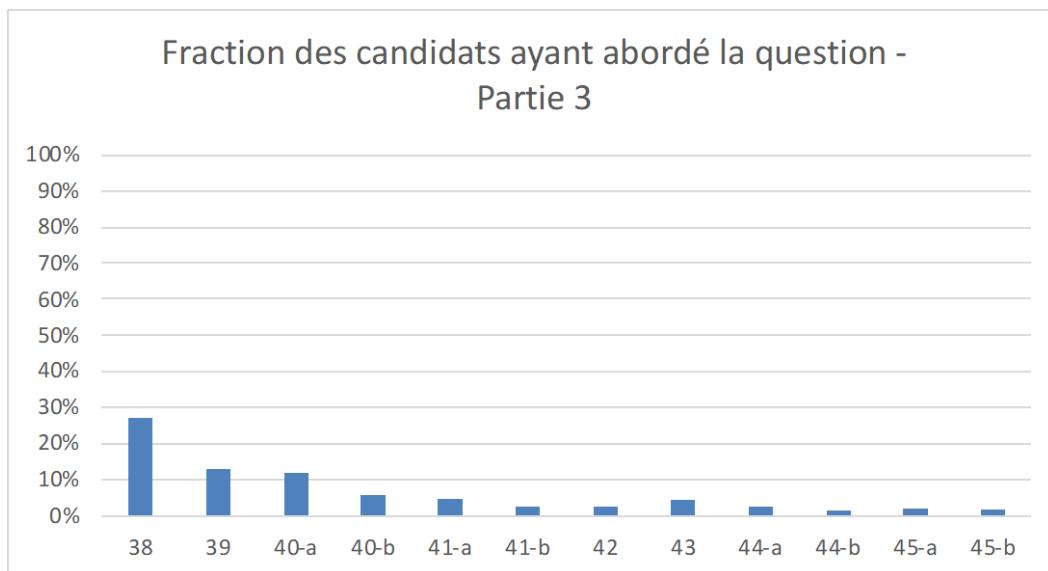
On voit assez clairement que les parties 2 et 3 ont été nettement moins abordées que la première partie. Ce sont pourtant ces 2 dernières parties qui ont permis de départager les meilleurs candidats. Ceci peut s'expliquer par le fait que la première partie comporte un nombre de questions largement plus élevé que les 2 autres, 29 questions contre 8 pour les deuxièmes et troisièmes parties. Les 2/3 de la première partie du sujet ont été abordées dans son intégralité par la majorité des candidats. Les questions de la 2<sup>ème</sup> partie portant sur une analyse qualitative des résultats n'ont été que très peu traitées, questions 33, 34 par exemple. On regrettera que les questions nécessitant des qualités d'analyse aient été significativement moins abordées que celles plus strictement calculatoires. Lorsqu'elles ont été abordées, elles ont été assez mal traitées, comme la question 21 par exemple. La troisième partie a été initiée par une minorité de candidats.



**Figure 2a : Fraction des candidats ayant abordé chaque question – Partie 1**

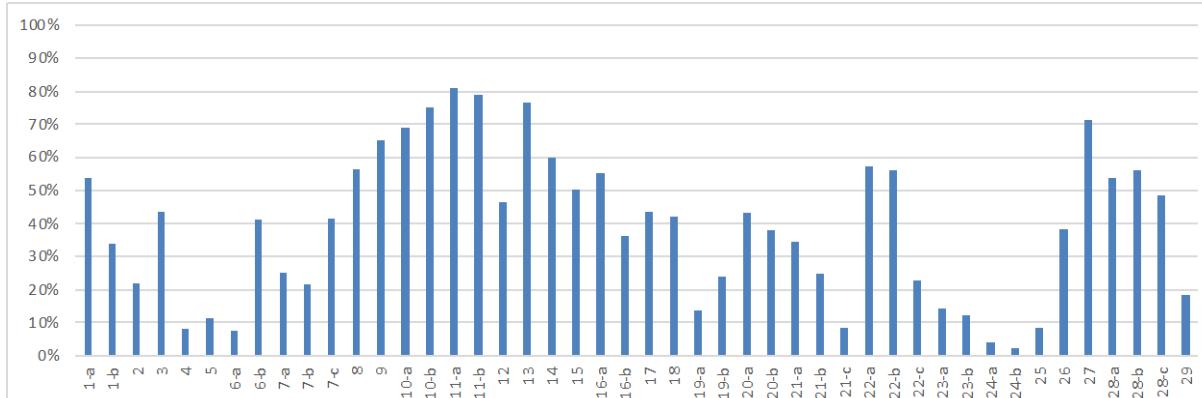


**Figure 2b : Fraction des candidats ayant abordé chaque question – Partie 2**

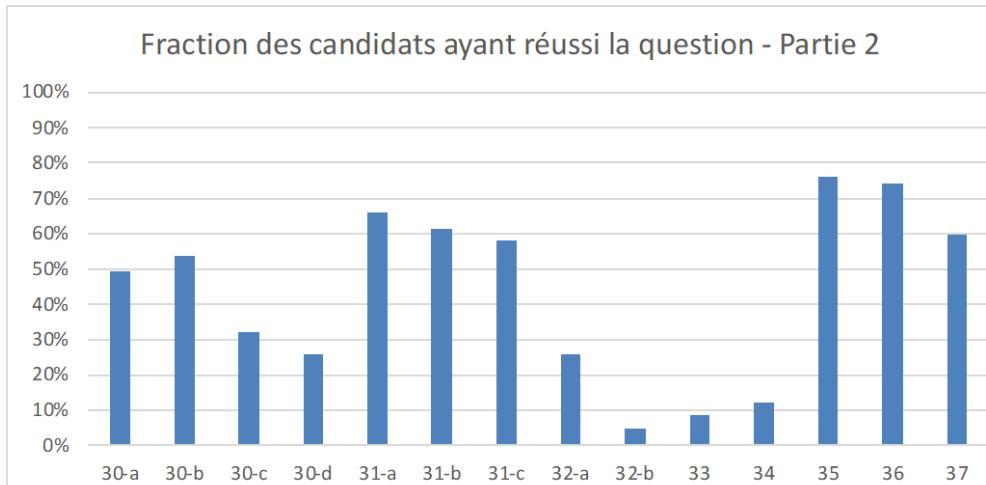


**Figure 2c : Fraction des candidats ayant abordé chaque question – Partie 3**

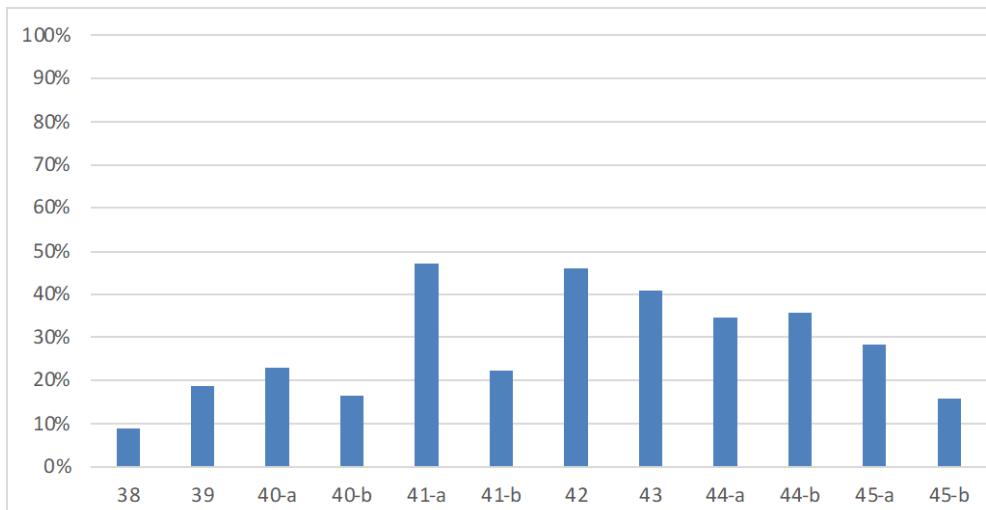
Les figures 3a, 3b et 3c indiquent le taux de réussite des candidats à chaque question, respectivement pour les trois parties. Une question est considérée comme réussie lorsque qu'il lui a été attribué au moins la moitié des points. Certaines questions ont été réussies par une grande partie des candidats, mais elles n'ont pas véritablement fait la différence sur la notation finale, notamment à propos de la partie 1.



**Figure 3a : Fraction des candidats ayant réussi chaque question – Partie 1**



**Figure 3b : Fraction des candidats ayant réussi chaque question – Partie 2**



**Figure 3c : Fraction des candidats ayant réussi chaque question – Partie 3**

Les taux de réussite bas des questions nécessitant une explication physique des phénomènes s'illustrent par la difficulté des candidats à clarifier leur réflexion scientifique par écrit. On observe bien souvent des réponses confuses ne répondant que partiellement à l'ensemble des questions posées.

Nous attirons l'attention des futurs candidats sur l'importance des applications numériques. Celles-ci étaient assez simples pour être effectuées sans calculatrice. Elles ont toutefois fait perdre des points à une bonne partie des candidats. Il est rappelé qu'une valeur numérique d'une grandeur physique doit être obligatoirement suivie d'une unité, sans quoi le résultat est considéré comme faux.

Rappelons que chaque sous-question d'une question numérotée est évaluée séparément. Bon nombre de candidats ne répondent pas à l'intégralité des items mentionnés dans une question. Enfin, nous attirons l'attention des futurs candidats sur l'importance d'essayer de traiter les dernières questions de chaque partie qui sont souvent indépendantes des résultats précédents et qui font bien souvent la différence parmi les candidats.

Retenant les termes des rapports des années précédentes, nous souhaitons insister à nouveau sur l'importance de la qualité de la rédaction (précision, concision et propreté) dans l'appréciation d'une copie. Un raisonnement clair, concis et bien exprimé a bénéficié d'une évaluation plus favorable que la simple écriture du résultat, même juste.

## **Partie 1 : Étude du comportement d'un milieu piézo-électrique**

### **Partie 1.1 : Modélisation du comportement électromécanique d'un élément piézo-électrique.**

Cette partie comprend 7 questions dont la plupart sont fortement liées. Les questions portent sur un modèle électromécanique d'une maille cristalline. Sur la base de l'analyse des résultats obtenus sur l'ensemble des 7 questions, cette partie semble avoir été difficile pour les candidats.

La première question est une question purement de compréhension des phénomènes physiques en jeu dans cette maille cristalline représentée par une association de ressorts. Même si elle a été traitée par la majorité des candidats, seule la moitié a bien répondu. Les questions 2 et 3 portent sur l'expression de la force et du moment dipolaire électrique dans la situation d'équilibre. En général, les candidats ayant bien répondu à la question 2 ont également bien réussi la question 3 même si on observe sur cette dernière un nombre plus important de bonnes réponses.

Les questions 4 et 5 portent sur un élément piézo-électrique formé par un assemblage de mailles élémentaires en situation d'équilibre mais avec une contrainte mécanique appliquée à son extrémité. La difficulté de compréhension par les candidats du modèle ainsi formé fait que ces deux questions n'ont que faiblement été traitées. Le taux de réussite est inférieur à 10%.

La question 6 est une question de compréhension des phénomènes physiques en jeu dans un élément piézo-électrique à l'échelle mésoscopique. Cette question a été très mal traitée comme l'est ce type de question qui demande de la réflexion, du recul sur ce que les candidats sont en train d'étudier.

La question 7 découlant des questions 2 et 3, les candidats ayant bien répondu à ces questions ont bien répondu à la question 7.

## **Partie 1.2 : Étude électrostatique**

Cette partie comporte 4 questions, sûrement la partie la mieux réussie par les candidats. Dans cette partie, l'élément piézo-électrique est relié à un générateur de tension et il est demandé aux candidats d'établir, par les équations de Maxwell, les expressions du champ électrique et du potentiel en fonction de la capacité électrique. Les résultats incorrects sont dus en général à des erreurs de signe suite à une mauvaise manipulation de l'équation de Maxwell-Gauss. Ces 4 questions ont été bien traitées par la majorité des candidats.

## **Partie 1.3 : Étude mécanique**

Cette partie comporte 11 questions.

Les questions 12, 13, 14 n'ont pas posé de grosses difficultés même si un certain nombre d'étudiants n'ont pas vu que le coefficient «  $c$  » était au carré à la question 12. Dans ces questions, il s'agissait juste d'appliquer le principe fondamental de la dynamique à un élément piézo-électrique (à une tranche élémentaire du milieu) sachant que le sujet précisé la forme de l'équation à obtenir. Il fallait également justifier de la forme des solutions de cette équation. Les étudiants ayant traité ces 3 questions ont dans l'ensemble bien répondu.

Les questions 15, 16 et 17 concernent l'étude du régime sans charge mécanique. La question 15 est une question de raisonnement, seuls 50% des candidats ont traité cette question mais celles et ceux qui l'ont abordée ont bien répondu.

Les questions 16 et 17 sont fortement liées et concernent la façon dont vibre le milieu en caractérisant le nombre d'onde et la pulsation pour un mode  $q$ . Ces deux questions n'ont bien été traitées que par une minorité de candidats. Pour la question 17, seuls les étudiants ayant bien compris comment caractériser les modes propres de vibration mécanique en régime libre ont pu tracer correctement ces deux fonctions (les deux premiers modes de vibration). Les correcteurs ont été attentifs à ce que les axes soient bien référencés et que les deux fonctions  $f_1$  et  $f_2$  soient clairement identifiées.

Les 5 dernières questions de cette partie portent toujours sur l'étude du régime libre mais cette fois une charge mécanique inertielle est positionnée à son extrémité. Ces questions de fin de partie ont été traitées par une minorité de candidats avec de très faibles taux de bonnes réponses. Cela donne un poids particulièrement important pour ces questions dans le classement final des candidats. La plupart de ces questions sont des questions de compréhension, d'analyse et des interprétations graphiques. Outre le fait que les étudiants n'ont pas compris comment se comporte l'élément piézo-électrique soumis à un contrainte extérieure, les mauvais résultats s'expliquent aussi par des arguments ou explications trop souvent confus, peu précis ou mal exprimés.

## **Partie 1.4 : Adaptation de la modélisation à un cadre pratique**

Cette partie comporte 7 questions.

Moins de 10% des étudiants ont bien répondu aux questions 23, 24 et 25 qui sont fortement liées entre elle. Il fallait comprendre ici comment d'un point de vue énergétique, l'élément piézo-électrique peut être équivalent à un modèle « discret » masse-ressort pour le premier mode. Il est évident que si la question 23 n'est pas comprise, il est impossible aux étudiants de répondre aux 2 questions suivantes.

Les questions suivantes, même si elles sont basées sur le même modèle que précédemment, peuvent être traitées à part. Très peu d'étudiants s'en sont rendus compte et les candidats qui ont traité ces questions ont plutôt, pour une majorité d'entre eux, bien réussi, ce qui peut faire la différence dans le classement final. Les questions 26 et 27 étaient des questions fondamentales pour pouvoir aborder les 2 dernières questions de cette partie. On note que la question 29, qui est une question de compréhension, est celle qui a posé le plus de problème.

## **Partie 2 : Application de l'effet piézo-électrique à la transformation de tension**

### **Partie 2.1 : Détermination des éléments du schéma équivalent**

Il s'agit, dans cette partie, de déterminer la valeur des composants du schéma équivalent de deux éléments piézo-électriques en interaction formant un transformateur non chargé dans un premier temps. A la question 30, il fallait savoir interpréter un diagramme de Bode et de Nyquist pour déterminer la valeur de la résistance, des condensateurs et de l'inductance. A la grande surprise des correcteurs, très peu d'étudiants ont traité cette question.

### **Partie 2.2 : Analyse du comportement du transformateur en charge**

Dans cette partie, le transformateur est maintenant en charge. Il s'agit de déterminer les relations entre composants lorsqu'on ramène toute la charge au primaire du transformateur. Le schéma est donné, il suffit à la question 31 de déterminer les nouvelles valeurs de R et C en s'appuyant sur les lois d'un transformateur parfait. Peu de candidats ont traité cette question mais une majorité de celles et ceux qui ont essayé d'y répondre, ont bien réussi.

Les 3 questions qui suivent concernent l'étude d'un circuit RLC en série (étude de la résonance et de la puissance maximale transmise à la charge). Moins de 20% des candidats ont abordé cette partie, surprenant car les questions n'étaient pas forcément très difficiles. Ceci peut être dû par le manque de connaissance des candidats dans ce domaine de l'électricité.

### **Partie 2.3 : Alimentation d'une lampe fluorescente à cathode froide par un transformateur piézo-électrique**

3 questions sont posées pour clore cette partie 2, Les questions 35, 36 et 37 concernent l'étude du point de fonctionnement lorsque la charge est une lampe fluorescente à cathode froide. Il s'agit d'une analyse graphique basée sur un diagramme tension/fréquence. Très peu de candidats ont abordé ces questions mais celles et ceux qui les ont traitées ont généralement bien réussi, ce qui peut faire la différence dans le classement final. Il est rappelé aux candidats que, même s'il n'est pas demandé une grande précision sur les courbes, il est nécessaire d'avoir des axes avec les bons noms et les bonnes unités, ainsi qu'une explication rapide de la position de chaque point de fonctionnement pour avoir la totalité des points. Les questions suivent un ordre logique qui va de l'étude du graphe tension/fréquence de la lampe éteinte jusqu'à son point de fonctionnement nominal.

## **Partie 3 : Oscillateur électrique utilisant un élément piézo-électrique**

Cette partie est composée de 8 questions. Cette fin de sujet n'a pas été réussie pour une bonne partie des candidats pour essentiellement 2 raisons, (i) car peu de candidats sont allés jusqu'au bout par manque de temps sûrement et (ii), les candidats ayant répondu, ont majoritairement mal répondu.

La question 38 concerne la relation liant l'entrée et la sortie d'un système formé par un amplificateur et un filtre. Les candidats n'ayant pas réussi sont ceux qui ne maîtrisent pas les lois de base de l'électricité.

Même constat pour la question 39, le modèle de Thévenin permettait d'obtenir rapidement le résultat. Très peu l'ont vu.

Pour la question 40, il fallait penser à la condition de bouclage pour caractériser le régime libre. Même constat, peu de candidats ont pensé à cette condition et n'ont donc pas pu aboutir au bon résultat.

Les questions 41, 42 et 43 même si elles semblent liées, elles peuvent être traitées de manière indépendante. Ces questions permettaient de caractériser l'impédance  $Z_3$ .

Les deux dernières questions portent sur le quartz et la pulsation du système bouclé par une étude graphique. Seuls 2% des candidats ont traité ces deux questions pour un taux de réussite inférieur à 30%.