

Devoir test de physique n° 1

Cet énoncé comporte deux problèmes indépendants. Durée : 4 heures.

L'utilisation d'une calculatrice est autorisée.

Problème A

Circuit secondaire d'une centrale nucléaire

Ce sujet comporte un document réponse à rendre avec la copie. Les données numériques utiles sont fournies en fin d'énoncé.

La France compte 19 centrales nucléaires en exploitation, dans lesquelles tous les réacteurs (58 au total) sont des réacteurs à eau pressurisée. Actuellement, ces installations produisent près de 80% de l'électricité produite en France. Chaque centrale est soumise à un référentiel de normes de sûreté et de sécurité évoluant en fonction des enseignements des incidents passés nationaux ou internationaux.

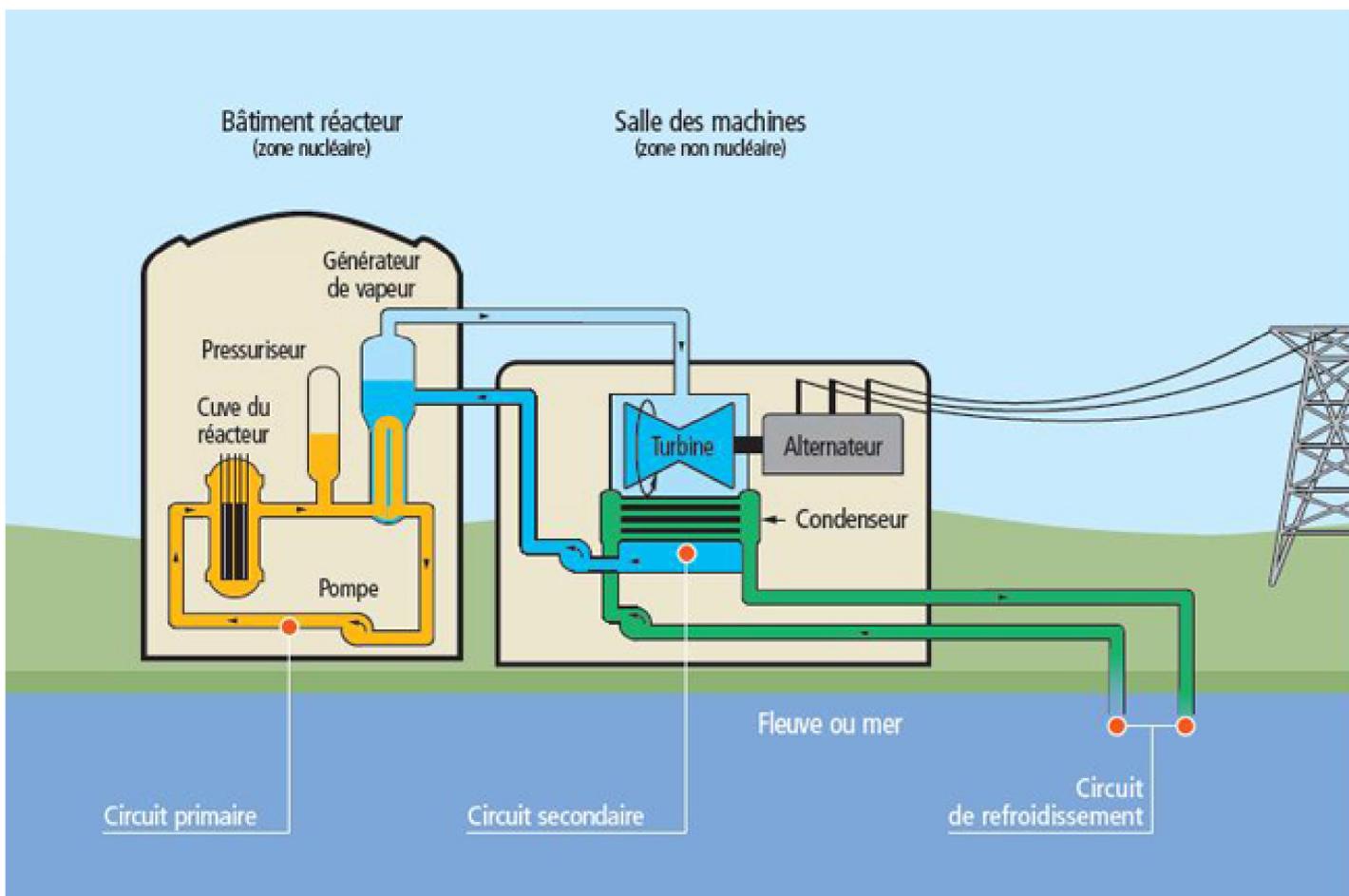


Figure 1 Schéma global d'une centrale nucléaire

Une centrale nucléaire est un site industriel destiné à la production d'électricité, qui utilise comme chaudière un réacteur nucléaire pour produire de la chaleur. Une centrale nucléaire REP (Réacteur à Eau Pressurisée) est constituée de deux grandes zones (voir figure 1) :

- une zone non nucléaire (salle des machines). Dans cette partie, semblable à celle utilisée dans les centrales thermiques classiques, s'écoule de l'eau dans un circuit secondaire. Cette eau est évaporée dans le Générateur de Vapeur (GV) par absorption de la chaleur produite dans la zone nucléaire, puis elle entraîne une turbine (T) couplée à un alternateur produisant de l'électricité, ensuite elle est condensée au contact d'un refroidisseur (rivière ou mer ou atmosphère via une tour aéroréfrigérante) et enfin, elle est comprimée avant d'être renvoyée vers le générateur de vapeur ;
- une zone nucléaire (dans le bâtiment réacteur), où ont lieu les réactions nucléaires de fission, qui produisent de l'énergie thermique et chauffent ainsi l'eau sous pression circulant dans le circuit primaire. Le transfert d'énergie thermique entre le circuit primaire et le circuit secondaire se fait dans le générateur de vapeur, où la surface d'échange entre les deux fluides peut atteindre près de 5000 m² (réseau de tubulures).

Considérons une centrale nucléaire REP produisant une puissance électrique $P_e = 900$ MW. Le fluide circulant dans le circuit secondaire est de l'eau, dont l'écoulement est supposé stationnaire. Le cycle thermodynamique décrit par l'eau est un cycle ditherme moteur. L'eau liquide sera supposée incompressible et de capacité thermique massique isobare supposée constante. Le tableau en fin d'énoncé donne diverses données thermodynamiques relatives à l'équilibre liquide-vapeur de l'eau.

I.A.1) Cycle de Carnot

Dans une première approche simplifiée, on considère le moteur ditherme de Carnot fonctionnant de manière réversible entre deux sources de température T_{ch} et T_{fr} ($T_{fr} < T_{ch}$).

a) Donner, en la redémontrant, l'expression du rendement de Carnot associé à ce cycle.

b) Donner la valeur numérique de ce rendement en prenant $T_{ch} = 543$ K et $T_{fr} = 303$ K, les deux températures extrêmes de l'eau dans le circuit secondaire.

c) Sachant qu'un réacteur REP fournit à l'eau du circuit secondaire, via le générateur de vapeur, une puissance thermique $P_t = 2785$ MW, que vaut le rendement thermodynamique réel de l'installation ? On supposera que la puissance mécanique transmise à la turbine est intégralement convertie en puissance électrique. Commenter.

I.A.2) Cycle de Rankine

L'eau du circuit secondaire subit les transformations suivantes (représentées dans la figure 2)

- de A à B : dans le générateur de vapeur, échauffement isobare du liquide à la pression $P_2 = 55$ bar jusqu'à un état de liquide saturant (état noté A'), puis vaporisation totale isobare jusqu'à un état de vapeur saturante sèche (état B) ;
- de B à C : détente adiabatique réversible dans la turbine, de la pression P_2 à la pression $P_1 = 43$ mbar ;
- en C , le fluide est diphasé ;
- de C à D : liquéfaction totale isobare dans le condenseur, jusqu'à un état de liquide saturant ;
- de D à A : compression adiabatique réversible, dans la pompe d'alimentation, de la pression P_1 à la pression P_2 , du liquide saturant sortant du condenseur. On négligera le travail consommé par cette pompe devant les autres énergies mises en jeu.

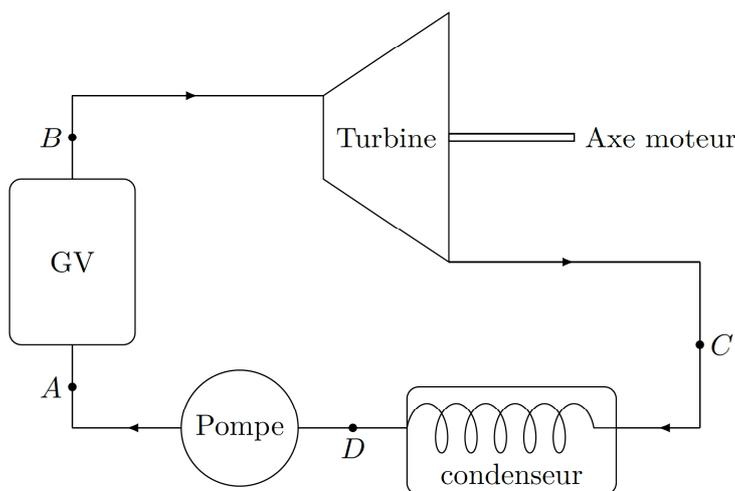


Figure 2 Cycle de Rankine

a) Représenter dans le diagramme de Clapeyron (P, v) l'allure de la courbe de saturation de l'eau, ainsi que les isothermes T_B , T_D et $T_{critique}$, cette dernière température étant celle du point critique de l'eau. Préciser les domaines du liquide, de la vapeur, de la vapeur saturante. Représenter sur ce même diagramme l'allure du cycle décrit par l'eau du circuit secondaire. Indiquer le sens de parcours du cycle et placer les points A , A' , B , C et D .

b) D'après l'extrait de table thermodynamique donné en fin d'énoncé, quelles sont les valeurs des températures, des enthalpies massiques et des entropies massiques aux points A' , B et D ? On pourra donner les valeurs sous forme de tableau.

c) Dans le document réponse figure le diagramme enthalpique (P, h) de l'eau. Placer, avec soin et à l'échelle, les points A' , B , C , D du cycle. On explicitera la méthode.

d) Dans toute la suite, on négligera les variations d'énergie cinétique et potentielle dans les bilans énergétiques. Exprimer alors, sans démonstration, le premier principe de la thermodynamique pour un fluide en écoulement stationnaire recevant de manière algébrique le travail massique utile w_u et le transfert thermique massique q .

e) Exprimer le travail massique w_{BC} reçu par l'eau dans la turbine. Donner sa valeur numérique, en s'aidant du diagramme enthalpique.

f) Exprimer le transfert thermique massique $q_{AA'}$ reçu par l'eau liquide quand elle passe de manière isobare de la température T_A à la température $T_{A'}$ dans le générateur de vapeur. Donner sa valeur numérique : on considérera $T_A \approx T_D$.

g) Exprimer le transfert thermique massique $q_{A'B}$ reçu par l'eau quand elle se vaporise complètement dans le générateur de vapeur. Donner sa valeur numérique.

h) Calculer alors le rendement de Rankine de l'installation. Comparer au rendement de Carnot et commenter. Comparer au rendement réel et commenter.

i) Dans quel état se trouve l'eau à la fin de la détente de la turbine ? Donner le titre massique en vapeur à l'aide du diagramme enthalpique. En quoi est-ce un inconvénient pour les parties mobiles de la turbine ?

I.A.3) Cycle de Rankine avec détente étagée

Le cycle réel est plus compliqué que celui étudié précédemment (voir figure 3). En effet, d'une part, la détente est étagée : elle se fait d'abord dans une turbine « haute pression » puis dans une turbine « basse pression ». D'autre part, entre les deux turbines, l'eau passe dans un « surchauffeur ». Les transformations sont maintenant modélisées par

- de A à B : dans le générateur de vapeur, échauffement isobare du liquide à la pression $P_2 = 55$ bar, jusqu'à un état de liquide saturant (état noté A'), puis vaporisation totale isobare jusqu'à un état de vapeur saturante sèche (point B) ;
- de B à C' : détente adiabatique réversible dans la turbine « haute pression », de la pression P_2 à la pression $P_3 = 10$ bar ;
- de C' à B' : échauffement isobare à la pression P_3 , dans le surchauffeur, jusqu'à un état de vapeur saturante sèche (point B') ;
- de B' à C'' : détente adiabatique réversible dans la turbine « basse pression », de la pression P_3 à la pression $P_1 = 43$ mbar ;
- de C'' à D : liquéfaction totale isobare dans le condenseur, jusqu'à un état de liquide saturant ;
- de D à A : compression adiabatique réversible, dans la pompe d'alimentation, de la pression P_1 à la pression P_2 , du liquide saturant sortant du condenseur. On négligera le travail consommé par cette pompe devant les autres énergies mises en jeu.

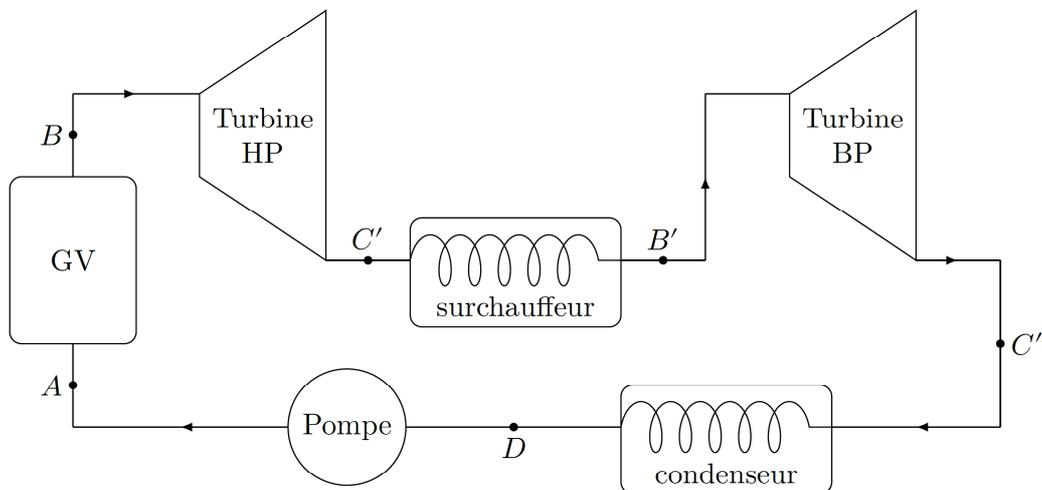


Figure 3 Cycle de Rankine avec une détente étagée

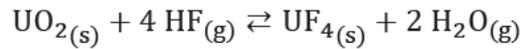
- a) Placer les nouveaux points C' , B' , C'' sur le diagramme enthalpique du document réponse.
- b) Comparer les titres massiques en vapeur des points C' et C'' au titre massique en vapeur du point C . Quel est l'intérêt de la surchauffe ?
- c) À l'aide du diagramme enthalpique, déterminer le nouveau rendement du cycle. Commenter.

Problème B

Diffusion lors d'une réaction à solide consommable

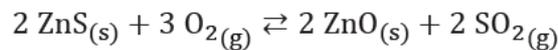
Présentation du problème

Les réactions à solide consommable sont courantes dans les procédés de transformation de la matière. On peut citer la réaction du dioxyde d'uranium (UO_2) avec l'acide fluorhydrique (HF) pour produire le tétrafluorure d'uranium (UF_4) selon la stœchiométrie suivante :



Cette réaction est impliquée dans la conversion du dioxyde d'uranium en hexafluorure d'uranium (UF_6) qui est utilisé dans les deux principaux procédés d'enrichissement de l'uranium (la diffusion gazeuse et l'ultracentrifugation) en raison de son point triple à 64 °C (à 150 kPa).

Un autre exemple est la réaction d'oxydation du sulfure de zinc en présence d'air pour former l'oxyde de zinc, un matériau semi-conducteur qui pourrait remplacer le dioxyde de titane dans les cellules photovoltaïques. La réaction s'écrit :



Dans les deux cas, la réaction met en jeu une phase fluide et une phase solide. Une particularité de ce type de réactions est la formation d'un produit solide poreux qui remplace progressivement le réactif initial. Dans le cas de particules sphériques, on observe un déplacement du front de réaction (l'interface entre le réactif solide non consommé et le produit solide) de l'extérieur de la particule vers le centre en fonction du temps (**figure 1**).

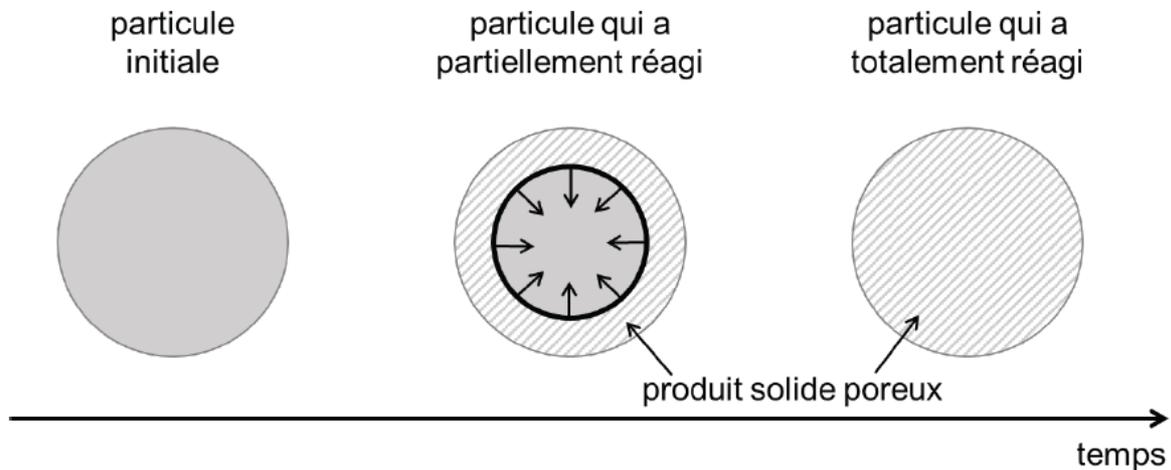


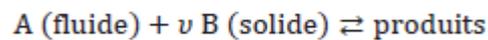
Figure 1 - Représentation schématique de l'évolution du front de réaction en fonction du temps

Les phénomènes physiques et chimiques mis en jeu lors de la réaction sont :

- le transport du fluide réactif à travers la couche limite externe des particules (généralement par convection),
- le transport du fluide réactif à travers la couche de produit solide poreux par diffusion dans les pores,
- la réaction chimique qui est localisée au niveau du front de réaction,
- le transport du produit fluide (s'il existe) dans les pores, puis à travers la couche limite externe.

Le modèle qui permet de représenter ces phénomènes porte le nom de *modèle à cœur rétrécissant*. Dans une version simple de ce modèle, on suppose que le produit poreux a une densité similaire à celle du réactif et que par conséquent le volume final de la particule qui a totalement réagi est le même que celui de la particule initiale. Dans le cas général, la consommation des particules est contrôlée par les trois premiers phénomènes cités précédemment. Cependant, dans certains cas limites, il se peut que l'un des trois phénomènes soit beaucoup plus lent que les deux autres et c'est lui qui va imposer la vitesse de consommation des particules. On parle alors de *phénomène limitant*. Par exemple, si la réaction chimique est très lente par rapport aux phénomènes de transport, ce sera le phénomène limitant ; la vitesse de consommation des particules sera contrôlée par la réaction chimique et on parlera de régime chimique.

Dans la suite, pour généraliser, la réaction entre les particules solides (B) et la phase fluide (A) sera écrite de la manière formelle suivante où ν est le coefficient stœchiométrique devant le solide :



Le but de cette épreuve est de mettre en équation le modèle à cœur rétrécissant permettant de prédire la consommation des particules en fonction du temps.

La **première partie** consiste, dans un premier temps, à établir l'équation aux dérivées partielles régissant l'évolution de la concentration du fluide A dans la couche de solide poreux B ; puis, dans un second temps, une version simplifiée du modèle, permettant d'obtenir des résultats facilement sans avoir recours à la résolution de l'équation aux dérivées partielles, sera déterminée à l'aide d'hypothèses sur le fonctionnement du système physico-chimique.

(Les autres parties ne sont pas traitées dans ce devoir.)

Partie I - Mise en équation du modèle à cœur rétrécissant

L'objectif de cette première partie est d'établir l'équation différentielle qui régit l'évolution de la concentration du fluide A dans la couche de solide poreux B en fonction du temps et de l'espace. Une première version simplifiée du modèle à cœur rétrécissant sera alors déterminée.

I.1 - Étude de la diffusion du fluide dans la couche de produit poreux

Le transport du fluide dans la couche de produit de la réaction a lieu par diffusion dans les pores de ce matériau poreux. La porosité d'un matériau est définie comme le volume des pores divisé par le volume total de matériau poreux. Le volume de matériau poreux inclut le volume de solide (appelé volume structurel) et le volume des pores. La porosité est donc la fraction volumique de vide dans le matériau.

Une étude au laboratoire a permis de déterminer les masses volumiques structurelle (sans la porosité), ρ_s , et apparente (prenant en compte la porosité), ρ_{app} , du produit poreux formé au cours de la réaction. Les valeurs obtenues sont $\rho_s = 2\,500\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ et $\rho_{app} = 1\,250\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$.

Q1. Justifier que $\rho_s > \rho_{app}$.

Donner les valeurs théoriques minimale et maximale de la porosité.

Calculer la porosité, ϵ , du produit à partir des valeurs des masses volumiques structurelle et apparente mesurées au laboratoire.

Pour simplifier, on considère que la particule est un parallélépipède rectangle comme représenté sur le schéma de la **figure 2**. L'épaisseur de la particule est de $2e$ et on suppose que la longueur L et la largeur l sont très grandes devant l'épaisseur.

On note S la section latérale correspondant au produit $L \times l$ et on considère que la particule réagit avec le fluide uniquement par les deux faces latérales de surface S comme représenté sur le schéma de la **figure 2**.

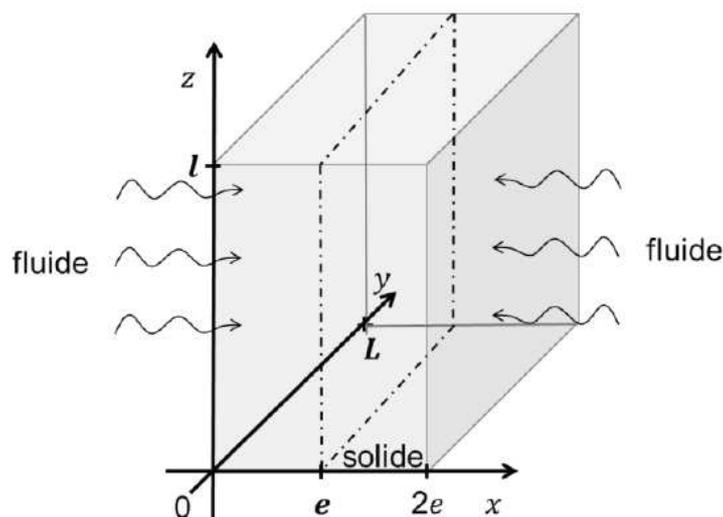


Figure 2 - Schéma de la particule de solide d'épaisseur $2e$

En représentation cartésienne, on note $\vec{j}_N(x, y, z, t)$ le vecteur densité de flux de particules associé aux phénomènes de diffusion que l'on étudie.

Q2. Indiquer les conséquences de l'hypothèse L et $l \gg 2e$ sur la direction du déplacement du front de réaction et sur les invariances du système.

Expliquer pourquoi on peut restreindre cette étude à l'intervalle $[0, e]$.

I.2 - Établissement de l'équation de la diffusion de A dans la couche de produit poreux B

Les phénomènes de diffusion qui nous intéressent sont régis par les équations suivantes :

$$\vec{J}_N(x, t) = -D \overrightarrow{\text{grad}}(n(x, t)) \quad (\text{loi de Fick}) \quad \text{et} \quad \frac{\delta N}{dt} = \iint \vec{J}_N d\vec{S} \quad (\text{flux de } \vec{J}_N)$$

- Q3.** Rappeler la signification physique de la loi de Fick.
Préciser le nom et les unités des grandeurs qui la constitue.

On considère un volume élémentaire de la couche de produit poreux de section S et d'épaisseur dx (**figure 3a**). La **figure 3b** est une vue de profil de la **figure 3a**. La **figure 3c** est également une vue de profil sur laquelle le volume structural et le volume des pores ont été séparés de manière fictive.

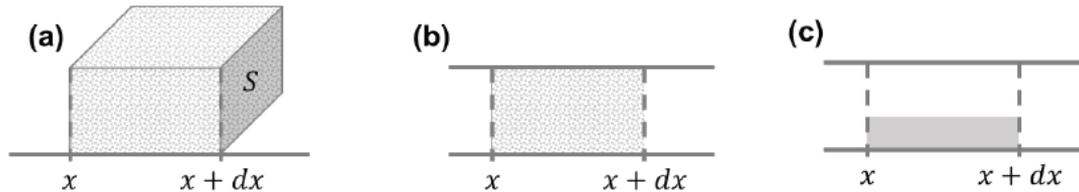


Figure 3 - Volume élémentaire de la couche de produit poreux de section S et d'épaisseur dx

(a) Vue en 3 dimensions (b) Vue de profil

(c) Vue de profil avec séparation fictive du volume structural et du volume des pores

- Q4.** Reproduire sur votre copie le schéma du volume élémentaire de la **figure 3c** en y faisant figurer les flux de matière aux abscisses x et $x + dx$.
- Q5.** Réaliser un bilan de matière sur ce volume élémentaire traduisant la conservation du nombre de molécules et en déduire l'équation de la diffusion dans la couche de produit poreux :

$$\epsilon \frac{\partial n}{\partial t} = D_e \frac{\partial^2 n}{\partial x^2} \quad (1)$$

où D_e est un coefficient de diffusion effectif qui prend en compte le caractère poreux du matériau.

On utilise plus généralement l'équation de la diffusion de A dans la couche de produit poreux en considérant la concentration molaire C plutôt que le nombre de molécules par unité de volume :

$$\epsilon \frac{\partial C}{\partial t} = D_e \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \quad (2)$$

Cette équation s'accompagne des deux conditions aux limites suivantes :

$$\bullet \quad \text{en } x = 0, D_e \left. \frac{\partial C}{\partial x} \right|_{x=0} = k_D (C_e - C_s) \quad (3)$$

$$\bullet \quad \text{en } x = x_f, D_e \left. \frac{\partial C}{\partial x} \right|_{x=x_f} = k_C C_f \quad (4)$$

avec :

- k_D la conductance de transfert du fluide dans la couche limite (en $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) ;
- C_e la concentration molaire du fluide dans la phase gazeuse en dehors de la couche limite du fluide ;
- C_s la concentration en surface de la particule, en $x = 0$ (donc $C_s = C(x = 0)$) ;
- C_f la concentration au niveau du front de réaction, en $x = x_f$ (donc $C_f = C(x = x_f)$) ;
- k_C la constante cinétique de la réaction de consommation du solide B par le fluide A (en $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) (**figure 4**).

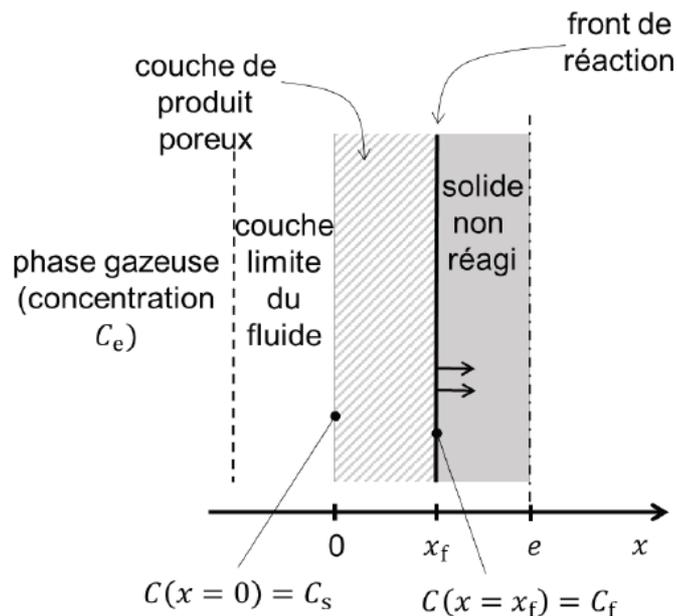


Figure 4 - Schéma de la particule de solide (sur l'intervalle $[0, e]$) partiellement consommée avec la représentation de la couche limite du fluide et du front de réaction

- Q6.** Vérifier à l'aide d'une analyse dimensionnelle que les conditions aux limites (**équations (3) et (4)**) sont bien homogènes.

~~Expliquer comment les deux conditions aux limites ont été obtenues (on pourra faire une analogie avec la loi des transferts thermiques de Newton : $\vec{j}_{th} = h(T_s - T_f)\vec{n}$ avec \vec{j}_{th} la densité de courant thermique reçu par un fluide en mouvement à la température T_f au voisinage d'un solide de température de surface T_s et h le coefficient de transfert thermique).~~

I.3 - Modèle simplifié : hypothèse du régime stationnaire pour la phase fluide

Pour simplifier la résolution de l'équation aux dérivées partielles (**équation (2)**), nous supposons que la phase fluide évolue en régime stationnaire. La validité de cette hypothèse sera développée dans la partie numérique.

- Q7.** Simplifier l'**équation (2)** de la diffusion de A dans le cas du régime stationnaire pour la phase fluide.

Montrer que $F_A = -D_e \frac{\partial C}{\partial x} S$, où F_A est le flux molaire de A, c'est-à-dire le flux du vecteur densité de flux de particules molaire à travers une section S de particule solide. Indiquer comment varie F_A dans la couche de produit poreux.

- Q8.** On rappelle que $C_s = C(x = 0)$ et on note C_x la concentration du fluide A pour une abscisse x comprise dans l'intervalle $[0, x_f]$.

Démontrer l'expression suivante de F_A en s'appuyant sur la **question Q7** et en précisant les différentes étapes de la démonstration :

$$F_A = \frac{D_e S}{x} (C_s - C_x) \quad (5)$$

L'hypothèse du régime stationnaire pour la phase fluide entraîne l'égalité des trois flux molaires de A : celui qui traverse la couche limite externe, celui qui diffuse dans la couche de produit poreux et celui consommé par la réaction.

L'égalité des flux molaires de A conduit à l'expression suivante :

$$F_A = k_D S (C_e - C_s) = \frac{D_e S}{x} (C_s - C_x) = k S C_x \quad (6)$$

dans le cas particulier où x est la position du front de réaction.

Cette situation est formellement analogue à un montage électrique constitué de 3 résistances placées en série traversées par un même courant. La **figure 5** représente cette analogie.

Dans notre cas, ces trois résistances en série sont dans l'ordre :

- la résistance au transfert externe (notée R_{te}) dans la couche limite externe ;
- la résistance au transfert interne (notée R_{ti}) par la diffusion dans la porosité ;
- la résistance par la réaction chimique (notée R_{rc}) localisée au niveau du front de réaction.

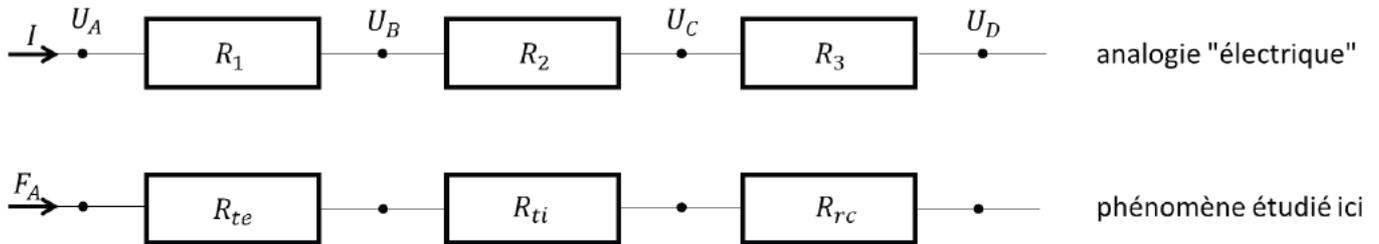


Figure 5 - Représentation schématique du problème en termes de résistances en série

Q9. Indiquer quel type de grandeurs du problème étudié correspond aux potentiels U_A , U_B , U_C et U_D de la **figure 5**.

Transformer l'**équation (6)** pour faire apparaître ces résistances en se basant sur l'analogie "électrique".

Montrer que l'on peut écrire $F_A = \frac{C_e}{R_{\acute{e}q}}$, où $R_{\acute{e}q}$ est une résistance équivalente dont l'expression est à préciser en fonction des paramètres D_e , k , k_D , x et S .

On note N_B la quantité de matière du solide B. L'évolution de N_B en fonction du temps est régie par l'équation différentielle suivante :

$$F_A = -\frac{1}{v} \frac{dN_B}{dt} \quad (7)$$

où v est le coefficient stœchiométrique défini dans la présentation.

Q10. Expliquer comment a été obtenue l'équation différentielle précédente (**équation (7)**).

Indiquer comment N_B évolue en fonction du temps.

Q11. Soit $N_B(x)$ la quantité de matière de B comprise entre les abscisses x et e .

Pour tout x compris entre x_f et e , exprimer $N_B(x)$ en fonction de ρ_B , M_B , S , x et de e , avec ρ_B la masse volumique de B et M_B sa masse molaire.

Mettre l'**équation (7)** sous la forme $F_A = Q \frac{\partial x}{\partial t}$ avec Q une constante qui dépend de v , ρ_B , M_B et de S et dont l'expression est à préciser.

La combinaison de l'expression de F_A obtenue à la **Q9** et de celle obtenue à la question précédente permet d'obtenir l'équation à variables séparées suivante :

$$dt = K \left(\frac{1}{k_D} + \frac{x}{D_e} + \frac{1}{k} \right) dx, \text{ avec } K = \frac{\rho_B}{v C_e M_B}. \quad (8)$$

Q12. Montrer que l'intégration de l'équation (8) entre la date $t = 0$ (pour laquelle le front de réaction est en $x = 0$) et la date courante $t = t_f$ (front de réaction en x_f) permet d'obtenir la relation :

$$t_f = t_{0e} \frac{x_f}{e} + t_{0i} \left(\frac{x_f}{e} \right)^2 + t_{0c} \frac{x_f}{e} \quad (9)$$

avec :

- $t_{0e} = K \frac{e}{k_D}$, le temps caractéristique de transport dans la couche limite externe ;
- $t_{0i} = K \frac{1}{D_e} \frac{e^2}{2}$, le temps caractéristique de transport interne par diffusion dans la porosité ;
- $t_{0c} = K \frac{e}{k_C}$, le temps caractéristique de consommation par la réaction chimique.

On introduit le taux de conversion de B, X_B , défini par le rapport entre la quantité de B consommée et la quantité initiale de B, notée N_{B0} .

Q13. Rappeler la relation entre X_B , N_{B0} et N_B , la quantité de B restante.

Q14. Donner la relation entre X_B et x_f , puis exprimer t_f en fonction des trois temps caractéristiques et de X_B .

Q15. Donner la relation entre le temps total de consommation des particules, t_0 , et les trois temps caractéristiques.

Q16. Une expérience en laboratoire sur des particules d'épaisseur $2e$ a conduit aux valeurs suivantes : $t_{0e} = 60$ s, $t_{0i} = 300$ s et $t_{0c} = 120$ s.

Calculer le facteur par lequel est multiplié le temps total de consommation des particules si l'épaisseur des particules est multipliée par un facteur 2.

L'analyse des valeurs des trois temps caractéristiques permet de mettre en évidence le poids de chaque phénomène dans la résistance au transfert de matière. Dans certains cas extrêmes, l'un de ces trois phénomènes peut prendre le dessus sur les autres. On va alors parler de régime limitant. Dans le cas de cette étude, le régime limitant peut donc être le transport externe, la diffusion dans le produit poreux ou la réaction chimique. D'un point de vue pratique, on considère qu'un régime est limitant lorsque le temps caractéristique associé est supérieur d'un ordre de grandeur aux temps caractéristiques associés aux deux autres phénomènes (par exemple, si le transport de matière externe était le phénomène limitant, on aurait $t_{0e} \gg t_{0i}$ et $t_{0e} \gg t_{0c}$).

Q17. Donner les conditions sur k_D , k_C et D_e dans le cas où le régime limitant est le régime de diffusion interne.

Fin de l'énoncé

Annexe pour le problème A

Le diagramme à compléter et à rendre se trouve au dos.

Données

Extrait de table thermodynamique relatif à l'équilibre liquide-vapeur de l'eau

θ (°C)	P_{sat} (bar)	Liquide saturant			Vapeur saturante sèche		
		v_l (m ³ ·kg ⁻¹)	h_l (kJ·kg ⁻¹)	s_l (kJ·K ⁻¹ ·kg ⁻¹)	v_v (m ³ ·kg ⁻¹)	h_v (kJ·kg ⁻¹)	s_v (J·K ⁻¹ ·kg ⁻¹)
30	0,043	1,0047	125,22	0,4348	32,892	2555,92	8,4530
180	10	1,1276	763,18	2,1395	0,119404	2777,84	6,5854
270	55	1,3053	1190,10	2,9853	0,03505	2788,46	5,9226

θ température

s_l entropie massique du liquide saturant

P_{sat} pression de vapeur saturante

v_v volume massique de la vapeur saturante sèche

v_l volume massique du liquide saturant

h_v enthalpie massique de la vapeur saturante sèche

h_l enthalpie massique du liquide saturant

s_v entropie massique de la vapeur saturante sèche

Capacité thermique massique isobare de l'eau

$$c = 4,18 \text{ kJ}\cdot\text{K}^{-1}\cdot\text{kg}^{-1}$$

Constante des gaz parfaits

$$R = 8,314 \text{ J}\cdot\text{K}^{-1}\cdot\text{mol}^{-1}$$

Les températures sont exprimées en °C

