

## Composition de Physique et Sciences de l'Ingénieur, Filière MP (X)

### Présentation du sujet

Le sujet proposé cette année comprend trois parties permettant d'étudier les propriétés électriques des matériaux semi-conducteurs. La première partie porte principalement sur la caractérisation électrique des semi-conducteurs à l'équilibre thermodynamique. La seconde concerne l'étude de la diode et sa jonction PN et enfin, la troisième partie s'intéresse au principe physique du transistor bipolaire.

La première partie se focalise sur les notions de bandes d'énergie et de concentration des porteurs à l'équilibre, électrons et trous. L'effet du dopage est considéré en comparant, de manière qualitative puis quantitative, un semi-conducteur sans impuretés avec un semi-conducteur présentant des impuretés de type D, donneur d'électrons.

La seconde partie porte sur l'analyse d'une diode à jonction PN et plus particulièrement sur la zone de charge d'espace située entre les deux zones dopées N et P. Dans un premier temps, on considère une jonction PN à l'équilibre, non soumise à une différence de potentiel. A l'aide d'une étude électrostatique, l'objectif est d'établir les relations en champ et en potentiel de cette jonction. Puis, le phénomène de diffusion particulière est étudié pour aboutir finalement à la création de la zone de charge d'espace par équilibre des phénomènes de diffusion et de conduction. Enfin, la caractéristique courant/tension est abordée en considérant le semi-conducteur soumis à une différence de potentiel.

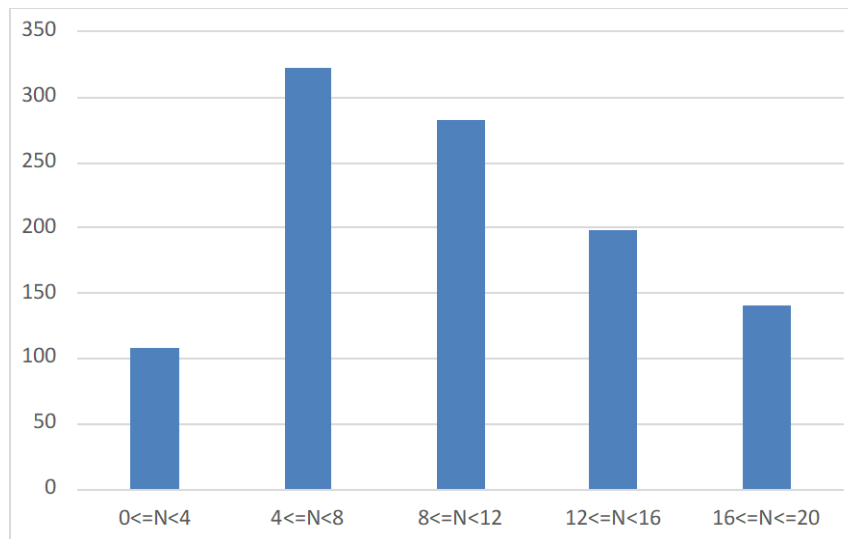
La troisième partie concerne le transistor bipolaire NPN composé de deux diodes placées tête-bêche et fait donc suite à la partie précédente. L'objectif de cette dernière partie est d'étudier sa structure amplificatrice de tension élémentaire. Le gain en courant, le schéma électronique pour la polarisation du transistor, le régime dynamique autour d'un point de fonctionnement sont étudiés. Cette partie se termine par une étude de la dérive thermique du transistor en régime statique.

### Résultats des candidats

Pour les 1071 candidats présents :

La moyenne des 685 candidats français s'établit à 10,12, avec un écart-type de 4,99

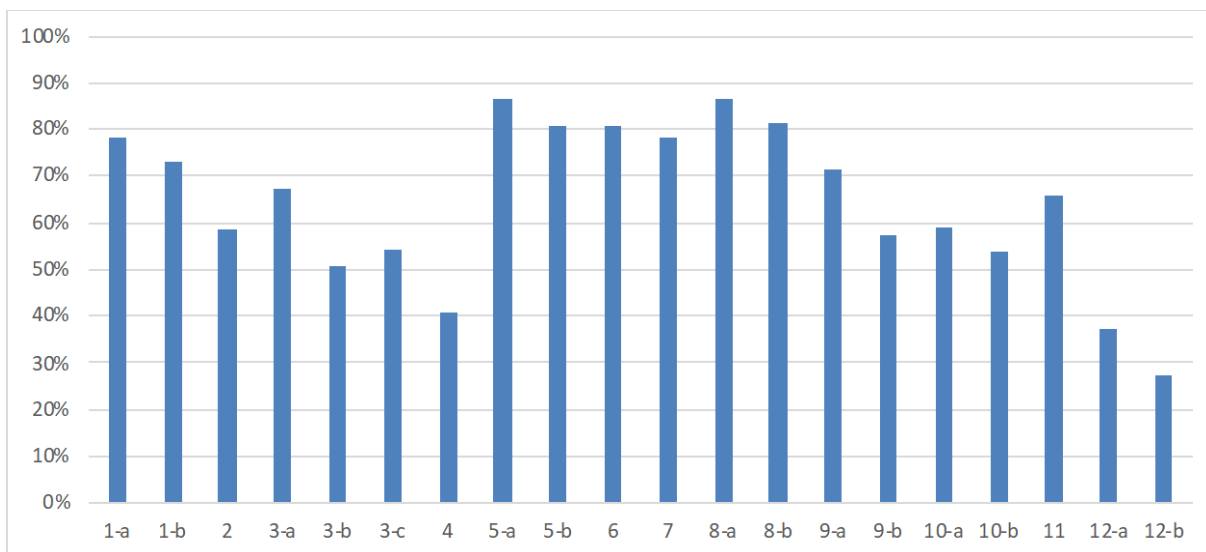
La moyenne des 386 candidats de nationalité étrangère est de 7,58 avec un écart-type de 4,78.



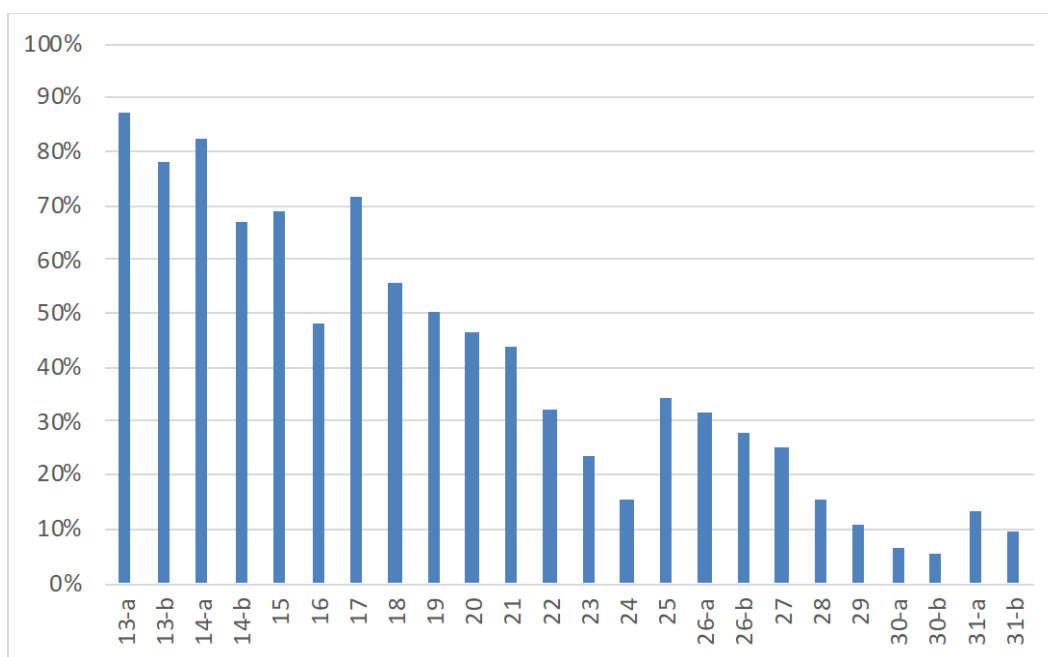
**Figure 1 : Statistiques des résultats des candidats de l'épreuve par intervalle de notes**

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, à part les premières questions de la partie 2. Ce sont pourtant ces 2 dernières parties qui ont permis de départager les meilleurs candidats. Pour la partie 1, mise à part la dernière question, toutes les questions ont été abordées par la majorité des candidats. C'est une partie avec un faible nombre de questions, elle comportait seulement 12 questions contrairement aux parties 2 et 3.

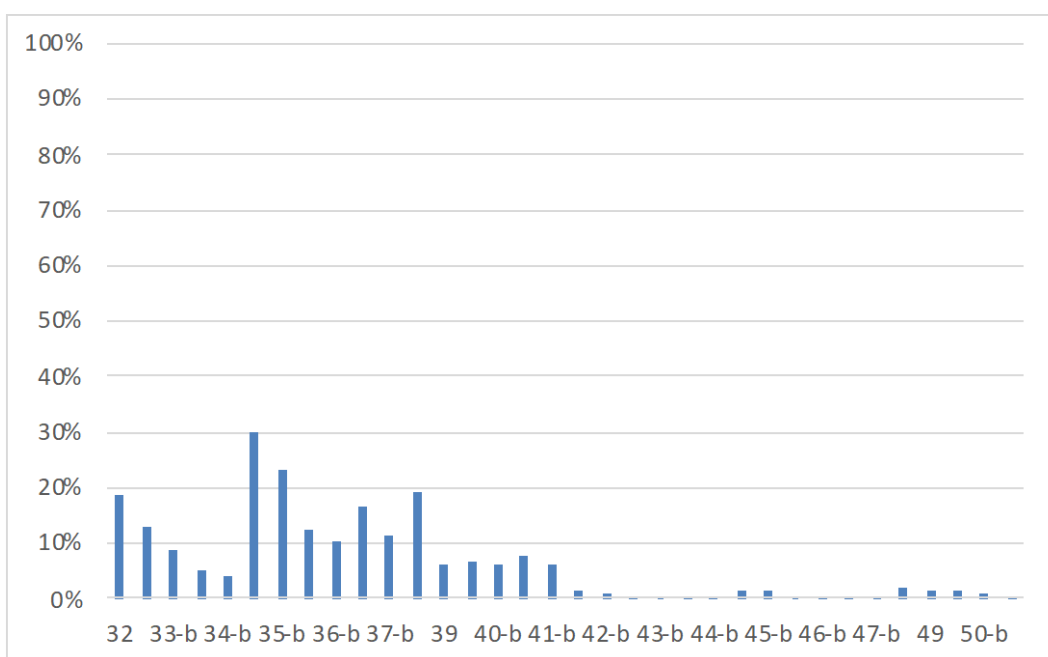
On regrettera que les questions nécessitant des qualités d'analyse aient été significativement moins abordées que celles plus strictement calculatoires. Lorsqu'elles ont été abordées, elles ont été assez mal traitées, comme la question 1a par exemple qui a été traitée par 80% des candidats mais seuls 10% des candidats y ont répondu correctement. La troisième partie a été abordée par une minorité de candidats.



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

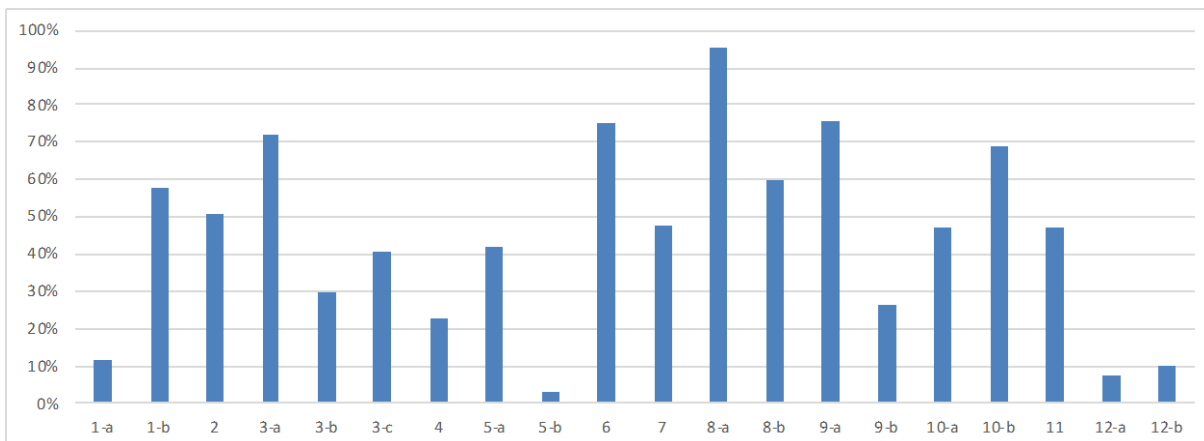


**Figure 2b : Fraction des candidats ayant abordé chaque question – Partie 2**

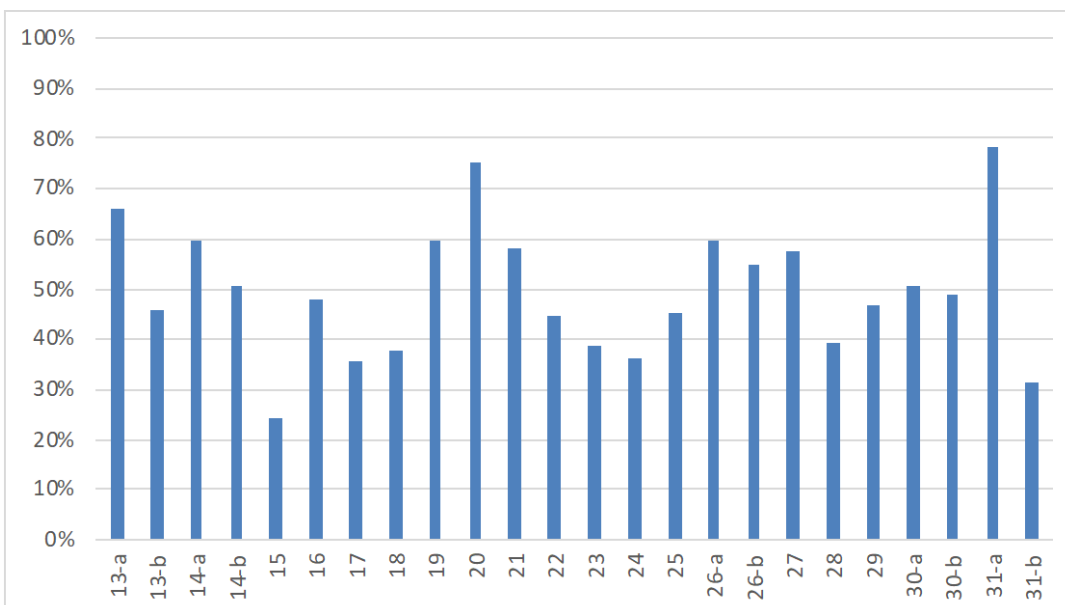


**Figure 2c : Fraction des candidats ayant abordé chaque question – Partie 3**

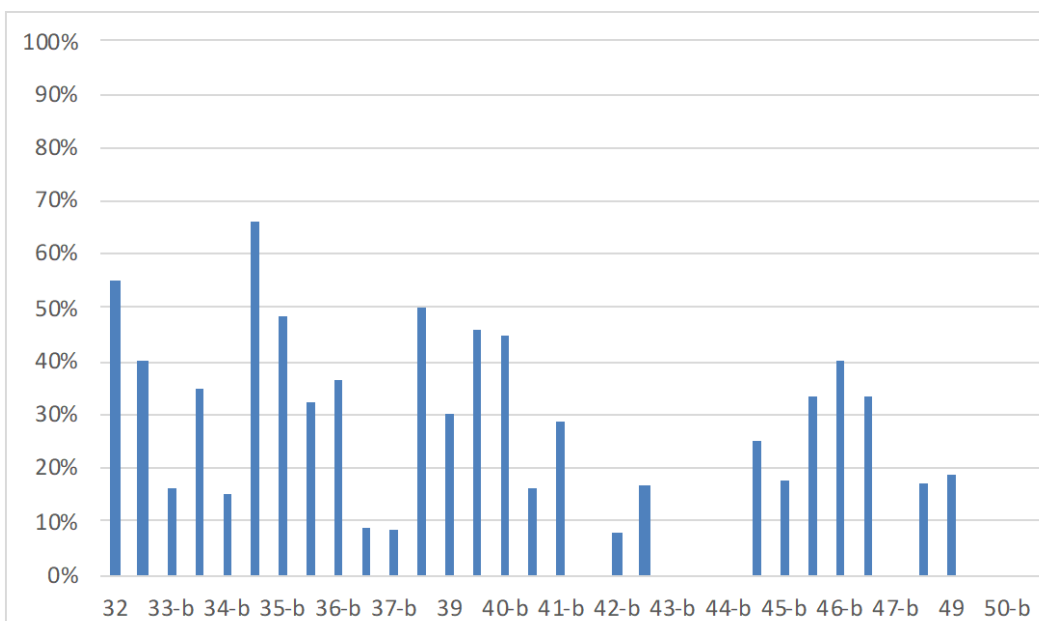
Les figures 3a, 3b et 3c indiquent le taux de réussite des candidats à chaque question, respectivement pour les trois parties. Une question est considérée comme réussie lorsqu'il lui a été attribué au moins la moitié des points. Certaines questions ont été réussies par une grande partie des candidats,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



**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 illustrent la difficulté qu'ont de nombreux 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.

Reprenant 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 : Propriétés électriques d'un semi-conducteur**

### **Partie 1.1 : Aspects qualitatifs**

Cette partie comprend 4 questions, la plupart nécessitant une explication physique des phénomènes, comme son nom l'indique. A part la question 2, cette première partie semble avoir été difficile pour les candidats et conforte le fait que ce sont souvent les questions de ce type qui pose problème. Par exemple, la question 3 portait sur une analyse d'un tracé qualitatif de concentration de porteurs en fonction d'un paramètre. La figure 3a montre qu'une minorité a réussi à interpréter correctement le graphe alors qu'aucune démonstration ou résolution d'équation n'était demandée.

La première question est une question purement de compréhension des phénomènes physiques en jeu dans un semi-conducteur. Il fallait exprimer la largeur de la bande interdite et discuter de cette relation. Même si elle a été traitée par la majorité des candidats, seule la moitié y a bien répondu. A la question 2, il fallait donner une estimation du nombre d'atomes de semi-conducteur par unité de volume. Il s'agit pour les candidats d'avoir en tête des ordres de grandeurs pour éviter d'écrire des valeurs qui n'ont pas de réalité physique. Sur la base de la question 3 et de son analyse, la question 4 demande un peu de culture générale pour essayer de donner une application simple d'un semi-conducteur intrinsèque. Seuls 20% des candidats ont donné une réponse correcte.

### **Partie 1.2 : Modélisation et caractérisation d'un semi-conducteur**

Cette partie comporte 8 questions, sûrement la partie la mieux réussie par les candidats. Il s'agit d'étudier les concentrations d'électrons et de trous dans les bandes de conduction et de valence. Comme indiqué sur la figure 3a, c'est la question 5 qui a posé de grosses difficultés aux candidats, où il était demandé de représenter sur un graphique le nombre moyen d'électrons occupant un état d'énergie  $E$ . Le jury rappelle qu'un tracé doit être réalisé proprement, sans oublier d'indiquer le nom des axes et les bonnes unités des grandeurs physiques représentées. A la question 6, un nombre trop important de candidats s'est lancé dans la résolution de l'expression demandée alors que l'énoncé précisait simplement de donner l'expression sous forme d'une intégrale, une perte de temps non négligeable. Les autres questions ont été

relativement bien traitées par une majorité de candidats, seule la dernière question semble avoir posé des difficultés. Il s'agissait d'exprimer le rapport des concentrations des charges et de commenter le résultat. La question n'était pas difficile mais seul un petit nombre l'a abordée.

## **Partie 2 : Étude de la diode PN**

### **Partie 2.1 : Jonction PN à l'équilibre**

#### **Section 2.1.1 Étude Electrostatique**

Cette partie comporte 4 questions. Plus de 50% des candidats ont traité l'ensemble des questions, cf. figure 2b.

La question 13 a plutôt bien réussi aux candidats, il s'agissait d'exprimer le champ électrique en fonction de l'abscisse  $X$ . La plupart des erreurs est liée aux erreurs de signe concernant le côté P et le côté N. La seule difficulté de cette question est l'interprétation du résultat obtenu, malheureusement la plupart du temps, les candidats occultent volontairement ce type de question qui peut faire la différence dans les classements finaux. Il s'agissait simplement de montrer la neutralité électrique dans la zone de charge d'espace.

La question 14 fait suite à la question 13 puisqu'il s'agissait d'exprimer le potentiel électrique. 60% des candidats ont bien répondu à cette question. Même constat que précédemment, lorsqu'il s'agit d'interpréter, d'analyser ou de commenter des résultats, le taux de réussite s'affaïsse comme le montre clairement la figure 3b.

La question 15 concerne une représentation graphique et le constat reste le même, il faut vraiment s'appliquer sur ce type de question avec des graphes propres, comportant chacun les données nécessaires : nom des axes, unités, valeurs, etc. Moins de 25% des candidats ont eu tous les points à cette question. Concernant la question 16, elle ne présentait aucune difficulté, il suffisait simplement de montrer que le nombre d'équations était insuffisant pour déterminer toutes les inconnues. Quasi tous les candidats qui ont traité cette question ont bien répondu, même si cela ne représente que 50% d'entre eux, figure 2.b et 3.b.

#### **Section 2.1.2 Phénomène de diffusion particulière**

Cette partie comporte 3 questions.

C'est une partie où l'étude porte sur le phénomène de migration des charges électriques. Cette étude est unidimensionnelle selon l'axe  $X$ . Le domaine est maillé en plusieurs cellules et on demande d'exprimer le nombre de particules transitant de gauche à droite, question 17. Question abordée par un nombre important de candidats mais qu'une faible partie d'entre eux a bien traité. Souvent les candidats ont oublié de diviser par le pas de temps, précision clairement indiquée dans la question. Les deux questions suivantes lui étaient liées, les candidats ayant bien répondu à la question 17 ont généralement eu tous les points aux questions 18 et 19 où il fallait établir l'expression du coefficient de diffusion. Le jury insiste sur le fait qu'il faut lire dans son intégralité la question, par exemple, à la question 19, bon nombre de candidats ont oublié de préciser l'unité du coefficient de diffusion.

#### **Section 2.1.3 Équilibre diffusion-conduction**

Cette partie comporte 5 questions.

Elle porte sur l'analyse de la zone de charge d'espace où deux phénomènes règnent : le courant de conduction dû au champ électrique et le courant de diffusion particulière.

A la question 20, il fallait retrouver une expression donnée dans le sujet. Dans ce type de question, même si le résultat est connu, il s'agit, pour les candidats, de bien indiquer dans leur copie toutes les étapes pour arriver à cette expression. Cette question a bien été bien traitée par la majorité des candidats. Les questions suivantes concernent le potentiel de diffusion. Dans un premier temps, on demande aux candidats d'établir son expression puis ensuite d'en donner une

valeur à température ambiante. Les deux dernières questions, questions 23 et 24, de cette partie sont une analyse qualitative des résultats trouvés. Comme prévu, ce sont ces questions qui donnent le taux de bonnes réponses les plus faibles. Un peu moins de 40% des candidats ont bien répondu. En effet, ces questions de compréhension sont celles qui posent généralement le plus de problème. Pour la question 22 qui comportait une application numérique, ne pas oublier de donner le résultat avec son unité. Le jury rappelle qu'un résultat sans unité ne peut être juste et ne rapporte aucun point.

### **Partie 2.2 : Relation courant-tension**

Cette partie comporte 7 questions. Le semi-conducteur étudié (une diode) est maintenant alimenté par une tension continue.

Les phénomènes de diffusion et de conduction ne s'équilibrent plus dans la zone de charge d'espace et la première question, question 25, demande aux candidats de justifier le type de courant qui prédomine. Question relativement bien traitée. La question 26 concerne la concentration des charges dans la ZCE suite à l'application d'une différence de potentiel. Il suffisait pour cette question de reprendre l'expression n°10 et de remplacer  $C_D$  et  $C_A$  par les bonnes concentrations. Une majorité de candidats a bien répondu à cette question.

Les questions suivantes portent sur la zone dopée N (zone 4) et aux phénomènes de recombinaison et de génération de paires électrons/trous. A la question 28, les candidats devaient établir une équation différentielle fonction de la concentration des trous en zone 4. Très peu de candidats ont abordé cette question. D'ailleurs, comme le montrent les graphes 2b et 2c, à partir de la question 28 et jusqu'à la fin du sujet (question n°51), plus de 80% des candidats ne les ont pas traitées. Cela donne un poids particulièrement important pour ces questions dans le classement final des candidats. Par exemple, la première partie de la question 31 a été traitée par seulement 12% des candidats et parmi ceux qui l'ont abordée pratiquement 80% ont bien répondu. Il s'agissait d'une question de compréhension, d'analyse et d'interprétations graphiques. Outre le fait que les étudiants n'ont pas compris la question, les mauvais résultats s'expliquent aussi par des arguments ou explications trop souvent confus, peu précis ou mal exprimés.

### **Partie 3 : Transistor bipolaire**

On s'intéresse maintenant aux semi-conducteurs utilisés dans les transistors bipolaires comme amplificateur de signaux électriques. Dans cette partie, c'est le transistor NPN qui est étudié. Cette partie comporte 20 questions. D'après le graphe 2c, les dix premières questions de cette partie ont été traitées par moins de 30% des candidats et à partir de la question 42 jusqu'à la fin, à peine 2 voire 3% des candidats ont essayé de répondre à ces questions. Comme d'habitude, les dernières parties des sujets sont très peu abordées, sachant que les grandes parties sont en général indépendantes, le jury recommande aux candidats de bien parcourir tout le sujet pour chercher des questions qui pourraient leur rapporter des points et faire ainsi la différence dans le classement final. Chaque point est important.

#### **Partie 3.1 : Gain en courant**

Il s'agit à travers 3 questions d'établir le lien entre le courant de commande  $I_B$  et le courant de travail  $I_C$ .

La question 32 est une question de compréhension qui a été plutôt bien comprise car une majorité de ceux qui l'ont traitée ont bien répondu, graphe 3c. Les questions 33 et 34 permettaient d'aboutir au gain en courant  $J_C/J_B$  dont on demandait un ordre de grandeur. Attention aux ordres de grandeurs trop souvent incorrects, dans cette question, les candidats doivent savoir que ce rapport doit être important puisqu'il s'agit d'un amplificateur. Un rapport inférieur à 1 est forcément incorrect.

### **Partie 3.2 : Polarisation du transistor**

Il s'agit dans cette étude de faire l'analyse d'un circuit de polarisation pour choisir un point de fonctionnement. Le circuit est donné ainsi que les courbes caractéristiques du transistor. Cette partie comporte 2 questions. La question 35, la plus abordée de cette 3<sup>ème</sup> partie, était une question simple d'électricité où une loi des mailles permettait rapidement de trouver les relations de  $I_B$  et  $I_C$  et de les tracer sur le réseau de caractéristiques.

A la question 36, il s'agissait de calculer la valeur des résistances et du courant de polarisation. Cette question a été mal traitée alors qu'elle ne présentait également aucune difficulté. Il fallait simplement se souvenir de la formule de la puissance en régime continu et appliquer la loi des mailles sur le schéma fourni.

### **Partie 3.3 : Régime dynamique du transistor autour de son point de fonctionnement**

Cette partie comporte une seule question. Le transistor est modélisé comme un quadripôle et à la question 37, les candidats devaient établir le schéma électrique de celui-ci. Les candidats n'ont pas vu qu'en se basant uniquement sur les relations 19 on pouvait facilement répondre à cette question. Moins de 10% des candidats ont répondu correctement.

### **Partie 3.4 : Modèle de la structure amplificatrice complète vis-à-vis des signaux variables**

Cette partie comporte 7 questions.

La question 38 est une question d'électricité ; par une loi des mailles, il s'agissait d'établir deux relations, une liant  $i_e$  à  $i_B$  et l'autre liant  $i_s$  à  $i_C$ . Une question plutôt bien réussie par une majorité de ceux qui l'ont traitée même si seuls 20% ont tenté d'y répondre.

Les questions 39 et 40 pouvaient facilement être traitées par l'ensemble des candidats, il fallait justifier un schéma électrique donné dans le sujet pour le fonctionnement autour d'un point de fonctionnement du montage amplificateur et donner la valeur de la résistance  $r_B$ .

Les questions de 41 à 44 concernent le gain en tension du montage amplificateur en fonction de la pulsation des courants pour aboutir, à la dernière question, sur une analyse d'adaptation d'impédance pour optimiser ce gain.

### **Partie 3.5 : Étude de la dérive thermique**

Cette partie comporte 7 questions traitées par moins de 2% des candidats, graphe 2c.

Les questions 45 et 46 portent sur l'analyse de la susceptibilité de  $V_{CE}^0$  vis-à-vis des variations du gain en courant  $\gamma$ , sachant que ce gain en courant, dans cette partie, croît avec la température. A la question 47, il s'agissait de comprendre l'impact d'une élévation de la température sur l'ensemble des points de fonctionnement.

Les questions suivantes, de la question 48 à la question 51, concernent l'impact d'une variation de température sur la puissance électrique dissipée par le transistor pour aboutir au fait que cette dérive joue un rôle de modérateur de puissance dissipée. Les candidats devaient conclure sur le fait que la dérive thermique a pour conséquence de réduire la puissance dissipée dans le transistor.