

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

### Présentation du sujet

Le sujet proposé cette année comprend deux grandes parties permettant d'étudier l'asservissement en fréquence d'un laser continu. La première partie porte principalement sur le principe de fonctionnement d'un laser en régime continu. La seconde concerne l'étude de son asservissement en fréquence.

La partie 1 est la partie la plus longue, elle comporte 3 sous-parties. Cette partie porte sur l'étude d'un laser continu, son principe de fonctionnement et sa modélisation sous forme de schéma-blocs.

La première sous-partie aborde des notions d'optique et s'intéresse plus particulièrement à la cavité optique du laser. Dans un premier temps, est traité un cas simple, une cavité linéaire formée de 2 miroirs plans parallèles et parfaitement réfléchissants. Puis dans un deuxième temps, les pertes sont considérées, soit par absorption soit par transmission.

La deuxième sous-partie concerne l'analyse de l'amplification optique en considérant une interaction entre une onde électromagnétique et un système matériel, l'atome. Après avoir étudié cette interaction, l'amplification optique est insérée dans la cavité en anneau décrite dans la partie 1.1. Le laser ainsi constitué est étudié dans la partie 1.3 sous forme de schéma-blocs pour identifier sa fonction de transfert et son point de fonctionnement.

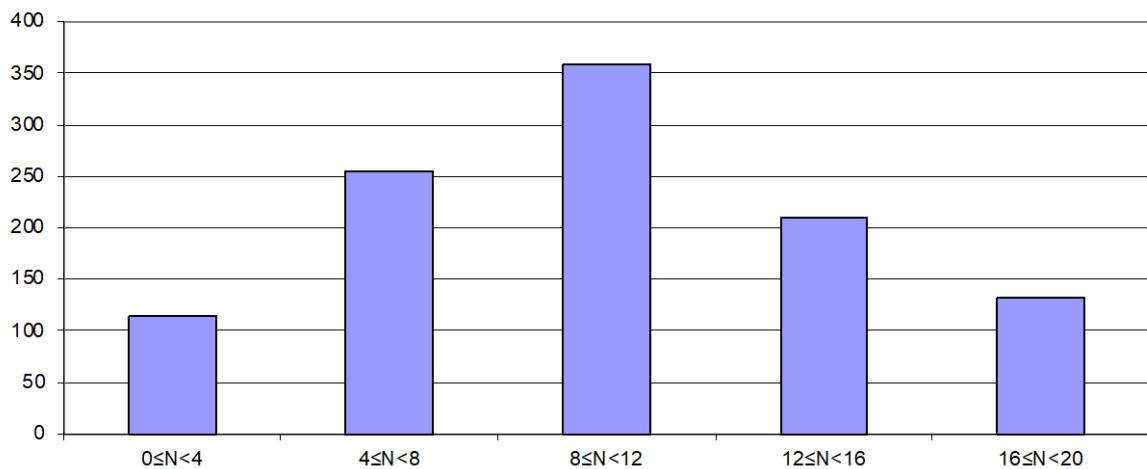
La deuxième partie est courte, seulement 6 questions. Elle concerne l'asservissement de la fréquence de ce laser. C'est la partie la plus « Sciences de l'Ingénieur » de ce sujet. Le laser est inséré dans une boucle d'asservissement et l'objectif est de trouver le correcteur optimal permettant d'assurer une bonne stabilité et rapidité du système asservi.

### Résultats des candidats

Le Tableau 1 présente la répartition des notes des candidats (1069 présents). La moyenne de l'épreuve s'établit à 9,55, avec un écart-type de 4,78.

$0 \leq N < 4$	114	11%
$4 \leq N < 8$	255	24%
$8 \leq N < 12$	359	34%
$12 \leq N < 16$	209	19%
$16 \leq N < 20$	132	12%
Total	1069	100%
Nombre de copies	1069	
Note moyenne	9,55	
Écart-type	4,78	

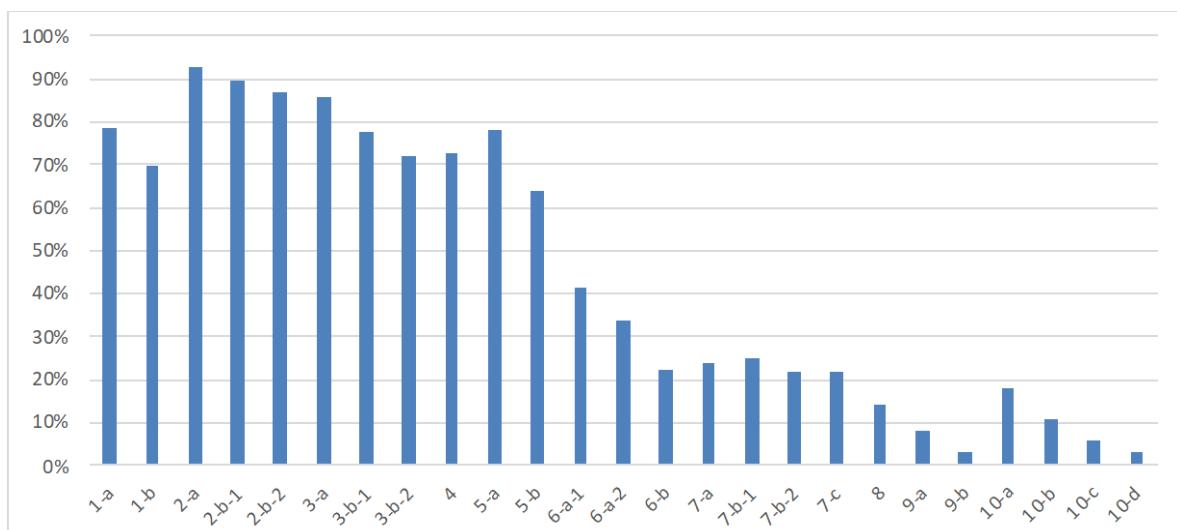
Tableau 1 : Statistique relative à l'épreuve P&SI filière MP



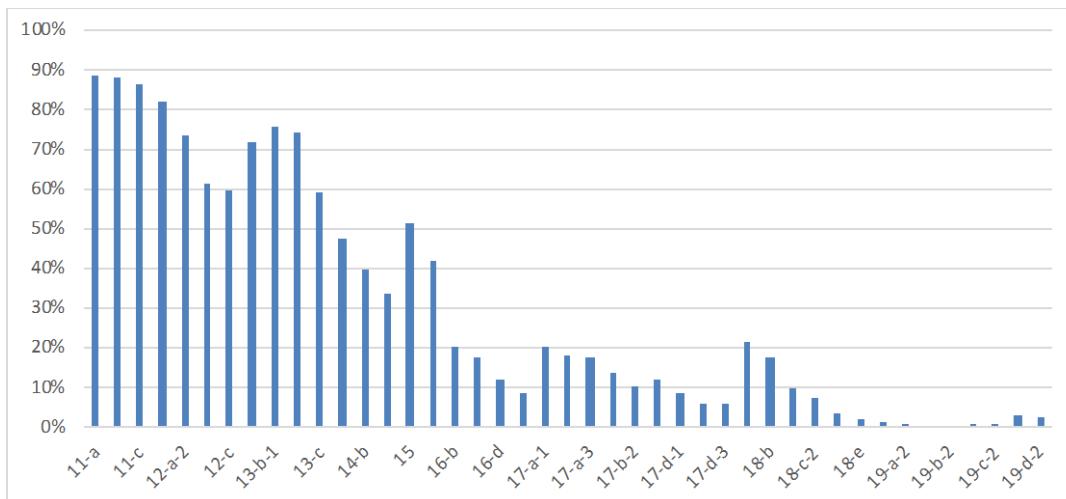
**Figure 1 : Statistique des résultats des candidats de l'épreuve par intervalle de notes**

Les figures 2a, 2b, 2c et 2d illustrent la fraction de candidats ayant abordé chaque question, respectivement pour les 3 sous-parties de la partie 1 et pour la partie 2. On voit assez clairement que les parties 1.3 et 2 ont été nettement moins abordées que les deux premières sous-parties, à part les premières questions de la partie 2. Ce sont pourtant ces parties, moins abordées par les candidats, qui ont permis de départager les meilleurs d'entre eux. Pour les sous-parties 1.1 et 1.2, seule la moitié des questions a été abordée par la majorité des candidats. En effet, ce sont 2 sous-parties avec un fort nombre de questions, elle comportait chacune une vingtaine de questions contrairement aux parties 1.3 et 2.

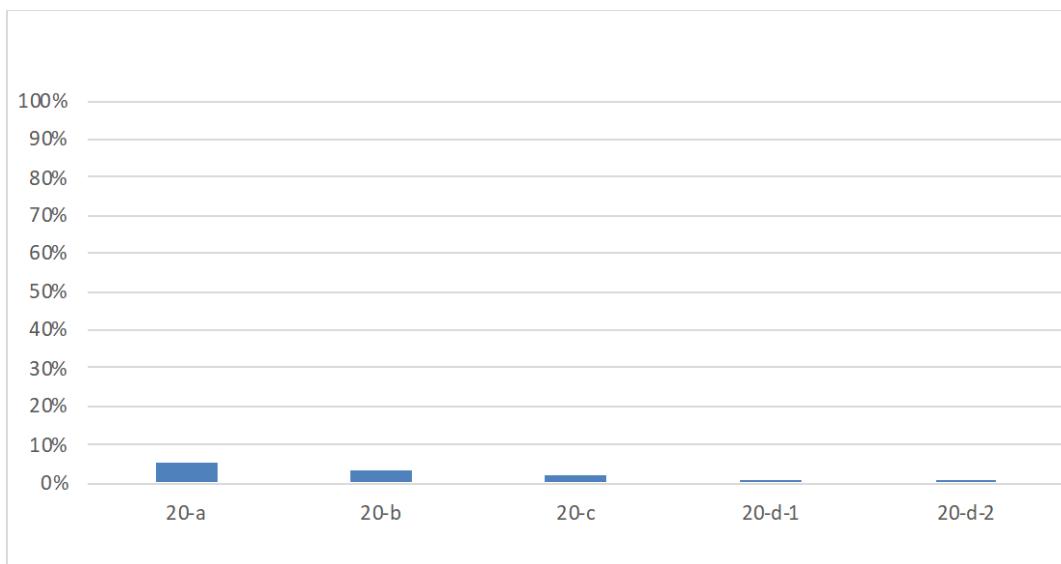
On regrettera que les questions nécessitant des qualités d'analyse aient été significativement moins abordées que celles plus strictement calculatoires. Lorsque qu'elles ont été abordées, elles ont été assez mal traitées, comme la question 1 par exemple qui a été traitée par environ 80% des candidats mais seuls 18% des candidats ont répondu correctement.



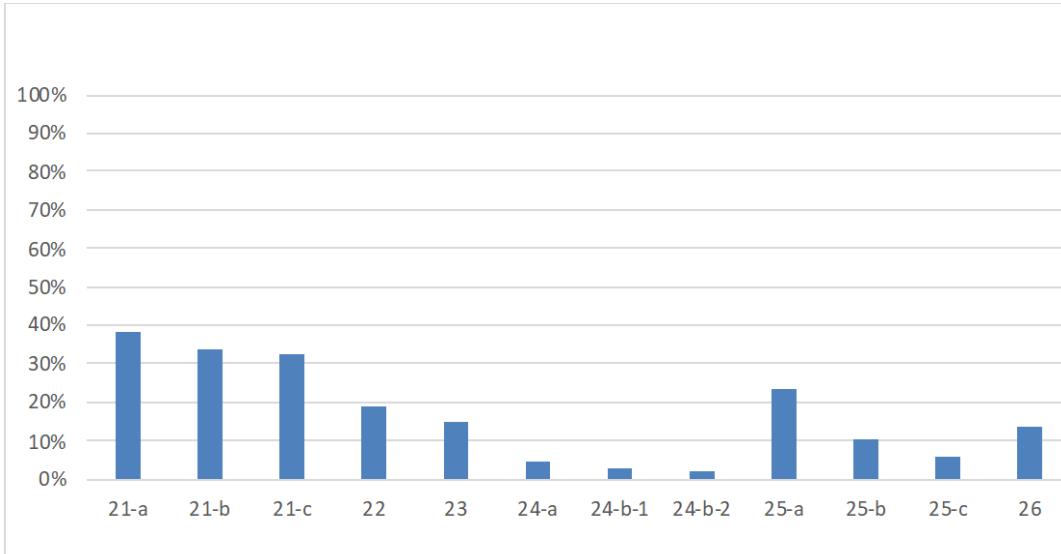
**Figure 2a : Fraction des candidats ayant abordé chaque question – Partie 1.1**



**Figure 2b : Fraction des candidats ayant abordé chaque question – Partie 1.2**

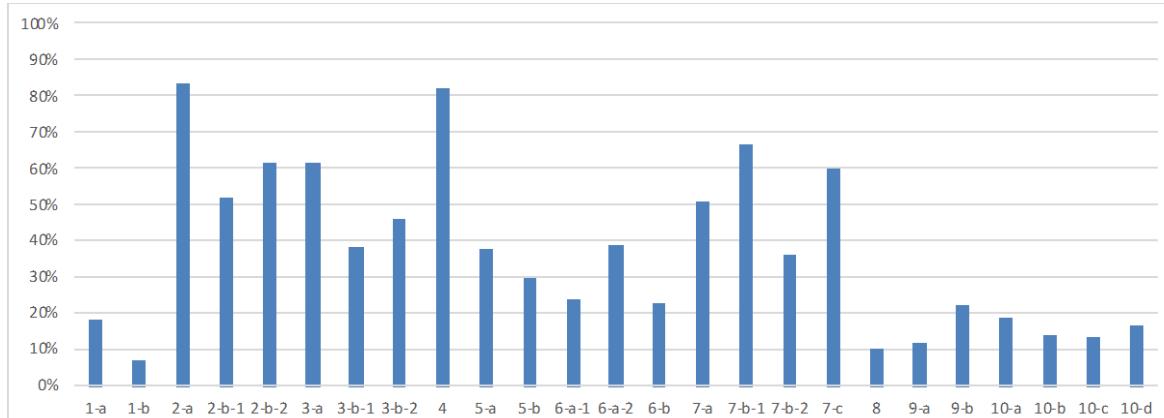


**Figure 2c : Fraction des candidats ayant abordé chaque question – Partie 1.3**

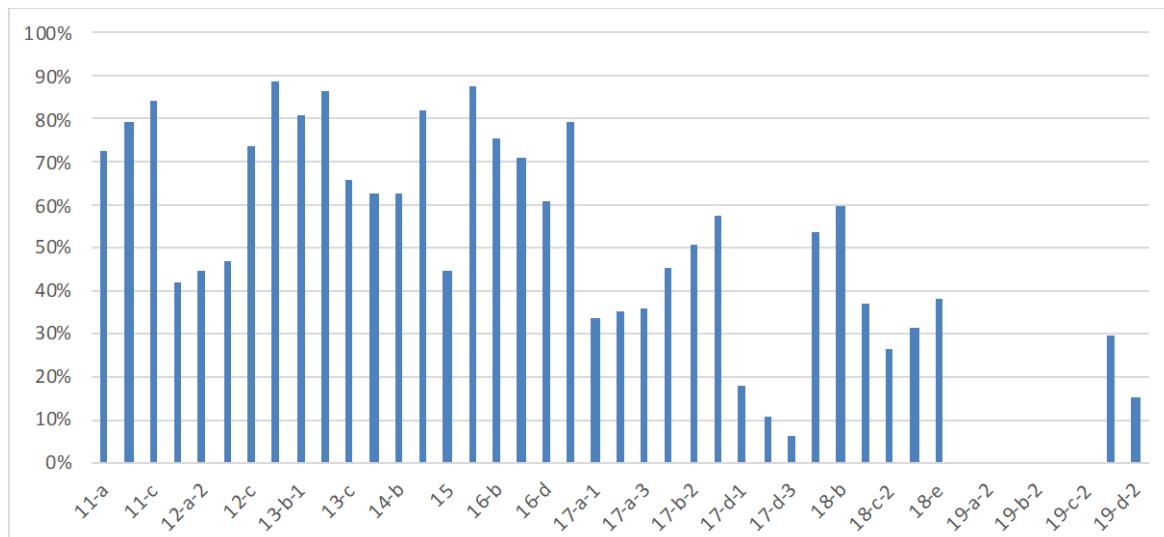


**Figure 2d : Fraction des candidats ayant abordé chaque question – Partie 2**

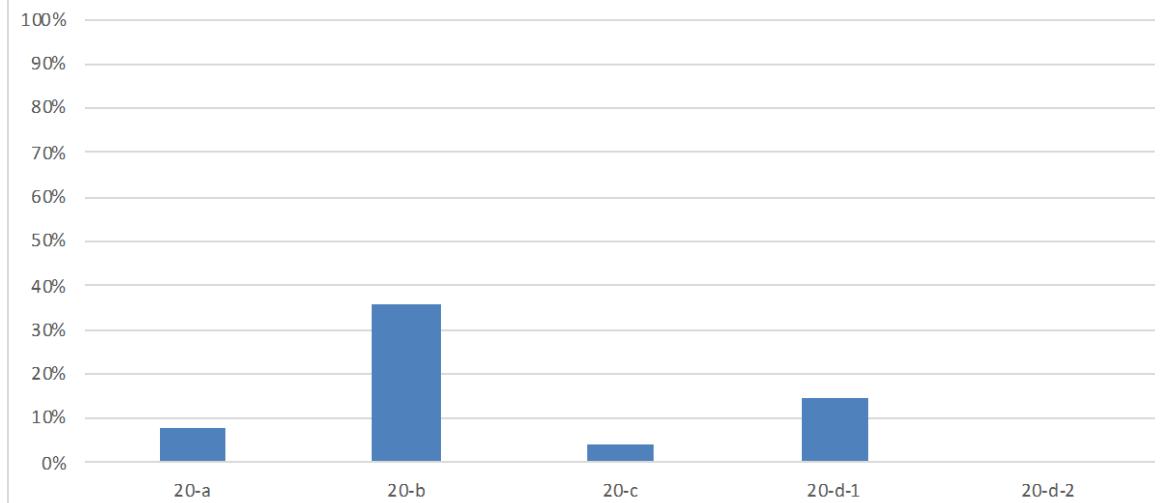
Les figures 3a, 3b et 3c indiquent le taux de réussite des candidats à chaque question, respectivement pour les quatre parties (les 3 sous-parties de la partie 1 et la partie 2). Une question est considérée comme réussie lorsque qu'il lui a été attribuée au moins la moitié des points. Certaines questions ont été réussies par une grande partie des candidats, mais elles n'ont pas véritablement fait la différence sur la notation finale.



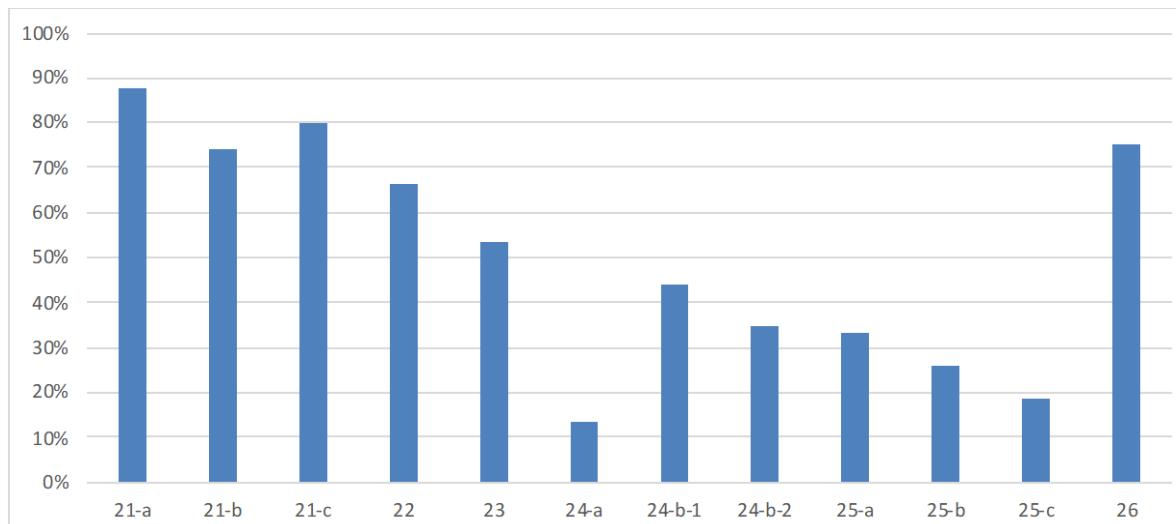
**Figure 3a : Fraction des candidats ayant réussi chaque question – Partie 1.1**



**Figure 3b : Fraction des candidats ayant réussi chaque question – Partie 1.2**



**Figure 3c : Fraction des candidats ayant réussi chaque question – Partie 1.3**



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

Les taux de réussite bas des questions nécessitant une explication physique des phénomènes s'illustrent par la difficulté 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 : Principe de fonctionnement d'un laser

### Partie 1.1 : Cavité électromagnétique dans le domaine optique

Cette partie comprend 10 questions. Les 5 premières questions ont été abordées par une majorité de candidat et une majorité d'entre eux a plutôt bien répondu, Figure 3a. Seule la première question semble avoir posé des problèmes puisque seulement 18% ont eu tous les points sur cette question alors qu'elle a été abordée par plus de 90% des candidats. Cette question concernait une représentation en schéma-blocs du laser, en considérant un laser en anneau puis un laser linéaire. Il s'agissait juste de comprendre que ce laser pouvait être représenté par un système en boucle fermé avec un simple amplificateur.

Les 4 autres questions concernaient plutôt des questions de cours donc généralement bien traitées par les candidats. Par exemple, la question 2 faisait référence au vecteur de Poynting d'une onde électromagnétique. Il fallait juste l'exprimer et donner une interprétation physique de celui-ci. Ces questions de compréhension sont celles qui posent généralement le plus de

problème mais ici, une majorité a bien su l'expliquer. Même constat pour la question 4 où il fallait trouver une solution pour rendre stable la cavité du laser.

La question 3b a posé des difficultés aux candidats où il était demandé de représenter sur un graphique l'amplitude du champ électrique pour les 3 premiers modes de la cavité. Pourtant ici, la cavité était une cavité linéaire formée par 2 miroirs plans parallèles et parfaitement réfléchissants et séparés par du vide. Les représentations étaient soit fausses, dues à une mauvaise compréhension du principe physique, soit non conformes. 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.

Les 4 dernières questions de la partie 1.1 ont été peu abordées par les candidats. La question 7 qui comportait 3 sous-questions a été abordée par une minorité de candidats mais ceux qui ont répondu à cette question ont plutôt bien réussi. Le jury rappelle que les candidats doivent bien lire tout le sujet, certaines questions sont indépendantes des autres et peuvent faire la différence dans le classement finale si les étudiants les abordent. Ces questions traitent toute de l'analyse de la fréquence de résonance au sein de la cavité.

A partir de la question 5, est considérée dans la cavité du laser linéaire une onde électromagnétique. Il fallait donc faire une étude de la propagation des ondes dans la cavité en considérant les pertes électromagnétiques intra-cavité soit par absorption soit par transmission. Ces notions d'optique semblent ne pas être acquises par un bon nombre de candidats puisque la Figure 3a montre que plus de 80% des candidats qui les ont abordées ont mal répondu.

## **Partie 1.2 : Amplification optique**

Cette partie comporte 9 questions et étudie l'interaction entre une onde électromagnétique, supposée polarisée et un système matériel actif appelé "atome", traité comme un système quantique.

La première question est une question de cours où on demande aux candidats de définir l'état stationnaire d'un système isolé. Les Figures 2b et 3b montrent non seulement qu'une majorité des candidats a traité cette question mais qu'en plus ils ont pour la plupart bien réussi, entre 70 et 80% de réussite pour cette question.

La question 12 est une question de compréhension où il faut exprimer les états stationnaires du système et leur énergie. Même si cette question a été abordée par une majorité de candidats, seuls environ 40% d'entre eux ont bien répondu. La sous-question 12a) a posé des difficultés aux candidats où il était demandé de représenter sur un graphique l'état fondamental ainsi que les 2 premiers états excités, le jury rappelle qu'il faut faire très attention à la qualité des graphiques pour obtenir l'ensemble des points.

Dans les questions suivantes, on considère la situation où l'atome est dans une superposition d'états stationnaires. La question 13 est une question de cours, orientée mathématique, où il faut montrer que l'espace des états est un espace vectoriel. 70% des candidats ont bien répondu à cette question.

Jusqu'à la question 16, les étudiants ont majoritairement bien répondu. Il s'agit dans ce type de question de retrouver une relation donnée dans le sujet. En général, ce type de question ne pose pas trop de difficulté. La Figure 3b montre qu'en moyenne 70% des candidats qui ont abordé ces questions ont bien répondu.

Les 3 dernières questions ont posé des grosses difficultés car peu d'étudiants les ont traitées soit par manque de temps soit par incompréhension. En revanche, les étudiants qui ont abordé ces questions ont plutôt bien répondu, pour 50% d'entre eux au moins. Le fait que peu de candidats ait traité ces questions, cela donne un poids particulièrement important pour celles-ci dans le classement final des candidats.

Dans ces 3 dernières questions, les difficultés proviennent du fait que l'atome est soumis à d'autres effets qui affectent aussi l'évolution de son état quantique : ce sont l'émission spontanée de rayonnement par cet atome et l'effet des interactions de cet atome avec son environnement (collisions dans un gaz, interactions avec son environnement, liquide ou solide, à l'échelle microscopique).

### **Partie 1.3 : Oscillateur dans le domaine optique**

Dans cette partie, l'amplificateur optique étudié est inséré dans une cavité en anneau équipée des mêmes miroirs que ceux décrits dans la partie 1.1. Cette partie, très courte, comporte qu'une seule question « découpée » en 4 sous-questions. Moins de 5% ont abordé cette question, très faible proportion des candidats, et les résultats ne sont pas très bons, seule la sous-question 20b franchit la barre des 30% de bonnes réponses. Comme précédemment, cela donne un poids particulièrement important à cette question dans le classement final des candidats.

Ce faible pourcentage de bonnes réponses peut s'expliquer par le fait que cette question faisait référence aux schéma-blocs demandés à la question 1. Puisqu'il s'agit ici de retrouver la fonction de transfert total ainsi que les fonctions de transfert des différents blocs que constitue la boucle de retour. Puis à partir de ces fonctions de transfert, une étude du point de fonctionnement est demandée, c'est-à-dire trouver la pulsation  $\omega$  et l'intensité  $I(0)$  de l'onde lumineuse circulant dans la cavité.

### **Partie 2 : Asservissement de la fréquence d'un laser continu monomode**

Cette partie, comme son nom l'indique, traite de l'asservissement en fréquence du laser. Comme indiqué dans la première partie de ce rapport, c'est la partie la plus « Sciences de l'Ingénieur » de ce sujet. Le laser est inséré dans une boucle d'asservissement et l'objectif est de trouver le correcteur optimal permettant d'assurer une bonne stabilité et rapidité du système asservi.

Cette partie comporte 6 questions. C'est la partie qui a fait la différence dans le classement final des candidats. Les Figures 2d et 3d montrent que moins de 40% des candidats ont traité celle-ci, en revanche, ceux qui l'ont abordée, ont plutôt bien réussi. En effet, la Figure 3d montre que le taux de bonnes réponses est en moyenne supérieur à 60%. 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.

La première question de cette partie est une question de cours, il faut modéliser un système asservi en boucle fermée et identifier le signal d'erreur. Cette question ne présente donc aucune difficulté.

A la 2<sup>ème</sup> question il fallait donner un ordre de grandeur de la fréquence de coupure puis écrire la fonction de transfert complète du système. Il s'agit pour les candidats d'avoir en tête des ordres de grandeur pour éviter d'écrire des valeurs qui n'ont pas de réalité physique. Comme précédemment, cette question ne présente aucune difficulté.

Les autres questions sont des questions de compréhension et d'analyse. Outre le fait que les étudiants n'ont pas compris ces questions, les mauvais résultats s'expliquent aussi par des arguments ou explications trop souvent confus, peu précis ou mal exprimés. En effet, la Figure 3d montre que ces dernières questions (mis à part la question 26) ont un taux de réussite inférieur à 40%.