

EPREUVE DE PHYSIQUE - CHIMIE

Durée : 4 heures

PRESENTATION DU SUJET

Le problème illustrait les propriétés électriques, thermiques et chimiques du cuivre et comportait trois parties totalement indépendantes :

- Etude des caractéristiques électriques d'un conducteur électrique, avec application au cuivre, suivie de la détermination expérimentale de la résistivité électrique de ce métal ;
- Etude des caractéristiques thermiques d'un métal, illustrée par la mesure de la capacité thermique du cuivre, puis la détermination de sa conductivité thermique par la méthode flash ;
- Analyse de l'oxydation sèche du cuivre, assortie de l'étude structurale du métal et de son oxyde, ainsi qu'un approfondissement sur la croissance de la couche d'oxyde.

COMMENTAIRE GENERAL DE L'EPREUVE

Toutes les questions, prises individuellement, ont été correctement résolues par un certain nombre de candidats ; malheureusement un trop grand nombre d'entre eux a rencontré des difficultés à exploiter l'énoncé (les réponses à un nombre significatif de questions étaient implicitement contenues dans les paragraphes introductifs ou de liaison entre les diverses parties) et à rédiger leurs solutions de façon simple et compréhensible.

Au-delà des questions purement qualitatives souvent mal exposées, la rédaction se réduit trop souvent à un mot, à une formule débarquant de nulle part ou à une succession d'équations sans explication ni articulation ; de nombreux candidats se sont contentés de survoler le sujet dans le seul objectif de compiler un maximum de points. Que ceux qui leur conseillent d'agir de la sorte soient bien conscients qu'ils ne leur rendent pas forcément service : un ingénieur, dans sa vie professionnelle passe beaucoup plus de temps à expliquer, à communiquer qu'à aligner des équations ou des formules ! Pour compléter, signalons que l'orthographe et style deviennent de plus en plus pauvres.

Malgré les remarques formulées chaque année dans tous les rapports, les candidats font toujours preuve de malhonnêteté intellectuelle en voulant s'approprier des résultats à démontrer (ou en résolvant les calculs à l'envers).

Les analyses des résultats sont presque systématiquement absentes ou fausses. Dès qu'une question ne semble pas requérir quelque équation ou calcul précis mais nécessite plutôt de réfléchir à partir d'informations fournies, elle fait fuir les candidats.

Chacune des sous parties commençant par des questions élémentaires ont été abordées ; mais dès lors que les questions suivantes commençaient à assembler les résultats de ces premières questions, les candidats ont très souvent renoncé à poursuivre.

Les applications numériques étaient relativement nombreuses, l'épreuve étant focalisée sur la détermination expérimentale de grandeurs physiques ; elles ont été traitées de façon

mécanique, sans se soucier de l'ordre de grandeur et encore moins des unités. Les calculs d'erreurs demandés à l'issue des déterminations expérimentales des conductivités thermique et électrique ont été soit ignorées soit abordées du bout des doigts comme si certains découvraient leur existence pour la première fois. Un ingénieur, sous le joug de l'assurance qualité, ne peut raisonnablement travailler sans évaluer la précision de ses résultats expérimentaux.

ANALYSE PAR PARTIE

1^{ère} Partie : Caractéristiques électriques du cuivre

A / Approches microscopiques et macroscopiques

Les expressions de la densité volumique de courant et de la conductivité électrique ont été correctement établies pour un bon nombre de candidats. Seules ombres au tableau : erreurs sur l'évaluation de la vitesse moyenne, mauvaise interprétation de la notion de durée moyenne entre deux collisions, unités bizarres pour la mobilité, valeurs de τ fantaisistes (car non conversion des cm^{-3} en m^{-3}).

L'approche énergétique, demandant d'écrire le travail de la force électrostatique puis la puissance dissipée dans le conducteur, n'a donné lieu qu'à des réponses sur la puissance sans la moindre explication ; les calculs de résistances qui en découlaient ont vu fleurir le lot habituel de calculs « à l'envers » pour retrouver un résultat connu ou figurant dans la calculette.

B / Application au cuivre

Si le nombre d'électrons libres par unité de volume du conducteur a été correctement obtenu, par contre la vitesse moyenne des électrons s'est vue étalée sur une gamme impressionnante de valeurs puisque la vitesse de la lumière a été souvent largement dépassée !

Les candidats confondent semi-conducteurs et supraconducteurs, de même qu'ils distinguent difficilement les isolants des conducteurs, citant comme excellents conducteurs de l'électricité le silicium, la silice et le diamant. Pour un certain nombre, les supraconducteurs sont des conducteurs pour lesquels la vitesse de déplacement des électrons est supérieure à la vitesse de la lumière !

Les questions relatives à l'évolution de la résistance d'un conducteur en tenant compte de la variation de sa résistivité en fonction de la température n'ont intéressé qu'un nombre limité de candidats ; pour ces derniers, l'écriture de la résistance en fonction de la température a été correcte, mais la prise en compte de l'influence de la dilatation (sur la longueur du conducteur mais surtout sur sa section) n'a pas été réussie.

C / Détermination expérimentale de la résistivité électrique du cuivre

Cette sous partie, beaucoup plus pratique, demandant plus de bon sens et d'analyse expérimentale que le recours à des formules toutes faites n'a pratiquement pas été traitée ; les candidats étaient pourtant guidés pas à pas, à chaque étape du processus menant à la mesure de la résistivité (méthode de Van der Pauw), avec passage obligé par la densité volumique de courant, le champ électrique et la différence de potentiel, mais ils n'ont jamais compris le mode de passage du courant dans le conducteur ni analysé la géométrie du système alors qu'il

était précisé que la diffusion du courant était radiale. Pire, ils n'ont jamais su définir une ligne de courant autrement que par la formule $\vec{E} \wedge \vec{\ell}$! Ils ont de plus confondu le conducteur avec une résistance élémentaire alors que la différence de potentiel aux bornes du conducteurs ne pouvait s'obtenir qu'en faisant circuler le champ électrique.

2^{ème} Partie : Caractéristiques thermiques du cuivre

A / Conduction thermique

Le bilan thermique préliminaire sur une tranche de métal a donné lieu à des développements mathématiques bizarres, pas toujours soutenus par le sens physique ..., mais aboutissant tous à la relation demandée, fournie dans l'énoncé ! Puissent les candidats mettre fin à ces pratiques de bas niveau.

La question sur la loi de Fourier, demandant aux candidats d'y associer les unités des grandeurs mises en jeu fut un test édifiant du niveau actuel des candidats. Les points étaient attribués de façon binaire, le concepteur de l'épreuve estimant qu'il ne sert à rien d'écrire la formule de Fourier si on ne sait pas quelles grandeurs elle implique ni ses unités ; le résultat fut édifiant : seuls 36% des candidats ayant traité cette question reçurent les points correspondants !

De la même façon, l'équation de la chaleur est « balancée » et l'unité de la diffusivité est fausse dans un tiers des cas, dès lors qu'il est demandé de ne se servir exclusivement des grandeurs physiques et non de passer par l'équation différentielle.

L'évaluation de la durée d'établissement du régime permanent du phénomène diffusif a donné lieu à l'écriture – sans aucune justification physique – de formules plus ou moins heureuses, malheureusement rarement accompagnées de l'application numérique et surtout de son analyse.

B / Mesure de la capacité thermique du cuivre

Cette sous partie, de nature expérimentale, consacrée à l'étalonnage d'un calorimètre et à son utilisation pour déterminer une capacité thermique massique n'a été abordée que par un nombre extrêmement réduit de candidats (avec succès d'ailleurs), comme si la majorité méprisait ces notions de première année, illustrées en travaux pratiques. Pour ceux qui ont tenté leur chance, un manque évident de rigueur dans le bilan enthalpique les a contraints à renoncer. La notion d'équivalent en eau du calorimètre semble relever d'un lointain passé !

C / Détermination expérimentale de la conductivité thermique du cuivre

La méthode flash, de détermination de k , ne nécessitait aucun raisonnement majeur, la solution de l'équation de la chaleur dans les conditions particulières de l'expérience étant rappelée ; il était seulement demandé aux candidats d'exploiter cette solution en fonction des résultats expérimentaux fournis.

Les candidats ont rencontré peu de difficultés à écrire les deux lois simplifiées de variation des températures des deux faces de la lame, par contre un sur deux bloqua dès lors qu'il fallu les tracer (et il s'agissait de fonctions affines de t !) en fonction du temps. Un nombre limité de candidat exploita la pente commune de ces droites et l'écart constant qui les séparent pour remonter – via quelques applications numériques souvent laborieuses et entachées de fautes

d'homogénéité des unités – à la conductivité puis la diffusivité (dont l'ordre de grandeur était fourni auparavant dans l'énoncée).

3^{ème} Partie : Phénomènes d'oxydation du cuivre

A / Oxydation du cuivre

La première question, demandant de définir la variance d'un système où le métal est en présence de son oxyde, illustre parfaitement la tendance actuelle : les candidats dans leur presque totalité répondent à une question de définition par une formule ! Pas la moindre trace de paramètres intensifs, de paramètres indépendants, d'état d'équilibre du système ... La sanction a été radicale, même avec une valeur exacte de v. Des valeurs négatives de la variance ont même été rencontrées, tout comme pour le nombre d'oxydation du cuivre.

Alors que les tracés des enthalpies libres standard des réactions d'oxydation du cuivre étaient fournis sur un document annexe, les candidats ont eu des difficultés à placer correctement le métal et l'oxyde correspondant alors que les tracés d'Ellingham sont un « monument » du programme de Chimie en PSI et qu'il est demandé pratiquement dans chaque épreuve. Le tracé relatif à l'oxydation de Cu₂O en CuO donna des résultats plus ou moins folkloriques, certains l'imaginant totalement en dehors des échelles prévues ...

L'étude de l'équilibre de dismutation de l'oxyde cuivreux en oxyde cuivrique et en cuivre métal a été très mal traitée. Seuls quelques candidats ont pu montrer que Cu et CuO ne peuvent coexister et qu'il y avait lieu de supprimer le tracé [2].

L'utilisation de l'échelle des pressions, parallèlement au tracé du diagramme d'Ellingham eut peu de succès alors qu'il s'agit d'une approche simple et classique pour déterminer sans calcul thermodynamique la stabilité d'un constituant (oxydation ou non du cuivre) en fonction des conditions de température et pression partielle de dioxygène.

Pour un grand nombre, le cuivre, à température ambiante et sous pression atmosphérique ne s'oxyde pas ; n'ont-ils jamais observé le toit de certaines de nos cathédrales ou la statue de la Liberté ?

B / Etude structurale

La cristallographie a été abordée par pratiquement tous les candidats, avec succès pour les deux premières questions, de façon plus fantaisiste par la suite avec des densités d'atomes de 10⁻²⁹ m⁻³ (heureusement que l'étymologie du mot atome ne leur était pas demandée !). Le dénombrement de sites octaédriques est loin d'être en accord avec leurs positions et la représentation qui en est faite. Beaucoup trop de candidats imaginent faire entrer dans des sites octaédriques des atomes de rayon supérieur à celui des atomes constituant la structure de base ! Il n'est pas rare de trouver des rayons atomiques ou des paramètres de maille inférieurs au picomètre ainsi que des rayons atomiques supérieurs au paramètre de la maille.

En ce qui concerne la structure de l'oxyde cuivreux (qui était fournie), l'analyse des documents fournis a été peu abordée alors que les résultats étaient très simples ; il est vrai qu'en confondant trièdre et tétraèdre, et en ignorant la notion de régularité d'un tétraèdre, il leur restait encore bien du chemin à faire ... Quant à la question sur la nature des liaisons chimiques – intermédiaire entre ionique et covalente – les examinateurs eurent droit au lot

habituel d'horreurs, telles les liaisons hydrogène, de Van der Waals ou les forces d'interaction gravitationnelle.

C / Croissance de la couche d'oxyde

La croissance de la couche d'oxyde à la surface du métal étant expliquée, l'étude se résumait à une exploitation de la loi de diffusion de Fick et à une analyse de résultats expérimentaux, traduisant l'influence de la température à pression de dioxygène constante puis celle de la pression partielle de dioxygène, à température constante.

L'unité du coefficient de diffusion ne fut pas mieux écrite que celle de k dans la loi de Fourier. L'établissement de la loi de croissance n'a jamais été mené avec rigueur, mais souvent en jouant à la devinette entre la loi finale (fournie) et le tableau de valeurs numériques. Peu de candidats ont trouvé la bonne expression de l'évolution de la masse d'oxyde mais tous ceux qui ont abordé cette sous partie, à l'aide de tracés fantaisistes ou de simulacres de régressions linéaires, ont quand même « vérifié » la dite loi parabolique !

L'analyse des tracés expérimentaux n'a pratiquement pas été abordée ; la loi d'Arrhenius est « balancée » à qui veut bien la lire, sans aucun commentaire et surtout sans rechercher à l'exploiter. De plus un nombre impressionnant de candidats semble découvrir un tracé log-log ... Citons toutefois que cette dernière partie a été parfaitement résolue par des candidats n'ayant traité que cet aspect dans toute la partie chimie !

ANALYSE DES RESULTATS :

Malgré un barème adapté à la diversité et au grand nombre de questions et favorisant les questions proches du cours, les résultats constatés sont loin d'être satisfaisants. Le niveau général des connaissances a été jugé insuffisant par les correcteurs. Les réponses fournies sont souvent très approximatives, non justifiées, dénotant des connaissances trop superficielles. Les ordres de grandeurs sont trop méconnus des candidats et les pires énormités peuvent être ainsi écrites en matière de physique. La simple lecture de graphes pose des difficultés à bon nombre de candidats.

La rédaction est devenue quasi absente et cette situation s'aggrave au fil des ans. Une nouvelle stratégie s'est installée, elle consiste à ne plus rédiger mais plutôt à compiler les résultats littéraux et éventuellement numériques sans analyse ni commentaires. La réponse par « oui » ou par « non » à la question posée est maintenant courante mais elle reste inacceptable, un résultat donné sans justification ne pouvant pas être pris en compte.

Pour contrecarrer le grappillage de points, des points de bonus sont accordés par les correcteurs aux candidats qui ont été critiques quant à leurs résultats et qui ont conclu une partie entière de l'épreuve sans faute au fil d'une réelle composition.

Après le traitement informatique d'usage, la moyenne s'élève à 9,21 sur 20, avec un écart-type de 3,59. Quelques très bonnes copies ne font malheureusement pas oublier la médiocrité d'une grande moitié des autres.

CONSEILS AUX FUTURS CANDIDATS :

La première recommandation une lecture soigneuse et réfléchie de l'énoncé avant de se lancer dans la rédaction : les réponses à de nombreuses questions ou des informations importantes sont régulièrement glissées par le concepteur dans les phrases introductives ou de liaison entre les diverses parties, dans la formulation proprement dite des questions, sur des schémas explicatifs ou des graphes de résultats et même souvent dans les données numériques.

La préparation à la formation d'ingénieur ne consiste pas à apprendre une collection de formules, ni à les récrire avec l'aide précieuse de la calculatrice, sans justification, mais surtout à savoir analyser les résultats des expériences et leur modélisation. Les candidats ne devront pas se contenter de répondre mathématiquement aux questions posées, mais plutôt s'attacher à donner un sens (chimique ou physique) à leurs réponses et leurs analyses.