

## 4. Physique-chimie 1

### 4.1. Introduction

La centrale électrique DK6 située sur le port industriel de Dunkerque se distingue par son intégration avec le site sidérurgique voisin d'Arcelor-Mittal. Elle valorise une partie des gaz de haut fourneau issus de la production d'acier en les utilisant comme combustible pour produire de l'électricité. Le sujet PSI Physique-Chimie 1 de la session 2025 est constitué de trois parties indépendantes, chacune portant sur l'étude d'un élément constitutif de cette centrale :

- la première partie s'intéresse à l'étude de la chambre de combustion de la turbine à gaz d'une tranche de production de DK6 ; elle donne l'occasion de réaliser un bilan énergétique sur un réacteur ouvert en régime stationnaire afin d'établir une relation entre les températures d'entrée et de sortie et les débits molaires des différentes espèces ;
- la seconde partie examine la détente de vapeur d'eau dans les turbines haute, moyenne et basse pression, provoquant la rotation de l'axe qui entraîne le générateur électrique ; il s'agit, par des bilans énergétiques et de moment cinétique, d'estimer la puissance mécanique réellement transmise par le fluide au cours de sa détente ;
- la troisième et dernière partie étudie la conversion de l'énergie mécanique en énergie électrique par un alternateur synchrone diphasé puis s'intéresse aux échanges entre l'alternateur et le réseau.

### 4.2. Analyse globale des résultats

L'énoncé comporte 34 questions, dont plusieurs se déclinent en un grand nombre de sous-questions. L'appropriation et l'analyse approfondie des figures et graphes exige un effort et un temps conséquents, rendant le traitement complet du sujet difficile pour la majorité des candidats. La complexité des thèmes abordés accentue cette difficulté : les questions de cours s'accompagnent d'interrogations techniques qui requièrent une maîtrise approfondie des notions.

Globalement, les résultats restent très en deçà des attentes. Pourtant, le sujet propose de nombreuses questions directement issues du cours, mentionnées explicitement dans le programme officiel de la filière, ainsi que des applications classiques, offrant aux candidats l'opportunité de valoriser leurs connaissances. Ces questions sont cependant délaissées ou contournées dans la majorité des copies. La troisième et dernière partie de ce sujet, intégralement délaissée par plus de 5 % des candidats, comporte des questions de cours et d'applications directes très abordables. Aussi, le jury rappelle à toutes fins utiles que rien n'oblige le candidat à traiter les parties indépendantes dans l'ordre où elles apparaissent dans l'énoncé.

Concernant les questions moins guidées, le jury rappelle qu'il valorise significativement toute proposition scientifiquement fondée dès lors que le candidat extrait les informations pertinentes, en donne une interprétation correcte et expose clairement sa démarche, même lorsque cette dernière n'aboutit pas à une conclusion parfaite ni complète. Le jury constate également, dans de nombreuses copies, une absence de clarté et de rigueur dans la présentation et l'enchaînement des étapes des démonstrations, ce qui nuit à leur lisibilité et questionne à la fois la maîtrise des notions relevant du programme et la bonne compréhension des phénomènes physiques associés.

L'énoncé comporte également une part importante de questions relatives à des calculs numériques et leur analyse, représentant une proportion non négligeable du barème, et requérant

l’usage systématique de la calculatrice. Étonnamment, certains candidats semblent en avoir été dépourvus.

Enfin, particulièrement sensible à l’expression, à la présentation de la copie, ainsi qu’à la lisibilité de l’écriture, le jury invite les candidats à remettre des copies à la fois convaincantes dans leur contenu et respectueuses du correcteur quant à la forme : des réponses lisibles non raturées, correctement numérotées, rédigées de manière intelligible et sans fautes d’orthographe, des schémas légendés, des axes étiquetés, des traits tirés à la règle, etc. Le jury a appliqué un malus dès lors que l’un au moins de ces critères a fait défaut.

### 4.3. Commentaires sur les réponses apportées et conseils aux candidats

Le jury invite les futurs candidats à accorder une attention rigoureuse à l’analyse des questions, notamment lorsqu’elles se déclinent en sous-questions. Même si certaines réponses peuvent sembler évidentes, l’ensemble doit être traité pour prétendre à l’intégralité des points.

On constate chez plusieurs candidats une tendance à aborder le sujet de manière fragmentée, en « picorant » certaines questions à travers le sujet, sans véritable logique de progression ni prise en compte de la structure d’ensemble. Cette stratégie, sans doute motivée par la volonté de « grappiller des points », nuit souvent à la cohérence du propos et trahit une négligence de l’architecture globale du sujet, pensée de manière progressive et intégrée en sous-partie par le concepteur. Or, l’énoncé est conçu pour permettre aux candidats de développer une réflexion structurée, dans une logique de construction continue. Aller et venir entre les parties de manière désordonnée, en délaissant le fil directeur, affaiblit la pertinence des réponses et empêche souvent d’atteindre la profondeur attendue dans l’analyse. Le jury encourage donc vivement les futurs candidats à adopter une démarche plus rigoureuse et méthodique, en prenant le temps de comprendre la logique interne des différentes parties du sujet avant de répondre et à éviter les approches dispersées, contre-productives tant sur le fond que dans la forme. Une réponse correcte, claire et rigoureusement argumentée sera systématiquement mieux valorisée qu’un enchaînement de réponses approximatives ou peu soignées.

Le jury observe que certains candidats se contentent de juxtaposer des calculs numériques sans préciser les grandeurs physiques manipulées. Il rappelle que l’usage d’expressions littérales reste à privilégier. Toute grandeur introduite doit être définie et il convient de conserver les notations imposées par l’énoncé, sauf justification explicite.

Toute réponse doit être argumentée. Lorsque le candidat mobilise une loi physique, il est attendu qu’il en écrive l’expression générale complète, puis qu’il explicite clairement les hypothèses ou conditions de validité permettant sa simplification et l’adaptation des grandeurs au contexte étudié.

Lorsqu’il est demandé de rappeler une formule de cours, il faut impérativement préciser les noms des grandeurs ainsi que leurs unités, sauf si l’énoncé les a déjà spécifiées. De même, les lois ou principes utilisés (Hess, premier principe de la thermodynamique, etc.) doivent être correctement cités et non confondus entre eux. L’emploi d’acronymes non explicités (ppi, LdN, etc.) est à proscrire.

Lorsqu’une expression est attendue en fonction de variables spécifiées, il est essentiel de reformuler le résultat de manière à faire apparaître explicitement les grandeurs demandées, afin de répondre précisément à l’énoncé.

Concernant les unités, il n’est pas rare de rencontrer J/s (au lieu de W) ou encore H.rad/s (au lieu de  $\Omega$ ). Même si ce n’est pas faux, l’unité usuelle est préférable. Le candidat doit également

porter attention à l'usage des majuscules/minuscules pour exprimer l'unité d'une grandeur : le kilogramme kg se note avec une minuscule tandis que le kelvin K avec une majuscule. Le jury relève à de trop nombreuses reprises « degrés » comme unité de température, sans plus de précision.

De manière générale, le jury recommande d'adopter un vocabulaire précis et sans ambiguïté, reflétant une compréhension fine des phénomènes physiques et des grandeurs mises en jeu.

Les relations doivent être vérifiées (homogénéité, dépendance aux paramètres, choix des notations : vecteurs vs scalaires, dérivées totales vs partielles, etc.). Les applications numériques doivent être menées avec soin : vérification des unités, clarté du calcul, commentaire critique du résultat, notamment en cas de valeur incohérente.

Ces commentaires attendus doivent prendre appui sur des arguments scientifiques et/ou jugements des ordres de grandeurs par comparaison aux attentes et/ou aux ordres de grandeurs connus. Des formulations telles que « c'est grand » ou « ça fait beaucoup » ne sont pas convaincantes. Le jury rappelle à cette occasion que les épreuves scientifiques sont aussi un exercice de communication.

Dans le cas de l'exploitation de documents (graphiques, tableaux, etc.), l'extraction des données doit être conduite avec rigueur, en exposant de façon explicite la méthode suivie.

Le jury insiste également sur l'importance de structurer les réponses, qu'il s'agisse de démonstrations classiques ou de traitements plus ouverts. Il est indispensable d'énoncer les hypothèses de travail, mais celles-ci doivent aussi être intégrées au raisonnement et non listées isolément. Les questions de restitution de cours doivent être traitées avec précision pour ne pas négliger des points facilement accessibles.

Enfin, il est impératif de définir clairement le système étudié avant toute application d'un principe, que ce soit en mécanique ou en thermodynamique physique ou chimique. Un schéma peut s'avérer précieux pour accompagner le raisonnement.

Des recommandations spécifiques au sujet traité sont présentées dans la suite de ce document.

**Q1** Montrer qu'une transformation est quantitative par le calcul de son enthalpie libre de réaction à partir des enthalpies et entropies molaires est une notion de cours. Pourtant, moins de la moitié des candidats parviennent à conclure correctement. Certains se limitent au calcul de l'enthalpie de réaction et utilisent le critère relatif au caractère exothermique pour répondre, sans aucune allusion à l'entropie de réaction. D'autres ne prennent pas la peine de réaliser le calcul numérique pour conclure. Enfin, certains obtiennent une constante de réaction de l'ordre de l'unité voire inférieure à 1 et concluent à une transformation quantitative. Rappelons qu'il est nécessaire de préciser les états physiques des espèces dans l'équation bilan de la réaction. Une mention relative à la loi de Hess est attendue lorsqu'elle est utilisée. Il arrive fréquemment que le candidat pose l'expression numérique de  $K^\circ$  en se dispensant d'en effectuer le calcul tout en affirmant que  $K^\circ \gg 10^4$ , laissant sans doute le soin au correcteur de s'en convaincre lui-même. Cette démarche n'est pas valorisée. Enfin, la définition du PCI étant donnée dans la question, que son calcul pose autant de difficultés aux candidats surprend le jury.

**Q2** Une confusion fréquente est relevée dans de nombreuses copies entre débit massique et débit molaire, en particulier lors de l'interprétation des rapports stoechiométriques. Par exemple, lorsqu'un candidat écrit qu'il faut « deux fois plus de dioxygène que de méthane », il est essentiel qu'il comprenne qu'il s'agit de deux fois plus de quantité de matière, c'est-à-dire en moles, et non de masse. Cette confusion peut entraîner des erreurs importantes dans les calculs liés aux bilans de matière. Il est donc attendu des candidats qu'ils maîtrisent non seulement les définitions précises des grandeurs utilisées (débit massique, débit molaire, concentration, etc.), mais aussi qu'ils les mobilisent à bon escient, en lien avec les données et les attendus du sujet. Le

jury déconseille aux candidats de faire apparaître les facteurs de conversion en multiples/sous-multiples de l'unité dans les expressions littérales.

**Q3** Plusieurs copies présentent des raccourcis de formulation regrettables, tels que : «  $Q = 0$  car calorifugé ». Une telle écriture, qui traduit une idée certainement correcte sur le fond, reste insuffisante dans la forme. Il est attendu des candidats qu'ils rédigent des phrases explicites complètes. En thermodynamique, il est impératif de préciser le sens des transferts (travail, chaleur) et de bien distinguer ce qui est fourni au système ou par le système. Par ailleurs, la question posée est manifestement conçue dans le cadre d'un système ouvert ; beaucoup abordent pourtant le problème sous l'angle d'un raisonnement en température de flamme en réacteur fermé et adiabatique, sans mentionner les hypothèses nécessaires (absence de pertes, composition du mélange, cycle suivi, prise en compte de l'azote, etc.). Lorsque ce raisonnement est correctement mené et donne un résultat physiquement cohérent, le jury sait valoriser l'effort. En revanche, trop de copies aboutissent à des résultats aberrants sans que le candidat ne s'en alarme, signe d'une absence d'un regard critique sur les ordres de grandeur attendus. Ces constats rappellent l'importance d'une démarche structurée, rigoureuse et physiquement fondée, ainsi qu'une maîtrise des cadres d'application des modèles utilisés.

**Q4** Trop de réponses se limitent à des assertions générales ou floues, sans réelle articulation des concepts. L'intitulé de la question invite les candidats à proposer une justification qualitative. Il est important de rappeler que « qualitativement » ne signifie pas « vaguement ». Il est attendu que la réponse s'appuie sur des relations de cause à effet rigoureusement exprimées, en lien avec les grandeurs physiques pertinentes. En l'occurrence, la mise en relation de l'énergie dégagée par la réaction chimique, de la capacité thermique globale du système et de la température finale atteinte, est incontournable. Par ailleurs, une confusion fréquente concernant le caractère total d'une transformation est constatée. Plusieurs candidats affirment qu'une transformation n'est totale que si les réactifs sont introduits dans des proportions strictement stoechiométriques. Cela traduit une incompréhension du sens du mot « total », qui renvoie ici à l'état d'avancement de la réaction, non à la manière dont les réactifs sont dosés. Il est regrettable d'observer que certains candidats, ayant démontré en question **Q1** que la transformation est quasi-totale, affirment plus loin que « si  $D_{m,air} > D_{m0}$  alors la transformation n'est pas totale », ou encore « on prend  $D_{m,air} > D_{m0}$  pour que la transformation soit totale ». Ces exemples soulignent l'importance, pour les futurs candidats, de maîtriser les définitions fondamentales et de s'assurer de la cohérence logique de leur raisonnement tout au long du devoir.

**Q5** Il est judicieux de dresser un tableau d'avancement avant d'obtenir les débits molaires des différentes espèces.

**Q6** Question de synthèse peu réussie, s'appuyant sur le bilan déjà réalisé en question **Q3** et sur les expressions des débits molaires obtenus précédemment.

**Q7** Peu de succès pour cette question rarement traitée et conditionnée à une expression pertinente du débit d'air calculé en question **Q6**.

**Q8** Cette question fait partie des mieux réussies. Les analyses dimensionnelles sont, dans l'ensemble, bien maîtrisées et les candidats sachant proposer un code pertinent et fonctionnel sont valorisés. Le jury est d'ailleurs agréablement surpris par la qualité de certains scripts Python, souvent corrects, bien structurés et indentés, et commentés avec soin. Certaines copies oublient toutefois de réutiliser la fonction  $C_{pm}(T, gaz)$ , pourtant fournie dans l'énoncé. Ce type de négligence souligne l'importance de prendre le temps de s'approprier le contenu du programme proposé afin de formuler une réponse cohérente.

**Q9** L'énoncé invite à « décrire précisément » le graphe fourni, en précisant qu'il s'agit de commenter le sens physique des résultats. Or, cet impératif est parfois mal interprété par les candidats, qui se limitent à une description littérale et détaillée de la courbe, sans exploiter les éléments issus des questions précédentes ni proposer une analyse physique approfondie. Trop de copies se contentent d'énoncés descriptifs du type « ça monte puis ça descend », sans mise en relation avec les grandeurs physiques représentées, les phénomènes sous-jacents, ou le comportement du système étudié. Une telle approche, purement illustrative, ne répond pas aux attentes d'un commentaire scientifique. L'interprétation physique – appuyée sur les résultats obtenus et le raisonnement mené en amont – est ici essentielle. Par ailleurs, le choix du vocabulaire laisse parfois à désirer. Ainsi, désigner un maximum de fonction par le terme « pic » reste inadapté dans ce contexte.

Moins de 15 % des candidats ont tenté de répondre, et parmi eux, seules 5 % des réponses peuvent être considérées comme correctes. Ce faible taux de réussite est d'autant plus regrettable que la question est accessible indépendamment des résultats obtenus aux questions précédentes et permet donc de valoriser des compétences de base. Il est rappelé aux candidats que la définition du rendement repose sur le rapport entre une énergie utile et une énergie dépensée (ou coûteuse). Encore faut-il préciser et justifier ce que recouvre chacun de ces termes dans le contexte du problème. La réponse attendue doit aller au-delà de la simple définition formelle, en identifiant clairement les formes d'énergie concernées et en motivant leur origine ou leur valeur, que ce soit par un raisonnement qualitatif ou un calcul explicite.

**Q10** Le positionnement des points sur l'abaque est souvent trop approximatif. Quelques copies vont jusqu'à placer le point A à droite de l'isentropique passant par B, ce qui implique une diminution d'entropie physiquement impossible dans la turbine calorifugée. La donnée du haut de page 3 « En sortie de la turbine basse pression, le fluide, alors sous forme de vapeur juste saturante » n'est que très rarement exploitée correctement. Cette indication doit amener le candidat à positionner le point E sur la courbe de saturation. L'énoncé demande explicitement de représenter l'évolution entre les différents états ; le jury attend des courbes orientées par des flèches entre deux états consécutifs au cours de la transformation. Relier les points par des portions de droites n'est pas pertinent.

**Q11** Un nombre encore important de copies effectue une application numérique de la loi de Laplace en conservant des températures en degrés Celsius, ce qui est une erreur conceptuelle de base. Au-delà de cette confusion d'unités, beaucoup de candidats se contentent d'affirmations vagues du type « la différence est de 20 °C donc le modèle du gaz parfait est valide », sans réelle justification quantitative ; en l'occurrence, comparer les valeurs théoriques et expérimentales par un calcul d'écart normalisé ou z-score, ou même par un écart relatif, peut permettre une évaluation plus objective de la pertinence de l'approximation. De façon plus générale, une grandeur n'est considérée comme négligeable que lorsqu'elle est comparée à une autre de même dimension. Pour apprécier le caractère isentropique d'une transformation, il ne suffit pas d'un constat qualitatif : il faut idéalement évaluer l'écart d'entropie ( $s_B - s_A$ ) et le comparer aux autres variations du système. Enfin, si l'énoncé demande clairement de déterminer la température en sortie de turbine dans l'hypothèse du gaz parfait, certains candidats, bien qu'appliquant correctement la loi de Laplace, l'utilisent à mauvais escient pour déterminer la pression en sortie.

**Q12** Question globalement réussie. Certains candidats traduisent néanmoins le régime stationnaire sans variation de section offerte à l'écoulement par l'égalité des vitesses en A et B sans tenir compte de la variation de masse volumique qui intervient dans la conservation du débit massique ; en cause, la confusion entre débit massique et débit volumique (parfois implicite), le fluide étant ici compressible. Cette question est l'occasion de constater que certains confondent « vitesse constante » et « vitesse uniforme ». Enfin, obtenir des vitesses de quelques millimètres

par seconde ou de plusieurs dizaines de kilomètres par seconde devrait alerter le candidat sur la présence d'une erreur de calcul manifeste.

**Q13** Un nombre significatif de copies mobilisent le théorème de Bernoulli. Il est important de rappeler que ce théorème ne s'applique rigoureusement qu'aux fluides incompressibles. Paradoxalement, certains candidats indiquent correctement les hypothèses du théorème de Bernoulli, y compris l'incompressibilité, tout en les appliquant à un gaz compressible, ce qui révèle une erreur de jugement sur la validité du modèle choisi. De même, limiter la démarche à des considérations purement mécanique dans cette partie du problème qui met en jeu des échanges d'énergie sous forme thermique dénote une certaine absence de sens physique. La question appelle l'application du premier principe pour un fluide en écoulement. Les hypothèses énoncées par le sujet doivent être réécrites ; à ce titre, par exemple, seulement 10 % des copies ayant traité cette question énoncent explicitement l'hypothèse du régime stationnaire lors de l'utilisation du premier principe industriel.

Le jury conseille vivement aux candidats de procéder comme suit :

- Commencer par indiquer l'organe/machine où le premier principe pour un fluide en écoulement stationnaire va être utilisé et l'hypothèse d'un régime stationnaire, en écrivant, par exemple :  
« On applique le premier principe industriel (ppi) entre A et B en régime stationnaire (RS). »
- L'énoncé demandant d'utiliser plusieurs fois le premier principe, il est possible de simplifier par la suite en écrivant par exemple « ppi entre B et C en RS ».
- Écrire la totalité de l'équation issue du premier principe industriel, soit :

$$D_m \left[ h + \frac{v^2}{2} + gz \right]_A^B = P_{th} + P_u$$

- Citer explicitement les hypothèses de l'énoncé ou rappeler les résultats précédents pour simplifier chaque terme. Par exemple, la turbine étant horizontale, on considérera l'absence de variation de l'énergie potentielle entre A et B. De plus, d'après **Q13**, la vitesse débitante est supposée constante ; dès lors, on considérera que la variation d'énergie cinétique  $\Delta \frac{v^2}{2}$  entre A et B est nulle. La turbine est supposée calorifugée, ainsi, la puissance thermique échangée par le fluide avec l'extérieur est considérée comme nulle. Finalement :

$$D_m(h_B - h_A) = P_u$$

- Porter attention à ce que demande l'énoncé, en l'occurrence, évaluer la puissance mécanique transmise à l'axe de rotation. Or, dans ce qui précède,  $P_u$  correspond à la puissance reçue algébriquement entre l'entrée et la sortie ; il s'agit donc de calculer  $-P_u$ .
- Procéder enfin aux différents calculs suggérés par les sous-questions.

Pour cette dernière étape, il est nécessaire de relever graphiquement les valeurs des enthalpies du fluide en A et B, ce qui, dans le contexte de l'abaque fournie, n'autorise pas plus de 2 chiffres significatifs.

**Q14** Cette question est assez souvent mal interprétée par les candidats qui ne cherchent pas quel serait l'état de la sortie de l'unique turbine isentropique partant d'une entrée dans l'état A mais qui imaginent une évolution directe de A à E qui pourtant ne saurait être isentropique. Pour répondre à cette question, il est vivement conseillé de placer sur l'abaque le point hypothétique correspondant aux hypothèses de l'énoncé (transformation isentropique et vapeur saturante en sortie de la turbine), puis procéder comme en **Q13**.

**Q15** Même type de remarques que précédemment.

**Q16** Même type de remarques que précédemment.

**Q17** Cette question très abordable requiert l'exposé d'un raisonnement clair et structuré. Or, un grand nombre de copies se contentent de dérouler une suite d'équations aboutissant à un résultat certes numériquement correct, mais sans formalisme ni justification physique. Aussi, il convient par exemple de définir précisément tantôt le système « eau de mer » tantôt le système « vapeur d'eau » avant d'appliquer le premier principe de la thermodynamique en régime stationnaire. L'emploi de la relation  $\Delta h = c\Delta T$  suppose de mentionner que le système est une phase condensée, pour justifier l'approximation. Le jury rappelle qu'il n'est nullement question d'une « seconde loi de Joule », ici. De même, pour la relation  $\Delta h = -\ell_{\text{vap}}(T)$  doit être explicitement rattachée à l'hypothèse de liquéfaction totale de la vapeur dans le condenseur. Enfin, le candidat doit mobiliser l'hypothèse relative au caractère calorifugé de l'échangeur thermique afin de relier les deux bilans d'enthalpie massique, conformément au principe de conservation de l'énergie sans pertes.

À noter que certains candidats obtiennent une température de rejet indépendante du débit ou encore une température numériquement supérieure à la température d'ébullition, sans questionner la pertinence de leur résultat ni la validité du modèle proposé.

**Q18** Une réponse comme  $\tau_{\text{th}} \gg \tau_{\text{conv}}$  ne peut être valorisée si le candidat n'explique pas les définitions de chacun des termes ni l'interprétation physique qu'il en fait.

**Q19** Même type de remarques qu'à la question **Q14**.

**Q20** La notion de vitesse relative, pourtant suggérée par l'énoncé, n'est que rarement utilisée pour le calcul de la force de portance. Nombre de candidats se contentent de recopier l'expression fournie par l'énoncé sans valeur ajoutée, c'est-à-dire sans en expliciter vitesse ni surface à considérer. Le choix de la vitesse intervenant dans le calcul de la puissance n'est que très rarement correct.

**Q21** Moins de 1 % des candidats parviennent à obtenir au moins la moitié des points à cette question de cours, pourtant directement issue du programme officiel de la filière. Ce constat est à la fois surprenant et préoccupant, s'agissant d'une connaissance théorique fondamentale dont la maîtrise est explicitement attendue à ce niveau.

**Q22** Les indications de l'énoncé suffisent pour traiter cette question sans que les précédentes soient nécessairement un succès pour le candidat. Il est regrettable que seulement 10 % des candidats ne s'y soient risqués.

**Q23** Question rarement traitée.

**Q24** Question de cours sans difficulté particulière.

**Q25** Si l'expression générale de la puissance moyenne est bien connue, rares sont les candidats ayant considéré l'existence des deux phases.

**Q26** Des confusions fréquentes sont observées entre le nombre de phases et le nombre de paires de pôles de la machine, traduisant une méconnaissance de concepts fondamentaux. Par ailleurs, un nombre non négligeable de copies présentent des valeurs de vitesse de rotation manifestement aberrantes – allant de quelques tours par minute à plusieurs millions de tours par seconde, sans que cela ne suscite de remise en question ou de commentaire critique de la part du candidat. La valeur de  $3000 \text{ tr} \cdot \text{min}^{-1}$  est pourtant explicitement donnée dans l'énoncé pour la turbine haute pression, ce qui, l'arbre étant commun à l'ensemble des turbines ainsi qu'à l'alternateur, peut

permettre une vérification simple de la cohérence du résultat. Enfin, il n'est pas rare d'observer des erreurs dans la conversion d'unités ( $\text{rad.s}^{-1}$  en  $\text{tr.min}^{-1}$ ).

**Q27** Des erreurs trop fréquentes de signe sont relevées dans cette unique loi des mailles.

**Q28** L'exploitation graphique conduit le plus souvent à la détermination des coefficients de proportionnalité de la tension de phase réduite et du courant d'excitation réduit sans que ces valeurs soient exploitées ensuite. L'exposé d'un raisonnement construit est, dans la plupart des copies, absent. Il n'est pas rare d'observer des confusions dans l'utilisation de la notation complexe et par suite des erreurs de calculs, notamment du module.

**Q29** De nombreuses copies présentent des diagrammes de Fresnel incorrects, notamment sans prise en compte du déphasage entre la tension et l'intensité. Il est pourtant fondamental de se souvenir que, dans une résistance pure, tension et courant sont en phase, tandis que, pour une inductance idéale, la tension est en avance de  $\pi/2$  sur le courant. Plusieurs tracés s'écartent des conventions d'orientation fixées dans le sujet (figure 8), ce qui rend l'interprétation du diagramme ambiguë, voire incorrecte.

**Q30** Les démarches de résolution n'aboutissent que dans de rares cas. Des confusions sont relevées dans l'interprétation et l'exploitation du diagramme de Fresnel, en particulier concernant la distinction entre les grandeurs vectorielles et leurs modules.

Les questions **Q32**, **Q33** et **Q34** n'ont été que très rarement traitées.

#### 4.4. Conclusion

Cette année encore, le jury adresse ses félicitations aux candidats ayant remis des copies de grande qualité, témoignant d'un travail rigoureux et soutenu au cours des deux années de classes préparatoires. Le sujet proposé, dense et exigeant, requérait une réelle agilité intellectuelle tant dans l'appropriation du contexte que dans la clarté de la démarche de résolution et la maîtrise des calculs. Les candidats présentant une parfaite maîtrise des notions du programme, alliée à une compréhension fine des concepts sous-jacents, sont clairement valorisés. Leur capacité à mobiliser les connaissances de manière pertinente, structurée et précise constitue un critère d'évaluation déterminant. À l'inverse, une copie dépourvue d'une assimilation solide du cours et d'une bonne maîtrise des techniques mathématiques usuelles conduit inévitablement à une évaluation sévère. Le jury espère que les remarques formulées dans ce rapport aideront les futurs candidats à mesurer le niveau d'exigence attendu, les inciteront à étudier sérieusement et en profondeur les notions du programme, à en saisir pleinement le sens et à donner le meilleur d'eux-mêmes pendant leur préparation.