

## DK6 : Un exemple de revalorisation

Le problème comporte 3 parties indépendantes. Certaines questions, moins guidées, sont repérées par leur numéro souligné. Elles ne sont pas *a priori* plus difficiles que les autres, mais demandent de prendre plus d'initiatives.

La centrale électrique DK6, sur le site du port industriel de Dunkerque (Hauts-de-France), produit de l'énergie électrique à partir de gaz naturel. De par sa conception et sa situation géographique, la centrale DK6 a la particularité de pouvoir revaloriser les fumées issues de la production d'acier, émises par l'usine sidérurgique voisine Arcelor-Mittal.

Le processus de revalorisation s'effectue en plusieurs étapes selon un cycle combiné de récupération de la *chaleur fatale* décrit en figure 1.

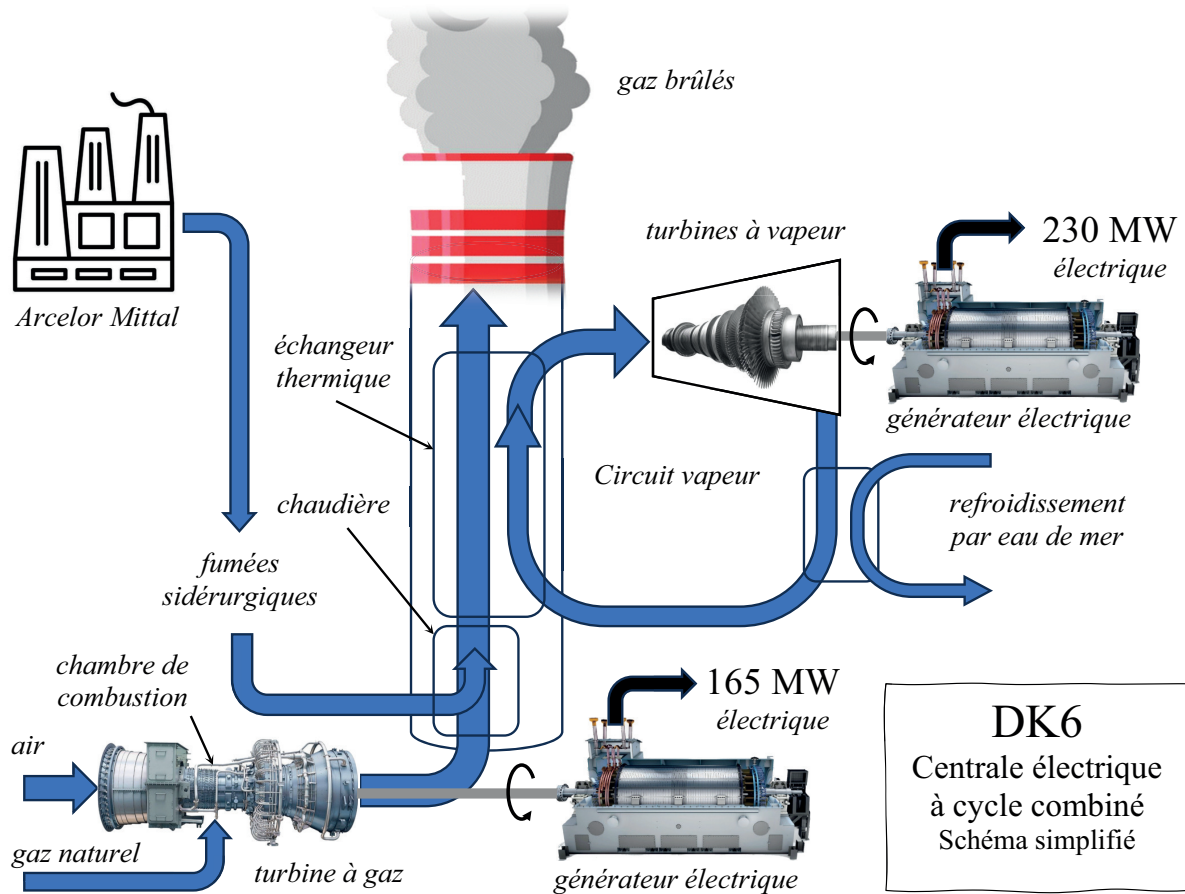


Figure 1 – Description d'une tranche de production

On réalise la combustion de gaz naturel avec de l'air sous pression dans une turbine à gaz reliée mécaniquement à un premier générateur électrique de 165 MW. Les gaz en sortie de la turbine à gaz servent à leur tour de comburant pour brûler les fumées sidérurgiques dans une chaudière. Les gaz brûlés passent enfin dans un échangeur thermique pour produire la vapeur d'eau qui alimente des turbines à vapeur reliées à un second générateur électrique de 230 MW. La centrale DK6 dispose de deux tranches de production identiques pour une puissance électrique totale de 790 MW.

Ce sujet propose une étude de la chambre de combustion de la turbine à gaz (partie A), le principe de fonctionnement d'une turbine à vapeur (partie B) et la conversion d'énergie mécanique en énergie électrique par un alternateur synchrone (partie C). Les trois parties sont indépendantes entre elles.

Les données sont regroupées à la fin du sujet. Un document réponse est à rendre avec la copie.

# Partie A – La chambre de combustion de la turbine à gaz

La chambre de combustion de la turbine à gaz est alimentée par un gazoduc qui fournit du gaz naturel avec un débit massique constant  $D_{m,gn} = 9,66 \text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}$ , sous une pression de 12 bar et une température  $T_0 = 298 \text{ K}$ . On assimile dans la suite le gaz naturel à du méthane pur ( $\text{CH}_4$ ). Le dioxygène nécessaire à la combustion est apporté par de l'air atmosphérique, comprimé sous une pression de 12 bar à la température de 298 K par un compresseur solidaire de l'axe de la turbine, avec un débit massique réglable noté  $D_{m,air}$ .

Le réacteur, parfaitement calorifugé, permet ainsi la combustion en continu et en régime stationnaire du méthane par le dioxygène de l'air à la pression constante de 12 bar. Les gaz issus de cette combustion sortent du réacteur à température élevée pour pouvoir faire tourner une turbine, dont le principe de fonctionnement sera étudié dans la partie suivante. Les aubes de la turbine sont recouvertes d'une fine couche de traitement en céramique qui les protège jusqu'à des températures de l'ordre de 1600 °C.

**Q1.** Écrire l'équation bilan de la combustion du méthane par le dioxygène, sachant que la réaction ne produit que de l'eau et du dioxyde de carbone sous forme gazeuse. On prendra un coefficient stœchiométrique unitaire pour le méthane.

Montrer que cette réaction est quantitative à 298 K puis calculer le pouvoir calorifique inférieur (PCI) du méthane, noté  $q_{gn}$ , défini comme l'énergie thermique par unité de masse de méthane libérée par la combustion du méthane sous pression constante à 298 K.

**Q2.** Déterminer le débit massique d'air  $D_{m0}$  permettant de réaliser la combustion dans les proportions stœchiométriques, puis la puissance thermique  $\mathcal{P}_{th0}$  libérée par la réaction dans ces conditions.

**Q3.** Effectuer un bilan détaillé d'enthalpie et exprimer, en fonction de  $q_{gn}$  et des données, la température des gaz en sortie de la chambre de combustion pour un débit massique d'air  $D_{m0}$ . Commenter la valeur obtenue.

Lorsque la température de la chambre de combustion dépasse 1300 °C, les constituants de l'air commencent à réagir entre eux pour produire des oxydes d'azote. Ces oxydes d'azote, essentiellement NO et  $\text{NO}_2$ , couramment appelés  $\text{NO}_x$ , sont à l'origine de graves problèmes pour l'environnement et la santé.

**Q4.** On souhaite éviter la production et le rejet de  $\text{NO}_x$  dans l'atmosphère. Justifier qualitativement que l'on peut diminuer la température de sortie en modifiant le débit d'air en entrée. Expliquer pourquoi, en pratique, le débit massique  $D_{m,air}$  est choisi supérieur à  $D_{m0}$ .

**Q5.** Exprimer le débit molaire de chaque espèce en sortie en fonction de  $D_{m,air}$ ,  $D_{m0}$  et des masses molaires dans le cas  $D_{m,air} > D_{m0}$ . On présentera les résultats dans un tableau. Les débits molaires des différentes espèces seront notés  $F_{\text{CH}_4}$ ,  $F_{\text{O}_2}$ ...

**Q6.** Exprimer, puis calculer, le débit massique d'air  $D_{m1}$  permettant à la turbine à gaz de fonctionner à sa température maximale tout en évitant la production de  $\text{NO}_x$ .

Étant donné l'échauffement important des gaz dans la chambre de combustion, il faut tenir compte dans le calcul précédent de la dépendance avec la température de la capacité thermique molaire à pression constante des différents gaz (figure 2). La capacité thermique molaire à pression constante d'un gaz réel peut ainsi s'exprimer de manière empirique en fonction de la température par la *relation de Shomate* :

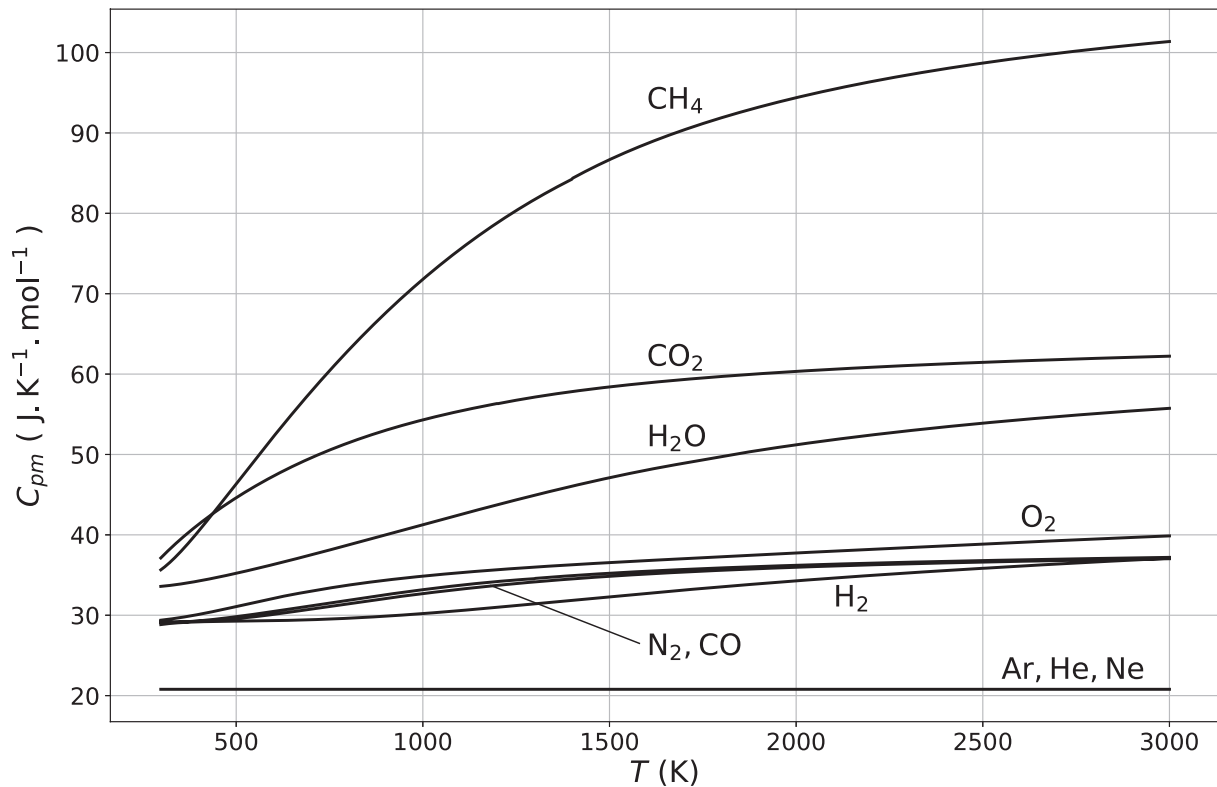
$$C_{pm}(T) = A + BT + CT^2 + DT^3 + \frac{E}{T^2},$$

où les coefficients  $A$ ,  $B$ ,  $C$ ,  $D$  et  $E$  sont obtenus expérimentalement pour chaque gaz. La variation d'enthalpie de  $n$  moles de gaz entre les températures  $T_1$  et  $T_2$  s'exprime alors sous forme intégrale par la relation :

$$H(T_2) - H(T_1) = \int_{T_1}^{T_2} nC_{pm}(T)dT.$$

Les capacités thermiques molaires à pression constante des différentes espèces seront notées  $C_{pm,\text{CH}_4}(T)$ ,  $C_{pm,\text{O}_2}(T)$ ...

**Q7.** Reprendre la question **Q6** pour établir, dans le cas où  $D_{m,air} > D_{m0}$ , la nouvelle relation donnant le débit massique d'air  $D_{m,air}$  en fonction de la température de sortie des gaz  $T_s$  en tenant compte de l'influence de la température sur les capacités thermiques molaires à pression constante, sous forme intégrale que l'on ne cherchera pas à calculer.



**Figure 2** – Capacités thermiques molaires de différents gaz en fonction de la température

Pour le débit  $D_{m,gn} = 9,66 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$  et la température  $T_0 = 298 \text{ K}$ , le calcul numérique de la température de sortie  $T_s$  des gaz brûlés en fonction du débit d'air  $D_{m,air}$  est effectué par un programme en Python, dont un extrait est présenté ci-après.

```

1  '''Extrait 1'''
2  # Coefficients A, B, C, D, E de la relation de Shomate des différents gaz
3  N2 = [28.98641, 1.853978e-3, -9.647459e-6, 16.63537e-9, 0.000117e6]
4  H2O = [-203.6060, 1523.290e-3, -3196.413e-6, 2474.455e-9, 3.855326e6]
5
6  '''Extrait 2'''
7  def Cpm(T, gaz):
8      A, B, C, D, E = gaz
9      return A + B*T + C*T**2 + D*T**3 + E/T**2
10
11  '''Extrait 3'''
12  def int_Cpm(gaz, T1, T2):
13      [A COMPLETER]
14
15  '''Extrait 4'''
16  plt.plot(Dm, T, 'k-', lw=2) # Tracé du graphe de Ts en fonction de Dm,air
17  plt.show()

```

**Q8.** Préciser l'unité des coefficients  $A$ ,  $B$ ,  $C$ ,  $D$  et  $E$ . Proposer un code Python permettant d'implémenter la fonction `int_Cpm(gaz, T1, T2)` qui prend pour arguments la liste `gaz` des coefficients de la relation de Shomate du gaz étudié et les températures  $T_1$  et  $T_2$ , puis qui renvoie une valeur numérique approchée de l'intégrale  $\int_{T_1}^{T_2} C_{pm}(T) dT$  obtenue par la méthode des rectangles utilisant  $N = 1000$  points de calcul.

Le programme permet de tracer le graphe de la température de sortie des gaz en fonction du débit d'air d'entrée en tenant compte de la dépendance avec la température des capacités thermiques molaires à pression constante des différents gaz (figure 3).

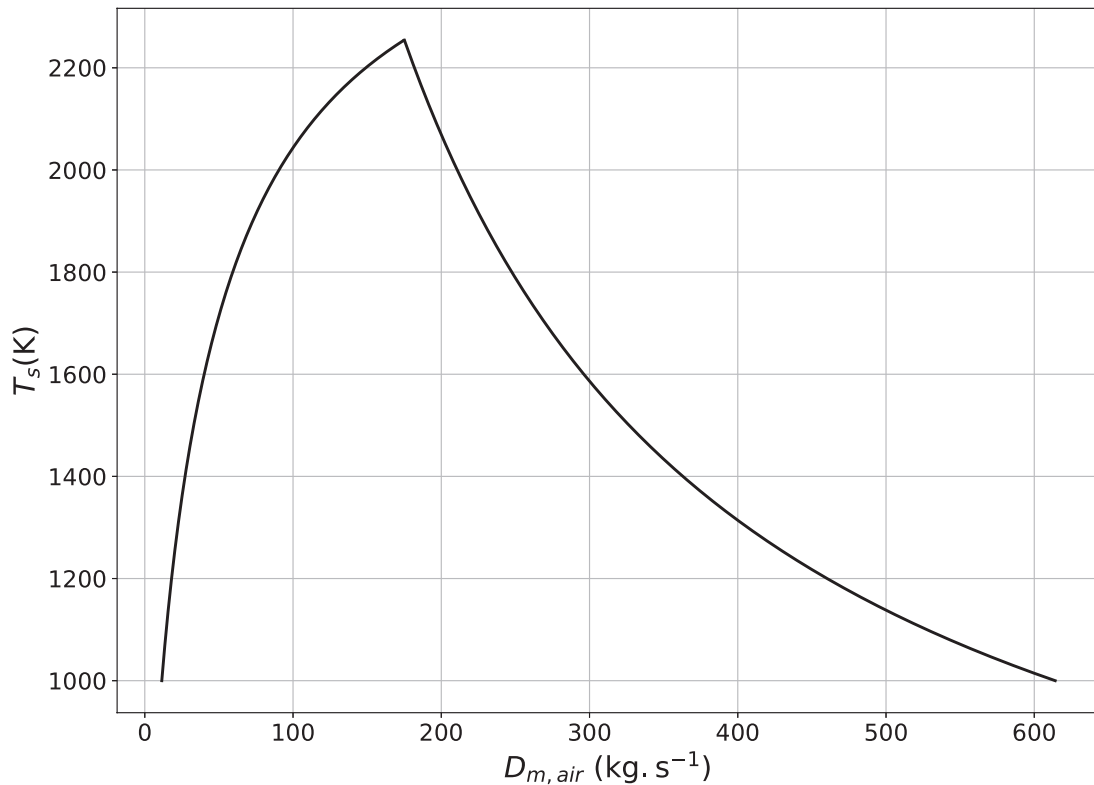


Figure 3 – Température de sortie  $T_s$  en fonction du débit massique d'air  $D_{m,air}$  à l'entrée

- Q9. Décrire précisément le graphe obtenu en mettant en évidence des valeurs particulières pertinentes dont on commentera le sens physique. Déterminer la valeur réelle du débit massique d'air permettant de faire fonctionner la turbine à gaz à sa température maximale sans production de  $NO_x$  et comparer cette valeur au débit massique  $D_{m1}$  trouvé en question Q6. Ce résultat était-il prévisible? Déterminer alors le débit massique de gaz en sortie de la turbine.
- Q10. Estimer le rendement thermodynamique de la centrale électrique DK6.

## Partie B – La turbine à vapeur

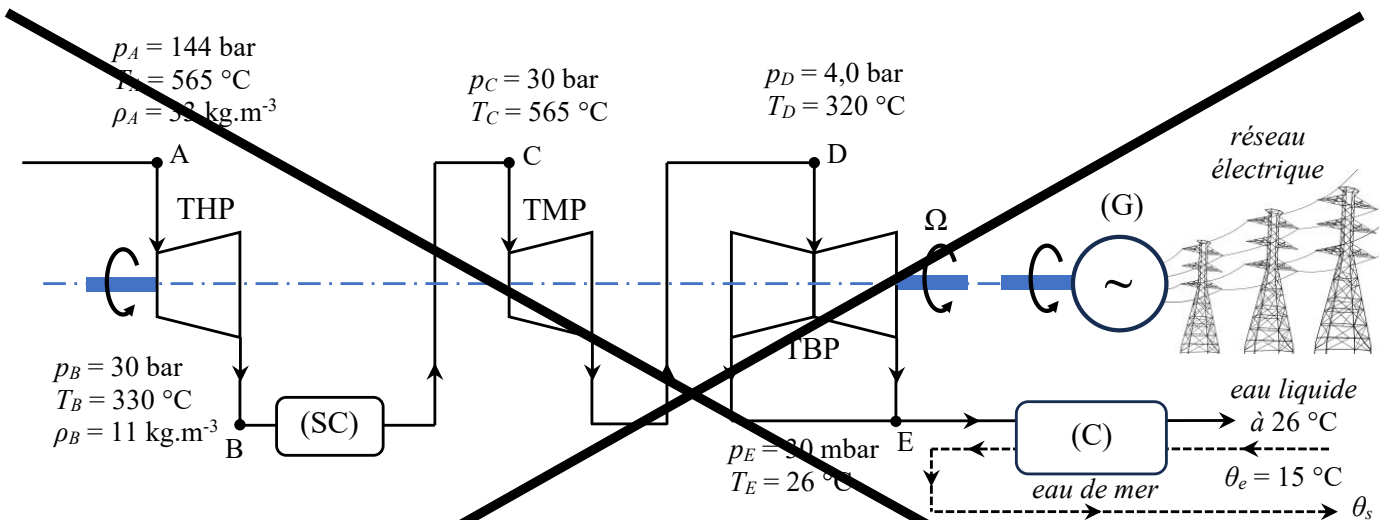


Figure 4 – Circuit de vapeur dans les turbines

La turbine à vapeur est un élément essentiel du fonctionnement d'une centrale électrique thermique ou nucléaire, convertissant l'énergie de la vapeur sous pression en énergie mécanique. De la vapeur d'eau arrive dans la turbine sous haute pression et haute température et se détend à travers différents étages comportant une succession d'aubes fixes et d'aubes mobiles, provoquant la rotation de l'axe de la turbine à la vitesse angulaire  $\Omega = 3000 \text{ tr} \cdot \text{min}^{-1}$ , et entraînant par ailleurs le générateur électrique (G).

# Données

Nombre d'Avogadro :  $\mathcal{N}_A = 6,02 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}$

Constante des gaz parfaits :  $R = k_B \mathcal{N}_A = 8,31 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1}$

Masses molaires :  $M(\text{H}) = 1,0 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$ ,  $M(\text{C}) = 12,0 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$ ,  $M(\text{O}) = 16,0 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$ ,  $M(\text{N}) = 14,0 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$

L'air atmosphérique est constitué à  $\frac{4}{5}$  de diazote et à  $\frac{1}{5}$  de dioxygène en proportions molaires.

Enthalpie standard de formation et entropie molaire standard à 298 K :

Espèce	$\text{CH}_4(g)$	$\text{CO}_2(g)$	$\text{O}_2(g)$	$\text{H}_2\text{O}(g)$
$\Delta_f H^\circ (\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1})$	-74,9	-393,5		-241,8
$S_m^\circ (\text{J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1})$	186,2	213,8	205,0	188,7

Capacités thermiques molaires à pression constante à 298 K :

Espèce	$\text{CH}_4(g)$	$\text{CO}_2(g)$	$\text{CO}(g)$	$\text{O}_2(g)$	$\text{N}_2(g)$	$\text{H}_2\text{O}(g)$	$\text{H}_2(g)$
$C_{pm} (\text{J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1})$	35,7	37,1	29,1	29,4	29,1	33,6	28,8

Masse molaire de l'eau :  $M = 18,0 \cdot 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{mol}^{-1}$

Rapport des capacités thermiques de la vapeur d'eau :  $\gamma = 1,30$

Capacité thermique massique de l'eau liquide :  $c_{eau} = 4,18 \text{ kJ} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$

Masse volumique de l'eau liquide :  $\rho_{eau} = 1,00 \cdot 10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$

Capacité thermique massique à pression constante de la vapeur d'eau assimilée à un gaz parfait :  $c_p = 2,00 \text{ kJ} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$

Enthalpie massique de vaporisation de l'eau à 26 °C :  $l_{vap} = 2,30 \cdot 10^3 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$

Caractéristiques de l'alternateur diphasé au point nominal :

Nombre de pôles	2
Nombre de phases	2
Puissance moyenne nominale	$P_n = 240 \text{ MW}$
Courant de phase statorique nominal	$I_n = 11,1 \text{ kA}$
Facteur de puissance nominal	0,85
Fréquence nominale des courants	$f = 50 \text{ Hz}$
Courant d'excitation rotorique nominal à vide	$I_{en} = 498 \text{ A}$
Tension d'excitation rotorique nominale à vide	$U_{en} = 92 \text{ V}$
Résistance par phase	0,9 $\Omega$

◇ Fin ◇