



## **1/ CONSIGNES GÉNÉRALES**

L'idée de l'épreuve de modélisation est de mettre les candidats en situation de modélisation. Le candidat doit piocher dans ses connaissances de mathématiques, de sciences physiques, de sciences de l'ingénieur et d'informatique afin d'élaborer et de s'approprier un modèle, le confronter à des mesures et répondre à une problématique. Le candidat se retrouve dans une démarche similaire au TIPE puisqu'il va devoir utiliser des manipulations et des simulations de plusieurs disciplines pour répondre à son problème.

Le sujet de cette année portait sur l'amélioration de la consommation des machines frigorifiques en remplaçant le fonctionnement « tout ou rien » par une variation de vitesse du compresseur.

Le sujet comporte 4 parties indépendantes avec pour objectif de :

- comprendre un modèle simple du cycle frigorifique et de pointer les paramètres affectant l'efficacité thermodynamique de la machine. Le contrôle en vitesse du compresseur permet de commander la puissance thermique soutirée à la source froide (nommée « puissance frigorifique ») ;
- trouver les fréquences propres de vibration du compresseur afin d'éviter de se placer à une vitesse critique lors de la variation de vitesse. En effet, une vibration trop grande engendrerait du bruit désagréable pour les clients ;
- mettre en évidence expérimentalement les inconvénients d'une utilisation du compresseur sans dispositif de commande de la vitesse de rotation (pic de courant au démarrage et ses conséquences éventuelles, facteur de puissance dépendant de la charge) ;
- modéliser et justifier la commande prédictive de l'asservissement en température. La commande prédictive est comparée à la commande Proportionnelle Intégrale qui s'avère moins performante pour ce type d'utilisation.

## **2/ REMARQUES GÉNÉRALES**

Un gros effort sur la forme est constaté : 80 % des copies sont correctement présentées.

Pour la lisibilité, les correcteurs souhaitent avoir les résultats encadrés et recommandent de ne pas mélanger les réponses aux différentes parties. Cela n'empêche pas de sauter une partie sur laquelle on est moins à l'aise, pour éventuellement y revenir plus tard. Mais il faut éviter les allers-retours incessants au sein d'une même partie.

Dans l'ensemble, la plupart des questions du sujet ont été abordées. Quelques questions, plus délicates car demandant plus d'initiative, ont été peu traitées. Les candidats doivent garder à l'esprit que cette difficulté apparente se traduit par un plus grand nombre de points et qu'il est rentable d'y consacrer un minimum de temps. Sur ce type de questions, les correcteurs valorisent tout élément de réponse pertinent.

A l'inverse, certaines questions très basiques (notamment en début de sujet) ont donné lieu à des réponses très délayées, voire à des éléments de démonstration non nécessaires et non demandés.

Le sujet comportait de nombreuses questions, mais dont une partie significative admettait une réponse en une ou deux lignes. Par manque de concision, de nombreux candidats y ont perdu un temps précieux, ce qui les a empêchés d'aborder la dernière partie du sujet.

Nous rappelons donc qu'il est important d'être concis dans sa rédaction. Parfois un schéma rapide ou une écriture mathématique permettent de transmettre clairement et rapidement une idée simple, qui nécessiterait autrement plusieurs lignes d'explications. Attention à l'excès inverse, cette remarque ne signifie pas qu'on peut faire un schéma ou écrire une formule sans aucun commentaire.

Il est par ailleurs inutile d'écrire le titre d'une partie du sujet sur sa copie, comme il est inutile de longuement paraphraser la question pour introduire sa réponse.

Il est légitime que les candidats tentent d'aborder toutes les questions, même celles dont ils ne maîtrisent pas tous les éléments de réponse. Mais attention aux réponses farfelues ou trop triviales, cela peut décrédibiliser en partie le travail du candidat (ex Q14 : « Pour être isobare, il faut négliger les variations de pression »).

### 3/ REMARQUES SPÉCIFIQUES

(Le pourcentage de points gagnés par les candidats sur la question est donné entre parenthèses)

Q1 (83 %) : aucune démonstration n'était demandée, il s'agissait d'interpréter physiquement le signe d'un échange algébrique. La plupart des candidats ne savent pas expliciter cette interprétation. Le signe d'une grandeur algébrique permet d'inférer un sens réel à partir d'un sens conventionnel.

Q2 (78 %) à Q3 (76 %) : une partie significative des candidats ont semblé découvrir que le fluide frigorigène est plus froid que la source froide et plus chaud que la source chaude. Beaucoup de copies confondent la source chaude avec les radiateurs se trouvant à l'arrière du frigo. On rappelle que cette source n'est pas qualifiée de « chaude » parce qu'elle serait associée à une sensation tactile chaude, mais parce que sa température est plus élevée que celle de la deuxième source.

Q4 (85 %) : il n'était pas attendu que l'on redémontre l'expression du débit de masse comme flux d'un vecteur densité de courant. L'expression par cœur suffisait. Lorsqu'une démonstration (surtout aussi longue) est attendue, cela est explicité par l'énoncé.

Q5 (80 %) : RAS

Q6 (77 %) / Q7 (67 %) : un calcul d'ordre de grandeur était attendu. Proclamer qu'un terme est négligeable sans estimation numérique n'est pas convaincant. Régulièrement les valeurs numériques n'étaient pas suivies d'unité ou alors d'unités fausses.

Q9 (74 %) / Q10 (77 %) : RAS

Q11 (13 %) : première question délicate, souvent incomprise. L'énoncé constate que graphiquement les courbes isenthalpiques sont confondues avec les isothermes. La réponse ne pouvait donc pas être cette constatation graphique, mais devait être une démonstration basée sur le calcul. L'objectif était de montrer que l'expression  $\Delta h = c_p \Delta T$  était une approximation numériquement justifiée. Il ne fallait donc pas l'utiliser

pour répondre à la question, mais revenir à la définition de l'enthalpie. Lors de l'application numérique, attention à bien convertir les bars en Pascal.

Q12 (38 %) : il est nécessaire de préciser que l'enthalpie est une fonction d'état avant de calculer sa variation à l'aide d'un chemin fictif. Ne pas confondre « fonction d'état » et « extensivité ».

Q13 (45 %) : RAS

Q14 (9 %) : répondre qu'il faut « négliger les variations de pression » et confondre ainsi la dénomination d'un fait avec l'explication de ce fait, est une erreur grave fréquemment rencontrée dans les copies.

Q15 (55%) : RAS

Q16 (46 %) : de fréquentes erreurs dans l'identification des transformations coûteuse et utile. Régulièrement, l'échange thermique  $q_{23}$  dans le condenseur était considéré coûteux en complément du travail  $w_{12}$  du compresseur.

Q17 (34 %) : Question souvent bien traitée. La démonstration complète était attendue et pas uniquement le résultat appris par cœur. Pour l'application numérique, les températures doivent être converties en Kelvin. Les deux origines de l'irréversibilité du cycle étudié sont rarement identifiées.

Q18 (28 %) / Q19 (32 %) : parfois « l'aire du cycle » est évoquée pour apprécier graphiquement l'augmentation ou la diminution du travail. Attention à ne pas confondre le diagramme enthalpique avec le diagramme de Clapeyron.

Q20 (83 %) : le moteur fonctionnant sur le réseau, il était normal de trouver 50 Hz. Quelques erreurs dans la conversion entre fréquence et période.

Q21 (32 %) : il fallait donner au moins une réponse simple d'un filtre. Beaucoup proposent un « filtrage de Fourier », laissant au lecteur le soin de deviner lui-même comment éliminer les harmoniques indésirables. Il est regrettable de constater qu'une grande partie des candidats est incapable de citer au moins une technique permettant de réduire un bruit électronique. Augmenter (ou diminuer) la fréquence d'échantillonnage ne lisse pas le signal. Idem si l'on dégrade la quantification de l'axe des ordonnées. Superposer une courbe de tendance ne revient pas à éliminer le bruit : il y a là une confusion entre l'aspect d'une courbe et son contenu scientifique. Par ailleurs, le but n'est pas de se retrouver avec une sinusoïde parfaite. Certains candidats ne connaissent manifestement pas la signification du mot analogique.

Q22 (77 %) : les correcteurs s'attendaient à une comparaison avec des chiffres. Ce n'était pas toujours le cas.

Q23 (63 %) : il fallait conclure à partir de l'analyse des courbes. Quelques candidats confondent les axes.

Q24 (61 %) : énormément de propositions fausses.

Q25 (13 %) : très peu de candidats peuvent indiquer des différences entre la modélisation causale et acausale.

Q26 (90 %) : souvent l'élément « moteur » (ou « motorisation ») était ajouté du côté des solides et parfois aussi du côté des liaisons.

Q27 (36 %) / Q28 (15 %) : un traitement inadmissible de cette question qui est un point important de l'enseignement de la SII. Lorsqu'il y a un schéma, bien souvent il ne bouge pas. Il y a une confusion entre graphe de structure et schéma cinématique.

Q29 (37 %) : les commentaires sont souvent très descriptifs et détaillent le moindre écart entre le modèle et la mesure, en les parcourant de gauche à droite. Il s'agissait plutôt ici de tenir un discours scientifique, notamment en mentionnant des grandeurs physiques (amplitude, période, déphasage, etc.). Il y a par ailleurs une confusion entre modèle et consigne.

Q30 (41 %) : la question demandait un protocole simulation. Beaucoup de candidats ont proposé un protocole expérimental.

Q31 (81 %) : une valeur du facteur de surintensité sans aucune justification n'est pas convenable et n'a pas donné lieu à l'attribution de tous les points. Il faut au moins préciser ce que l'on a mesuré (préférentiellement les amplitudes crête-à-crête) et donner les deux valeurs relevées qui ont permis le calcul du rapport.

Q32 (17 %) : cette question nécessitait une vraie prise d'initiative de la part des candidats, la rapprochant d'une mini résolution de problème. La modélisation simplifiée du générateur était donnée pour faciliter l'entrée en matière et les capacités requises pour réussir la question sont du niveau de 1<sup>ère</sup> année. Pourtant, exceptionnellement rares sont les candidats ayant pleinement réussi la question. Plusieurs raisons à cela :

- rares sont ceux qui débutent leur raisonnement par un schéma électrique du circuit. Pour rappel, un schéma du circuit n'est pas un simple dessin servant d'illustration, mais participe pleinement au raisonnement logique. Il permet notamment d'orienter les grandeurs algébriques du calcul (tensions, courant) et justifie ainsi les signes apparaissant dans les calculs qui suivent ;
- trop nombreux sont ceux qui ont inclus la pince ampère-métrique dans le circuit ;
- fréquemment la loi des mailles est fautive (erreur de signe), erreur souvent corrélée à l'absence de schéma. On rappelle que la loi d'Ohm s'écrit  $u = -Ri$  en convention générateur ;
- on mesure des amplitudes en régime sinusoïdal. Or, les lois de l'électrocinétique ne sont pas vérifiées par les amplitudes, mais sont vérifiées par les grandeurs complexes. Il fallait donc introduire les amplitudes complexes de sa propre initiative, puis prendre le module pour faire apparaître des relations entre amplitudes réelles ;
- il fallait ensuite relever les grandeurs pertinentes sur les graphes. Il existait plusieurs façons de faire.

Toutes ces étapes sont du niveau de première année et en général réinvesties au cours de l'année de PSI lorsqu'est abordée la partie Électronique de la formation. Mais l'ensemble de ces étapes, à traiter en autonomie, s'est visiblement révélé trop difficile. Peu de candidats ont pris des points sur cette question. À l'avenir, les correcteurs souhaitent conserver la possibilité de poser ce genre de questions plus ouvertes, tout en essayant de les formuler de manière à ce qu'elles soient mieux abordées par les candidats.

Bien qu'elles aient été sans conséquence pour les candidats, il est à noter deux erreurs de modélisation dans l'énoncé de cette question. La première est une étourderie. Le moteur n'étant pas chargé et les frottements négligés, l'impédance est modélisée en régime permanent comme étant purement réactive. Cela est confirmé par le déphasage tension-courant en quadrature, visible sur les courbes. Mais la tension étant en avance sur le courant, la partie imaginaire est positive. Il aurait donc fallu écrire  $\underline{Z} = +jY$ .

La deuxième erreur est une erreur de modélisation. Lors du régime transitoire, l'impédance ne peut pas être purement réactive puisque le moteur absorbe de l'énergie électrique pour augmenter l'énergie cinétique de rotation du rotor. Si l'on pouvait zoomer sur les premières oscillations, on constaterait un déphasage

d'environ  $\pi/4$  entre tension et courant. Au final, l'idée générale de la démonstration reste la même (quoique plus compliquée car nécessitant plus d'étapes). Par contre, la valeur de la résistance interne du modèle de Thévenin n'est pas la même.

Bref, aucune copie n'a relevé ces deux erreurs et cela n'a pas eu d'impact sur l'évaluation des candidats.

Q33 (34 %) : dans le cadre du modèle donné par l'énoncé (prises en parallèle), c'est la chute de tension consécutive au pic de courant qui se répercute sur les autres prises, les tensions aux bornes de dipôles en parallèle étant égales. On pouvait aussi penser à l'effet d'éventuels démarrages simultanés sur plusieurs prises en parallèle. Les pics en courant simultanés pourraient alors créer un appel trop fort en courant, provoquant l'ouverture du circuit par un disjoncteur.

Dans le cas de plusieurs branches alimentées en parallèle, ce n'est pas parce qu'une branche appelle beaucoup de courant que les autres verront leur courant diminuer. De nombreux candidats ont invoqué la loi des nœuds pour affirmer cela, en occultant que l'installation électrique placée en amont des prises pouvaient fournir le courant nécessaire au pic, sans en priver les autres prises. Dans le cadre de l'énoncé, c'est bien la chute de tension qui se répercute sur les prises en parallèle.

Il est à noter que la modélisation proposée par l'énoncé (prises en parallèle sans description poussée de l'installation électrique) était volontairement candide. Les auteurs n'ont pas souhaité entrer dans une modélisation poussée à ce sujet. L'idée était de pointer du doigt la possibilité pour une installation électrique d'être perturbée par un pic de courant non désiré.

Q34 (31 %) : des confusions entre la loi de Lenz (loi de modération qualitative) et la loi de Faraday. Peu de candidats pensent à citer la fréquence comme paramètres d'influence. Pourtant son influence apparaît clairement lorsque la loi de Faraday est énoncée.

Q35 (4 %) : très rares sont les candidats à avoir évoqué l'ARQS. Quelques-uns ont eu l'idée que « le courant est le même tout le long du fil », mais sans aller jusqu'à justifier la raison d'une telle propriété.

Q36 (35 %) : l'énoncé précisait clairement que  $U$  et  $I$  étaient des amplitudes, utilisées par la suite pour évaluer numériquement la puissance moyenne. Il ne fallait donc pas oublier le facteur 2 dans l'expression demandée.

Q37 (24 %) : cette question d'ordre expérimental a été fréquemment abordée et a été particulièrement valorisée, même si les méthodes utilisées étaient souvent critiquables. Une partie significative des candidats l'ont hélas sautée et ont perdu l'occasion d'engranger des points faciles à prendre. Dans cette question aussi, l'initiative des méthodes de mesure (et la gestion des difficultés associées) étaient laissée aux candidats.

Quelques remarques :

- il est deux fois plus précis de mesurer des amplitudes crête-à-crête pour en déduire une amplitude ;
- Pour l'amplitude du courant, il fallait utiliser la figure 14, ce qui augmentait la précision de mesure d'un facteur 6 ! ;
- il ne fallait pas oublier les facteurs de conversion pour traduire les tensions mesurées en tension ou courant « vrais » ;
- dans le vocabulaire utilisé par les candidats, les termes « déphasage » (en radians) et « décalage temporel » (en seconde) sont souvent confondus... Heureusement, dans les calculs cette ambiguïté est généralement levée ;
- pour mesurer précisément le décalage temporel, il fallait utiliser la figure 14 et se référer aux passages des courbes par zéro. Il y avait là une difficulté que le candidat devait gérer seul : la courbe de courant comportait une petite composante continue et n'était pas parfaitement sinusoïdale. Une part non négligeable de candidats ont su gérer ces difficultés.

Q38 (6 %) : bien que la question soit très guidée, elle a été très peu traitée : le terme d'"incertitude" semble avoir fait fuir l'essentiel des candidats. C'est dommage car les correcteurs ont valorisé tout élément de réponse pertinent, même si les mesures faites en Q37 étaient imprécises. Rappelons que les sciences de la nature tirent leur légitimité de la comparaison entre les théories et les mesures expérimentales et que cette comparaison ne peut être faite sans le recours aux incertitudes. À noter que les subtilités possibles autour du calcul d'incertitudes n'étaient pas requises puisqu'un simple ordre de grandeur était attendu, mais il est appréciable de lire quelques copies qui semblent connaître ces règles de calcul dans le détail.

Q 39 (25 %) : c'est une question de cours. Rares sont les candidats sachant que cela permet de réduire les pertes Joule en ligne. Certains vont même jusqu'à affirmer que EDF oblige à augmenter le facteur de puissance pour augmenter la puissance et donc faire plus de profits.

Q40 (61 %) : trop de candidats ignorent que la présence d'un intégrateur annule l'erreur statique.

Q41 (48 %) : Les candidats qui connaissaient la notion de pôle dominant ont correctement répondu.

Q42 (20 %) : rares sont les candidats ayant répondu correctement. De très nombreuses erreurs dues à la conversion des radians en degrés.

Q43 (15 %) / Q44 (10 %) : lecture/réglage des marges : beaucoup ne savent pas comment faire.

Q45 (18 %) : comparaison PI/prédictif : commentaires souvent peu précis.

Q46 (40 %) : cette question de cours a malheureusement été trop mal traitée.

Q47 (21 %) : il y a eu des confusions entre les questions 46 et 47.

Q48 (29 %) : certains candidats semblent vraiment répondre au hasard.

Q49 (20 %) : RAS

Q50 (7 %) : la conclusion doit se faire par rapport à l'objectif. Trop peu de candidats le mentionnent.

Présentation (85 %)

#### 4/ CONCLUSION

Les candidats ont dans l'ensemble abordé les questions relevant des différentes matières et n'ont pas semblé être perturbés par le fait de changer de discipline d'une question à l'autre.

Les correcteurs regrettent néanmoins que des questions très proches du cours soient mal traitées. Les modèles simples abordés en cours sont souvent la base d'une modélisation plus complexe.

Contrairement à l'année dernière, il y a très peu de copies presque vides.

La qualité de la présentation des copies (présentation des questions dans l'ordre, résultats encadrés, propreté générale...) est tout à fait acceptable. Une présentation claire est souvent associée à un raisonnement clair.

La concision des réponses est essentielle à la réussite d'une épreuve écrite, surtout lorsqu'elle comporte de nombreuses questions. Cela signifie en général qu'une part importante d'entre elles – les plus faciles – sont

affectées de peu de points. Aussi, écrire une page entière pour ne glaner que 0,2 point sur 20 devient un sérieux handicap à la réussite globale du sujet.

Il est également important de consacrer un minimum de temps aux questions en apparence plus difficiles. Le nombre de points à prendre est plus important et les correcteurs sont bienveillants et valorisent tout élément de réponse pertinent, notamment sur les questions nécessitant une prise d'initiative.

L'épreuve de modélisation nous paraît être un contexte favorable pour l'analyse de courbes expérimentales. Il nous semble important que les candidats soient capables de mobiliser à l'écrit des compétences expérimentales acquises en TP au cours de leurs deux années de formation.

Les correcteurs encouragent les candidats à prendre davantage de recul pour traiter les épreuves proposées.