

SUJET B PLUS DIFFICILE

Calculatrice autorisée

PARTIE CHIMIE : chlore et eau de javel**Classification périodique des éléments**

Q33. À quelle période et quelle colonne appartiennent les éléments ${}_{11}^{23}\text{Na}$ et ${}_{17}^{35,5}\text{Cl}$?

Préciser la configuration électronique du chlore dans son état fondamental.

Q34. À quelle famille ou groupe appartient le sodium ? Le chlore ? Citer deux autres éléments appartenant à la même famille que le chlore.

Solubilité du chlorure de sodium en solution aqueuse

On appelle solubilité d'une espèce la quantité maximale de cette espèce initialement solide qu'on peut dissoudre dans un litre d'eau. Cette quantité est maximale lorsqu'il reste à l'équilibre une partie du solide non dissoute. La solubilité est notée s et s'exprime usuellement en $\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$.

On se propose de déterminer expérimentalement la solubilité du chlorure de sodium en solution aqueuse à température ambiante.

Dans un bécher contenant 100 mL d'eau, on ajoute environ 60 g de chlorure de sodium. Bien qu'on agite suffisamment longtemps, il reste une partie du solide qui ne s'est pas dissout. On filtre et on récupère le filtrat qu'on dilue au millième. La mesure de la conductance de cette solution diluée donne $G = 780 \mu\text{S}$.

On a réalisé par ailleurs la courbe d'étalonnage $G = f(C)$ pour différentes solutions de chlorure de sodium (**figure 17**), avec C la concentration exprimée en $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$.

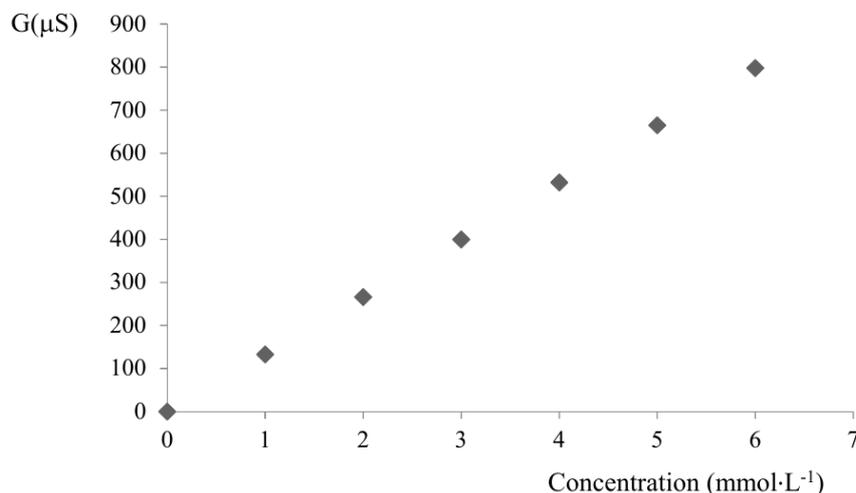


Figure 17 - Courbe d'étalonnage

Q35. De quoi dépend la conductivité électrique d'une solution ? Laquelle des deux cellules A ou B, photographiée (**figure 18**) est associée au conductimètre ? À quel type de mesure peut servir l'autre cellule ?

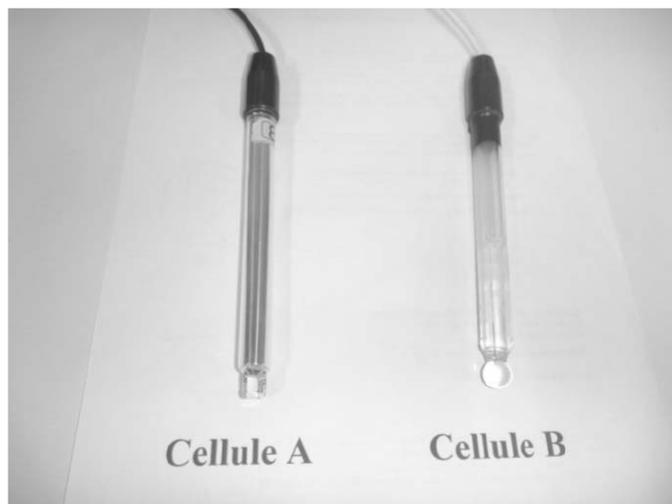


Figure 18 - Cellules

Q36. Déterminer la solubilité s du chlorure de sodium à température ambiante.

Diagramme potentiel –pH (E-pH) du chlore et de l'iode

Les espèces prises en compte dans les diagrammes E-pH du chlore et de l'iode (**figure 19**) sont respectivement HClO , Cl^- , ClO^- , $\text{Cl}_{2\text{aq}}$ et $\text{I}_{2(\text{aq})}$, IO_3^- , I^- .

Ces diagrammes sont construits pour une concentration totale en espèce dissoute de $0,1 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$.

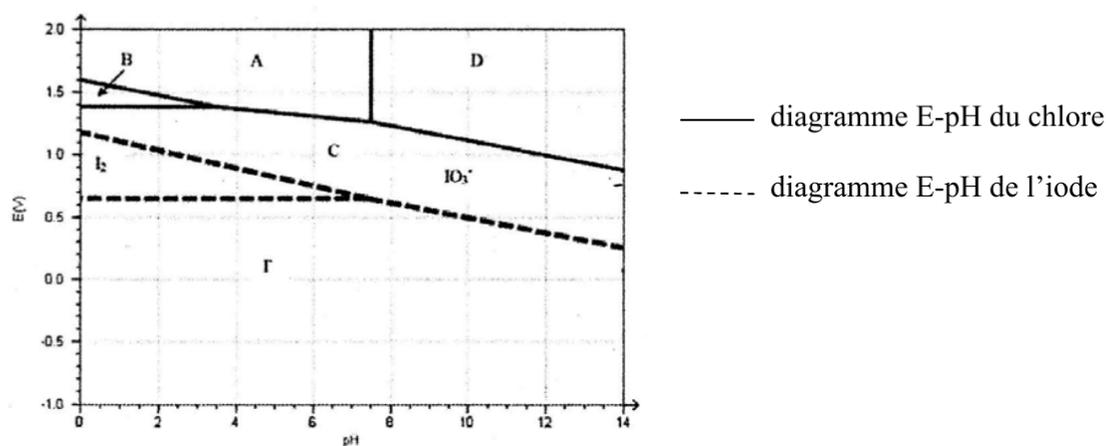


Figure 19 - Diagrammes E-pH du chlore et de l'iode

Q37. Préciser le nombre d'oxydation du chlore dans chacune des espèces considérées. Associer à chacun des domaines (A, B, C, D) une espèce chimique du chlore.

Dosage d'une eau de Javel

Une eau de Javel est une solution basique supposée équimolaire de Cl^- et de ClO^- . On désire vérifier, à l'aide d'un dosage, la concentration C_0 en ClO^- ou Cl^- d'un produit commercial.

Rappels

On rappelle que le diiode est soluble dans l'eau en présence d'une quantité suffisante d'iodure de potassium et prend alors une couleur jaune brunâtre. Il forme en présence d'empois d'amidon un complexe de couleur bleue.

Attention le dichlore gazeux est un produit dangereux.

Protocole

Étape 1 : on dilue d'un facteur 100 le produit commercial. On prélève ensuite un volume V_{init} de solution diluée.

Étape 2 : on ajoute de l'iodure de potassium (K^+ , I^-) en excès.

Étape 3 : on acidifie la solution en ajoutant quelques gouttes d'une solution d'acide chlorhydrique concentrée. La solution prend alors une couleur jaune brunâtre.

Étape 4 : on ajoute une faible quantité d'empois d'amidon pour que le dosage ne soit pas perturbé. La solution est alors de couleur bleue intense.

Étape 5 : on dose alors la solution par une solution de thiosulfate de sodium ($2Na^+$, $S_2O_3^{2-}$) de concentration connue C_1 . On note V_{eq} le volume de thiosulfate versé à l'équivalence, repéré par le changement de couleur.

Q38. Écrire l'équation bilan de la réaction chimique qui s'est produite lors de l'étape 2. Pourquoi faut-il mettre de l'iodure de potassium en excès ?

Q39. Écrire l'équation bilan de la réaction chimique qui s'est produite lors de l'étape 3. Quel nom porte cette équation d'oxydo-réduction ?

Q40. Pourquoi ne fallait-il pas acidifier la solution avant l'ajout de l'iodure de potassium ?

Q41. Écrire l'équation bilan de la réaction qui a lieu avec le thiosulfate de sodium.

Q42. Déterminer la concentration C_0 en fonction de V_{init} , V_{eq} et C_1 .

PARTIE PHYSIQUE : ETUDE D'UN ELECTROFILTRE INDUSTRIEL

Traitement des fumées industrielles par un électrofiltre

Les poussières, petites particules en suspension dans l'air, sont des polluants fréquemment présents dans les fumées industrielles. Leur émission est soumise à une réglementation toujours plus stricte qui oblige les industriels à équiper leurs installations de dispositifs de dépoussiérage. Les électrofiltres peuvent jouer ce rôle dans des installations aussi variées que les centrales thermiques, les cimenteries, les incinérateurs, les aciéries ou encore les verreries.

Un électrofiltre est essentiellement constitué de deux électrodes entre lesquelles on applique une forte tension électrique. L'une d'elles, appelée collectrice, est mise à la terre alors que l'autre, nommée émettrice, est portée à un potentiel négatif $-U$ provoquant l'ionisation du gaz à son voisinage. Les anions ainsi produits se déplacent vers la collectrice, correspondant au passage d'un courant au travers du gaz. En chemin, certains de ces anions se fixent sur les grains de poussière qui acquièrent ainsi une charge négative. Ces particules polluantes sont alors attirées par la collectrice et s'y fixent en formant un dépôt qu'on élimine en ébranlant l'électrode à coups de marteau (électrofiltre sec) ou en la rinçant par un liquide (électrofiltre humide). Le résidu est récupéré dans des trémies, puis évacué.

Dans les électrofiltres secs, les émettrices sont des fils verticaux et les collectrices des plaques verticales entre lesquelles la fumée à dépoussiérer s'écoule horizontalement (partie gauche de la figure 1). Dans les électrofiltres humides, l'émettrice est un fil vertical et la collectrice un cylindre coaxial, la fumée s'écoulant selon l'axe de ce tube (partie droite de la figure 1).

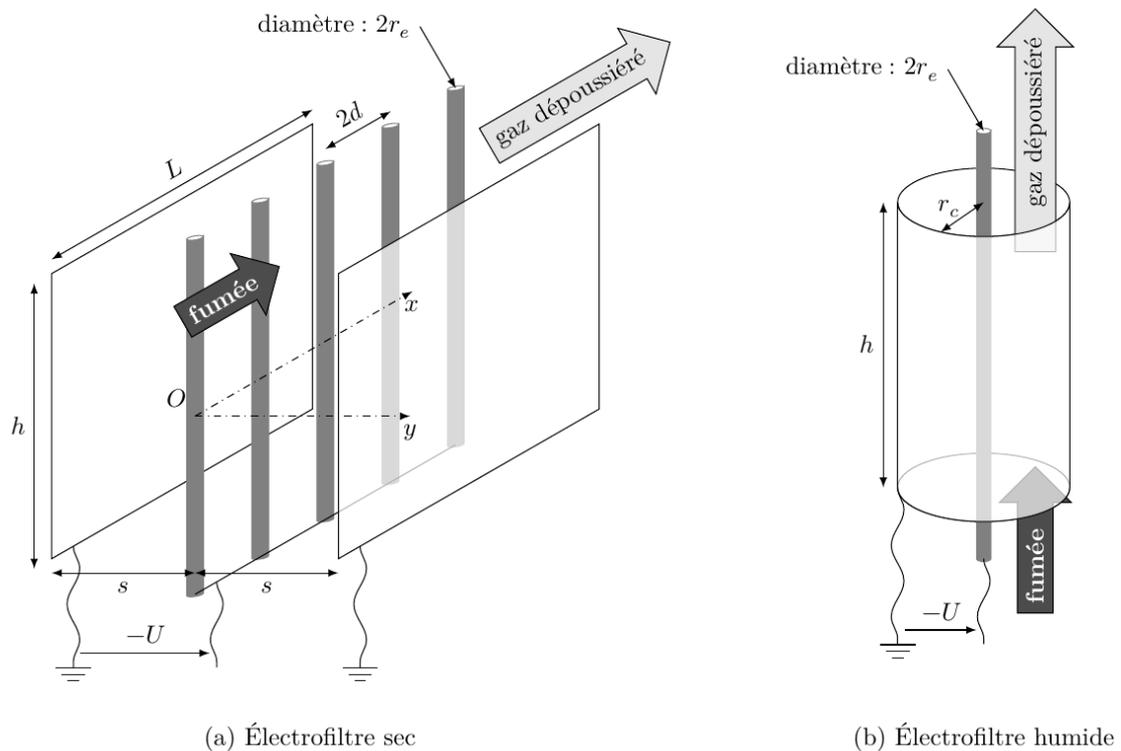


Figure 1 Deux types d'électrofiltres

Ce sujet est accompagné d'un document réponse à rendre avec la copie. Une liste de valeurs numériques et de formules figure en fin d'énoncé.

I Champ électrique dans un électrofiltre

I.A – Champ électrique à vide et tension seuil

Selon des données expérimentales, l'ionisation du gaz au voisinage de l'émettrice se produit lorsque la norme du champ électrique y dépasse une valeur seuil E_0 dépendant du rayon r_e de cette électrode, de la pression et de la température. Dans tout le problème, $r_e = 1,25 \text{ mm}$ et $E_0 = 4,4 \times 10^6 \text{ V}\cdot\text{m}^{-1}$.

I.A.1) Pour une configuration donnée des électrodes, le champ électrique \vec{E} et le potentiel électrostatique V dans l'espace inter-électrode dépendent de la tension U imposée. Pour les déterminer, on se place à la limite d'apparition du courant ce qui conduit à supposer l'espace inter-électrode vide de charge. Dans ces conditions, comment s'écrit l'équation de Poisson ?

I.A.2) Électrofiltre humide

a) On considère tout d'abord l'électrofiltre humide, tubulaire (figure 1b). Le rayon de la collectrice portée à la masse est noté r_c . En choisissant un système de coordonnées bien adapté et en négligeant les effets de bord, de quelles variables le potentiel électrostatique V dépend-il ? Donner son expression en fonction de U , r_e et r_c .

b) Exprimer le champ électrique au contact de l'émettrice et en déduire la valeur U_0 à donner à U pour qu'il atteigne la valeur E_0 .

c) Calculer numériquement U_0 pour $r_c = 150 \text{ mm}$.

I.A.3) Électrofiltre sec

On raisonne toujours sous les hypothèses de la question I.A.1, mais on considère désormais un électrofiltre sec formé de plaques et de fils, caractérisé par les distances s et d définies sur la figure 1a. L'origine des coordonnées est placée sur l'un des fils, à égale distance des deux collectrices. Tout effet de bord étant négligé, le potentiel électrostatique est donné par

$$V(x, y, z) = \frac{U}{\Lambda} \sum_{m=-\infty}^{\infty} \ln \left(\frac{\cosh\left(\frac{\pi(x-2md)}{2s}\right) - \cos\left(\frac{\pi y}{2s}\right)}{\cosh\left(\frac{\pi(x-2md)}{2s}\right) + \cos\left(\frac{\pi y}{2s}\right)} \right)$$

a) Vérifier que cette expression est compatible avec la présence des collectrices et trouver l'expression de Λ en fonction de d , s et r_e .

b) Les équipotentielles sont représentées sur la figure du document réponse. Compléter cette figure en y traçant en couleur des lignes de champ orientées. Quelles sont les zones de fort champ ? Existe-t-il des points où le champ électrique s'annule ?

c) La figure 2 montre le comportement de $|E_y(x=0, y, z=0)|$ en fonction de y . Ce graphique, obtenu pour $d/s = 4/3$, utilise les variables adimensionnées $|E_y|/(U/s)$ (en ordonnée) et y/s (en abscisse).

Quelle valeur U_0 faut-il donner à U pour provoquer l'ionisation près de l'électrode émettrice ? Exprimer la réponse en fonction de s et E_0 , puis estimer la valeur numérique de U_0 pour $s = 150 \text{ mm}$. Comparer l'ordre de grandeur obtenu avec celui concernant l'électrofiltre tubulaire.

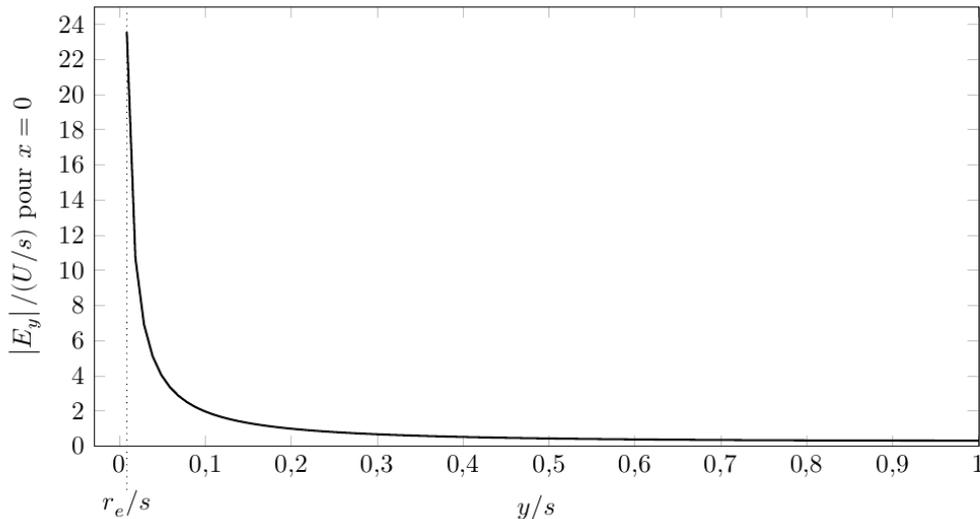


Figure 2 Variations du champ électrique dans un électrofiltre sec

I.B – Influence des charges d'espace

Dès lors que la tension U dépasse la valeur seuil U_0 , un courant d'intensité i s'instaure dans l'électrofiltre et l'espace inter-électrode se peuple d'anions dont la présence, caractérisée par les densités volumiques de charge $\rho(M)$ et de courant $\vec{j}(M)$, modifie le champ électrique. Ces anions sont supposés tous identiques et se déplacent dans le champ électrique $\vec{E}(M)$ avec une vitesse $\vec{v}(M) = -b\vec{E}(M)$ avec $b = 3,1 \times 10^{-4} \text{ m}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ dans les conditions envisagées.

La connaissance des champs couplés $\vec{E}(M)$ et $\rho(M)$ constitue un enjeu majeur car ces grandeurs déterminent la migration des grains de poussière. Dans un électrofiltre sec, leur détermination s'appuie sur de lourdes méthodes numériques. Nous l'abordons ici uniquement dans le cas des électrofiltres humides en négligeant tout effet de bord. L'influence des poussières mobiles sur le champ est négligée.

I.B.1) La collectrice tubulaire et l'émettrice coaxiale ont pour hauteur h . On note $j = \vec{j} \cdot \vec{e}_r$ et $E = \vec{E} \cdot \vec{e}_r$ les projections sur le vecteur unitaire radial usuel des coordonnées cylindriques et r la distance d'un point à l'axe.

Un courant d'intensité $i > 0$ circule radialement d'une électrode vers l'autre. Dans quel sens ? Exprimer j en fonction des variables qui s'imposent.

I.B.2) Exprimer la densité volumique de charge en fonction de i , E , h , r et b .

I.B.3) Quelle équation de l'électromagnétisme exprime localement la modification du champ électrique par les ions ? Montrer qu'elle peut s'écrire sous la forme

$$rE \frac{d(rE)}{dr} = \frac{ir}{2\pi h \varepsilon_0 b}$$

I.B.4) À une certaine distance $r_0 > r_e$ de l'axe, le champ électrique prend la valeur E_0 . En déduire l'expression de E .

I.B.5) Pour r suffisamment grand (quelques centimètres en pratique), on considère généralement que le champ devient grossièrement uniforme. Quelle est alors son expression approchée ? Quelle est ici sa valeur numérique si $i/h = 0,70 \text{ mA} \cdot \text{m}^{-1}$?

I.B.6) Dans cette région de quasi-uniformité, calculer la vitesse des ions, puis la densité volumique de charge ρ et le nombre d'ions par centimètre cube au voisinage de la collectrice ($r = r_c$), en supposant que chacun porte une charge élémentaire.

II Comportement des poussières dans l'électrofiltre**II.A – Charge d'une particule sphérique : modèle de Pauthenier**

On aborde dans cette partie le processus de chargement des poussières, assimilées à des sphères de diamètre $d = 2a$. Ces grains sont initialement neutres mais les anions mobiles le long des lignes de champ les rencontrent et s'y fixent, leur communiquant progressivement une charge $Q(t) < 0$. Le champ \vec{E} étudié dans la partie précédente est désormais supposé uniforme et connu. Chaque grain de poussière chargé et polarisé sous l'influence de \vec{E} déforme localement les lignes de champ. Pour éviter toute confusion, on note \vec{E}_t le champ tenant compte simultanément de \vec{E} et de la présence des grains.

On raisonne sur un grain unique immobile et on adopte momentanément un nouveau système de coordonnées (r, θ, φ) de type sphérique, dont l'origine se situe au centre du grain et tel que $\vec{E} = E \vec{u}_z$ avec $E < 0$ (figure 3). Des considérations d'électrostatique montrent que, à l'extérieur du grain ($r \geq a$), le champ électrique total est donné par

$$\vec{E}_t = \vec{E} + E \frac{\varepsilon_r - 1}{\varepsilon_r + 2} \frac{a^3}{r^3} (2 \cos \theta \vec{u}_r + \sin \theta \vec{u}_\theta) + \vec{E}_1$$

Dans cette expression, \vec{E}_1 désigne le champ que créerait autour d'elle la particule sphérique portant Q si elle était seule dans l'espace. La constante sans dimension ε_r dépend de la nature physico-chimique de la poussière. Les lignes de champ sont tracées sur la figure du document réponse pour $Q = 0$ puis pour une valeur négative de Q .

II.A.1) Calcul de la charge limite

a) Orienter par des flèches bleues les lignes de champ de la figure du document réponse et représenter le mouvement des anions par des flèches rouges. On précise que les lignes de champ qui rencontrent la sphère en la pénétrant ne portent pas d'anions : la sphère peut capturer des anions mais ne peut pas en émettre.

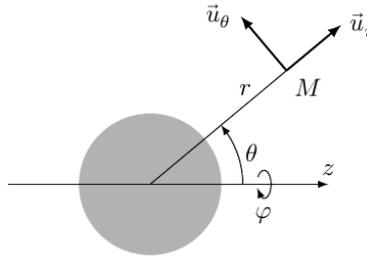


Figure 3 Coordonnées sphériques autour d'une poussière sphérique

b) Quelle est l'expression de \vec{E}_1 ? L'accroissement de $|Q|$ a-t-il tendance à réduire ou à élargir la portion de la sphère d'où *partent*, vers des valeurs croissantes de r , les lignes de champ ? Favorise-t-il ou s'oppose-t-il à l'arrivée de nouveaux anions sur la sphère ?

c) Le grain de poussière atteint sa charge limite Q_{lim} lorsque les lignes de champ sont si distordues qu'aucun anion ne peut plus lui parvenir. Montrer que

$$Q_{\text{lim}} = 4\pi\epsilon_0 a^2 E \left(1 + 2 \frac{\epsilon_r - 1}{\epsilon_r + 2} \right)$$

d) Calculer numériquement Q_{lim} pour $\epsilon_r = 10$, $d = 2a = 2,0 \mu\text{m}$, $|E| = 5,0 \times 10^5 \text{ V}\cdot\text{m}^{-1}$. Combien de charges élémentaires cela représente-t-il ?

II.A.2) Loi horaire et durée de chargement

Le mécanisme décrit dans la question précédente est régi par la loi horaire

$$Q(t) = Q_{\text{lim}} \frac{t}{t + \tau_Q}$$

a) Sachant que τ_Q ne dépend que de ϵ_0 , b et $|\rho|$ (où ρ est la densité volumique de charge des anions), en donner une expression par analyse dimensionnelle. Le résultat exact s'obtient en plaçant un facteur 4 au numérateur.

b) Calculer numériquement la durée t_{90} au bout de laquelle un grain de poussière atteint 90% de sa charge limite pour $b = 3,1 \times 10^{-4} \text{ m}^2\cdot\text{V}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$ et $|\rho| = 5,0 \times 10^{-5} \text{ C}\cdot\text{m}^{-3}$.

c) La fumée poussiéreuse s'écoule à la vitesse $u_0 = 1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ en traversant l'électrofiltre sur toute sa longueur $L = 10 \text{ m}$. Quelle conclusion peut-on tirer de la valeur numérique de t_{90} ?

II.B – Migration des particules

Cette sous-partie constitue un problème non guidé. Il est nécessaire de lui consacrer un temps suffisant. Le barème accordera des importances comparables à cette sous-partie II.B et à l'ensemble des questions II.A.1 et II.A.2.

Dans cette question on suppose que la particule a atteint sa charge limite Q_{lim} qui reste dès lors constante et qu'on pourra simplement noter Q . Elle est transportée par la fumée de température $T = 150 \text{ }^\circ\text{C}$ qui s'écoule, dans le cas de l'électrofiltre sec, à la vitesse $\vec{u}_0 = u_0 \vec{e}_x$ et soumise au champ électrique $\vec{E} = E \vec{e}_y$ supposé constant et uniforme.

On note \vec{w} la vitesse de la particule dans le référentiel lié au fluide en mouvement. Dans le référentiel lié aux électrodes, sa vitesse est $\vec{u}_0 + \vec{w}$.

Déterminer la vitesse limite \vec{w}_{lim} de la particule et un ordre de grandeur du temps qu'il faut pour s'en approcher. Préciser les valeurs numériques pour des cendres volantes de masse volumique $\mu = 2,6 \times 10^3 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ avec les valeurs de la question II.A.1d. D'autres informations utiles se trouvent en annexe.

II.C – Rendement de l'électrofiltre

Dans la suite on suppose que toutes les particules possèdent la vitesse \vec{w}_{lim} que l'on notera simplement \vec{w} . On définit le rendement d'un électrofiltre par

$$\eta = 1 - \frac{c_2}{c_1}$$

c_1 et c_2 désignant respectivement les densités volumiques des poussières (en particules par mètre cube) à l'entrée et à la sortie de la machine. Le caractère turbulent de l'écoulement du gaz rend sa détermination délicate : contrairement à la description donnée en II.B, \vec{u}_0 n'est pas uniforme mais présente des fluctuations à petite

échelle, sauf dans la couche limite près des collectrices où la vitesse du gaz devient plus faible. La trajectoire des poussières est donc aléatoire.

II.C.1) Justifier le caractère turbulent de l'écoulement de la fumée en utilisant l'ordre de grandeur de valeurs déjà fournies.

II.C.2) Modèle de Deutsch

Pour déterminer théoriquement η , on considère la géométrie plane de l'électrofiltre sec (figure 4) et on adopte le modèle de Deutsch fondé sur les hypothèses suivantes :

- grâce au brassage turbulent du gaz, la densité volumique c des poussières ne dépend que de x . Elle est aussi invariable dans le temps ;
- malgré les turbulences, on peut définir une vitesse moyenne d'écoulement du gaz \vec{u}_0 orientée selon \vec{e}_x ;
- dans la couche limite près des collectrices, les particules possèdent une vitesse dont la composante orthogonale à la collectrice est w . Elles seules peuvent atteindre les collectrices.

Pour déterminer $c(x)$, on procède à un bilan de matière pour une tranche de fluide Σ située à l'instant t entre les abscisses x et $x + \Delta x$ (figure 4). Pendant une durée infinitésimale dt , ses deux faces avancent de $u_0 dt$. On note P la longueur totale des collectrices, perpendiculairement au plan de la figure, le long de laquelle s'effectue la capture des particules, et A l'aire de la section au travers de laquelle s'écoule le gaz. Pour un électrofiltre sec, $A = 2sh$ et $P = 2h$ car la précipitation s'effectue sur les deux plaques.

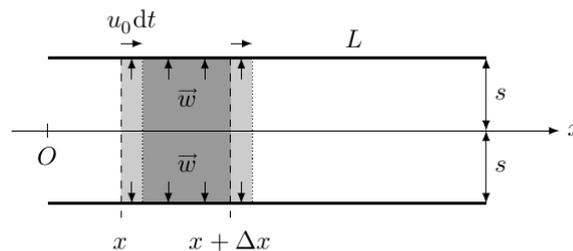


Figure 4

- Soit $N(t)$ le nombre de particules que contient la tranche. Pendant le déplacement envisagé, il varie de dN . Exprimer dN en fonction de $c(x)$, $c(x + \Delta x)$, A , u_0 et dt .
- Dans quel volume se trouvent les particules de Σ qui atteignent la surface collectrice pendant dt ? Quel est leur nombre ?
- En déduire que $\frac{dc}{dx} = -\frac{Pw}{Au_0}c(x)$.
- Exprimer enfin l'efficacité en fonction de L , u_0 , w et s . La calculer numériquement pour $u_0 = 1,0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, $L = 10 \text{ m}$, $w = 0,15 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ et $s = 150 \text{ mm}$.

En pratique, l'efficacité n'est pas aussi élevée pour diverses raisons. La partie suivante donne un aperçu de l'une d'elles.

II.C.3) De la théorie à la pratique

- Pour les très petites particules ($d \lesssim 1 \mu\text{m}$), le calcul de w doit être corrigé. Sachant que le libre parcours moyen des molécules d'air est, dans les conditions envisagées, de l'ordre de 10^{-7} m , indiquer quel concept fondamental de la mécanique des fluides est mis en défaut dans l'étude de la sous-partie II.B.
- En prenant en compte divers autres facteurs correctifs, on obtient finalement les variations de w en fonction de d représentées sur la figure 5.

Expliquer pourquoi le modèle de Deutsch, qui se prête bien à des études en laboratoire sur des poussières calibrées, ne peut pas s'appliquer simplement pour calculer l'efficacité d'un électrofiltre traitant la fumée issue d'une installation industrielle.

- En pratique, l'efficacité d'un électrofiltre est calculée par la relation empirique de Matts et Ohnfeld

$$\eta = 1 - \exp\left(-\left(\frac{w' A_c}{D_v}\right)^k\right)$$

où D_v représente le débit volumique de gaz traversant l'électrofiltre et A_c l'aire des électrodes collectrices. Le paramètre sans dimension k et la grandeur w' , nommée vitesse effective de migration, doivent être déterminés expérimentalement. Justifier que l'on retrouve le résultat de Deutsch en prenant $k = 1$. Que vaudrait alors w' ?

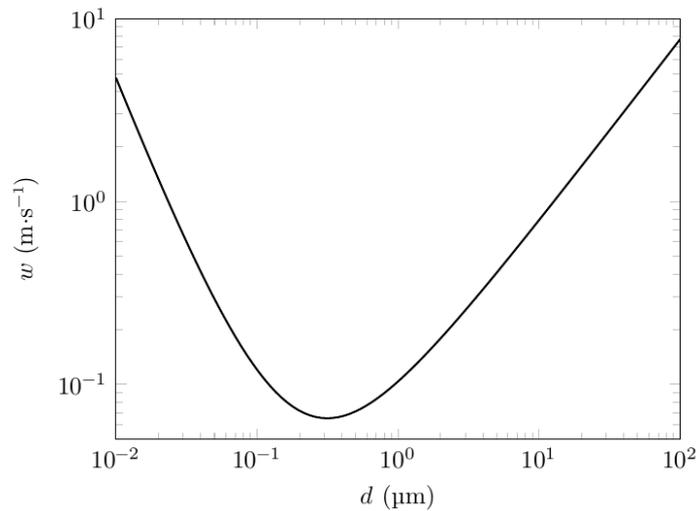


Figure 5 Variation de la vitesse de migration w en fonction du diamètre d des poussières

d) Pour des cendres volantes, un industriel a tabulé $w' = 0,12 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ et $k = 0,5$. Calculer le rendement de l'électrofiltre en reprenant les valeurs de la fin de la question II.C.2.

Analyse vectorielle

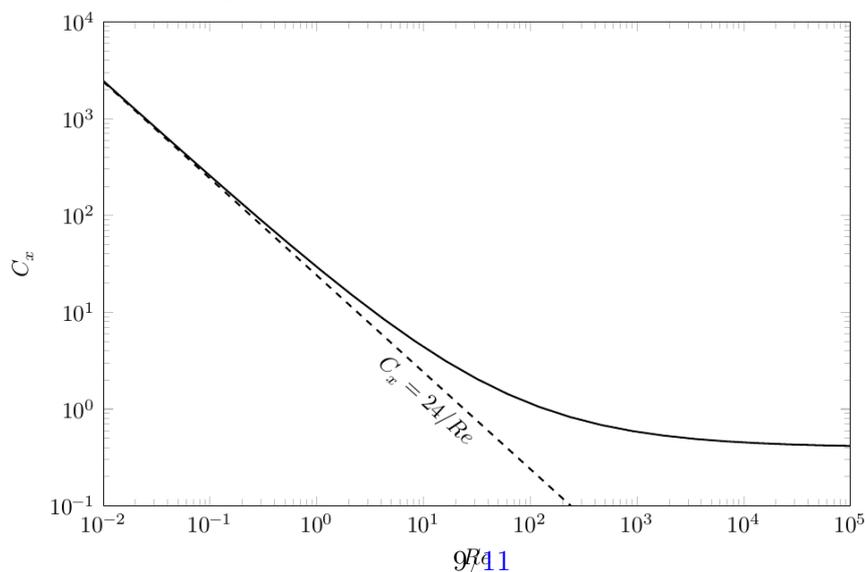
En coordonnées cylindriques

$$\begin{aligned} \operatorname{div} \vec{A}(r, \theta, z) &= \frac{1}{r} \frac{\partial(rA_r)}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial A_\theta}{\partial \theta} + \frac{\partial A_z}{\partial z} \\ \Delta \psi(r, \theta, z) &= \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial \psi}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 \psi}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial z^2} \\ \operatorname{rot} \vec{A}(r, \theta, z) &= \left(\frac{1}{r} \frac{\partial A_z}{\partial \theta} - \frac{\partial A_\theta}{\partial z} \right) \vec{e}_r + \left(\frac{\partial A_r}{\partial z} - \frac{\partial A_z}{\partial r} \right) \vec{e}_\theta + \frac{1}{r} \left(\frac{\partial(rA_\theta)}{\partial r} - \frac{\partial A_r}{\partial \theta} \right) \vec{e}_z \end{aligned}$$

Données numériques

Perméabilité magnétique du vide	$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H}\cdot\text{m}^{-1}$
Permittivité diélectrique du vide	$\varepsilon_0 = 8,85 \times 10^{-12} \text{ F}\cdot\text{m}^{-1}$
Charge élémentaire	$e = 1,60 \times 10^{-19} \text{ C}$
Constante des gaz parfaits	$R = 8,31 \text{ J}\cdot\text{K}^{-1}\cdot\text{mol}^{-1}$
Constante d'Avogadro	$\mathcal{N}_A = 6,02 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$
Constante de Boltzmann	$k_B = 1,38 \times 10^{-23} \text{ J}\cdot\text{K}^{-1}$
Viscosité dynamique de l'air à 150 °C	$\eta_a = 2,4 \times 10^{-5} \text{ Pa}\cdot\text{s}$
Masse volumique de l'air à 150 °C	$\rho_a = 0,84 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$

Coefficient de traînée d'une sphère en fonction du nombre de Reynolds



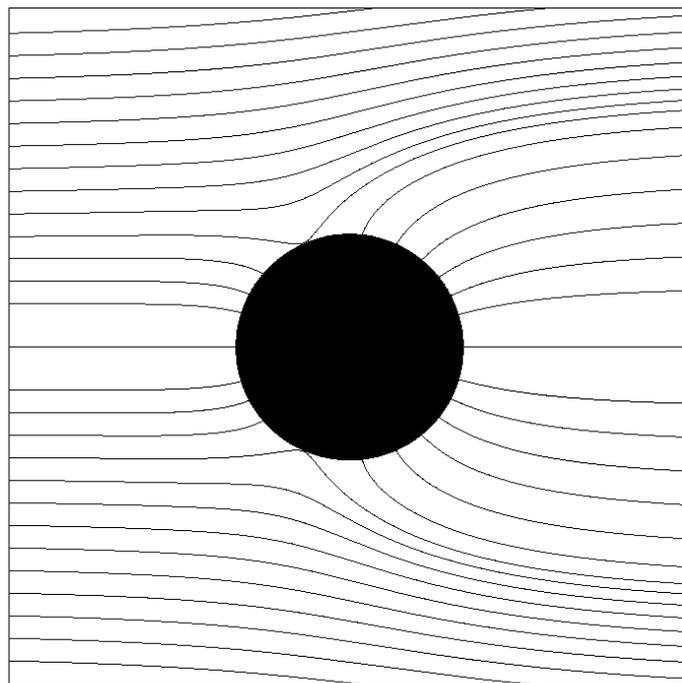
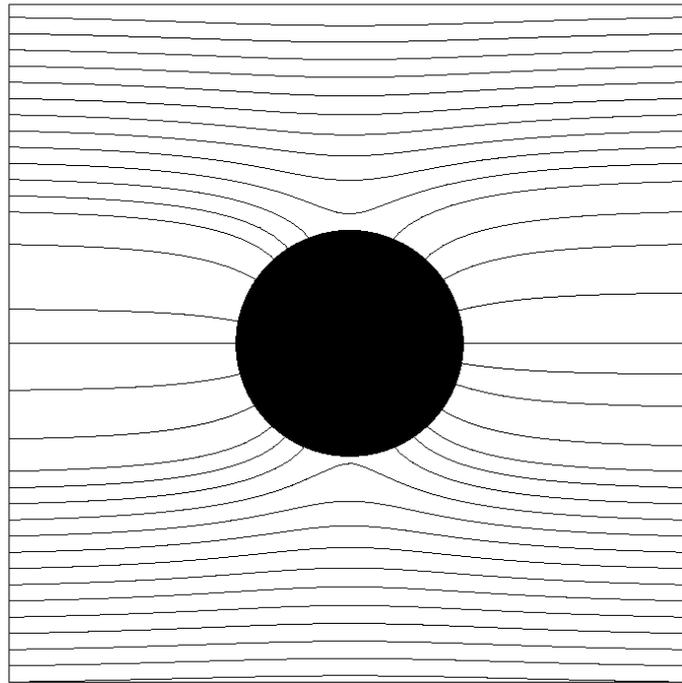


Figure A Lignes de champ autour d'un grain de poussière pour $Q = 0$ (en haut) et pour $Q < 0$ (en bas)

