

CCP PSI1 2007
durée : 4 heures
calculatrices autorisées

Notations.

On note :

- \mathbb{N} : l'ensemble des entiers naturels,
- \mathbb{R} : l'ensemble des nombres réels,
- e : le nombre réel dont le logarithme népérien est égal 1.

Pour x appartenant à \mathbb{R} , on note $|x|$ la valeur absolue de x .

Pour tout entier naturel, on note $n!$ la factorielle de n avec la convention $0! = 1$.

Si j et n sont deux entiers naturels fixes tels que $0 \leq j \leq n$, on note :

- $[[j, n]]$ l'ensemble des naturels k vérifiant $j \leq k \leq n$,
- $\binom{n}{j}$ le nombre de parties ayant j éléments d'un ensemble de n éléments.

On rappelle que pour tout entier naturel j élément de $[[0, n]]$ on a : $\binom{n}{j} = \frac{n!}{j!(n-j)!}$.

Si f est une fonction k fois dérivable sur un intervalle I (avec $k \geq 1$) on note f' (resp. $f^{(k)}$) sa fonction dérivée (resp. sa fonction dérivée k -ième).

Si u est une application de \mathbb{N} dans \mathbb{R} , donc une suite réelle, on utilise la notation usuelle : $u(n) = u_n$ pour tout n appartenant à \mathbb{N} .

Soit x un nombre réel, on rappelle que s'il existe un nombre entier p qui vérifie $|p - x| < \frac{1}{2}$ alors p est l'entier le plus proche de x .

Objectifs.

L'objet du problème est d'une part d'établir, pour tout entier naturel non nul, un lien entre l'entier naturel β_n le plus proche de $e^{-1}n!$ et le nombre γ_n d'éléments sans point fixe du groupe symétrique \mathcal{S}_n et d'autre part, d'étudier l'écart $\delta_n = e^{-1}n! - \beta_n$.

Dans la partie I on étudie β_n et on le caractérise grâce à une récurrence, dans la partie II on étudie γ_n et on établit un lien avec β_n . La partie III est consacrée à une estimation de δ_n puis à une étude des deux séries $\sum_{n \geq 0} \delta_n$ et $\sum_{n \geq 1} \frac{|\delta_n|}{n}$.

1 Les suites α et β .

On définit la suite α par $\alpha_0 = 1$ et la relation de récurrence :

$$\forall n \in \mathbb{N}, \alpha_{n+1} = (n+1)\alpha_n + (-1)^{n+1}$$

On rappelle que pour tout x réel, la série $\sum_{n \geq 0} \frac{x^n}{n!}$ est convergente, et que $\sum_{n=0}^{+\infty} \frac{x^n}{n!} = e^x$; en particulier, pour $x = -1$

$$\sum_{n=0}^{+\infty} \frac{(-1)^n}{n!} = e^{-1}$$

Pour $n \in \mathbb{N}$, on note : $\beta_n = n! \sum_{k=0}^n \frac{(-1)^k}{k!}$ et $\rho_n = \sum_{k=n+1}^{+\infty} \frac{(-1)^k}{k!}$.

I.1. Etude de la suite α .

I.1.1 Expliciter α_k pour k dans $[[0, 4]]$.

I.1.2 Montrer que α_n est un entier naturel pour tout n de \mathbb{N} .

I.2. Etude de la suite β .

I.2.1 Expliciter β_k pour k dans $[[0, 4]]$.

I.2.2 Montrer que β_n est un entier relatif pour tout n de \mathbb{N} .

I.2.3 Expliciter $\beta_{n+1} - (n+1)\beta_n$ en fonction de n , pour tout entier n de \mathbb{N} .

I.2.4 Comparer les deux suites α et β .

I.3. Etude de ρ_n .

I.3.1 Préciser le signe de ρ_n en fonction de l'entier naturel n .

I.3.2 Etablir, pour tout entier naturel n , l'inégalité suivante : $n!|\rho_n| \leq \frac{1}{n+1}$. L'inégalité est-elle stricte ?

I.3.3 Dédire de ce qui précède que pour tout entier naturel $n \geq 1$, β_n est l'entier naturel le plus proche de $e^{-1}n!$.

I.4. Etude d'une fonction.

On désigne par f la fonction définie et de classe C^1 (au moins) sur l'intervalle $] - 1, 1[$ à valeurs réelles, vérifiant les deux conditions :

$$f(0) = 1 \text{ et } \forall x \in] - 1, 1[, (1 - x)f'(x) - xf(x) = 0$$

I.4.1 Justifier l'existence et l'unicité de la fonction f . Expliciter $f(x)$ pour tout x de $] - 1, 1[$.

I.4.2 Justifier l'affirmation : " f est de classe C^∞ sur $] - 1, 1[$ ".

I.4.3 Expliciter $(1 - x)f(x)$, puis exprimer pour tout entier naturel n :

$$(1 - x)f^{(n+1)}(x) - (n + 1)f^{(n)}(x)$$

en fonction de n et de x .

I.4.4 En déduire une relation, valable pour tout entier naturel n , entre β_n et $f^{(n)}(0)$.

2 La suite γ .

Dans cette partie, on désigne par n un entier naturel.

Pour $n \geq 1$, on note :

- \mathcal{S}_n l'ensemble des permutations de $[[1, n]]$,
- γ_n le nombre d'éléments de \mathcal{S}_n sans point fixe (τ appartenant à \mathcal{S}_n est sans point fixe si pour tout k de $[[1, n]]$, on a $\tau(k) \neq k$).

Pour $n = 0$ on adopte la convention : $\gamma_0 = 1$.

II.1. Calculer γ_1 et γ_2 .

II.2. Classer les éléments de \mathcal{S}_3 selon leur nombre de points fixes et calculer γ_3 .

II.3. On suppose dans cette question que $n = 4$.

II.3.1 Quel est le nombre d'éléments τ appartenant à \mathcal{S}_4 ayant deux points fixes ?

II.3.2 Quel est le nombre d'éléments τ appartenant à \mathcal{S}_4 ayant un point fixe ?

II.3.3 Calculer γ_4 .

II.4. Relation entre les γ_k .

II.4.1 Rappeler sans justification le nombre d'éléments de \mathcal{S}_n .

II.4.2 Si $0 \leq k \leq n$, combien d'éléments de \mathcal{S}_n ont exactement k points fixes ?

II.4.3 Etablir pour tout entier naturel n la relation : $\sum_{k=0}^n \binom{n}{k} \gamma_k = n!$.

II.5. On considère la série entière $\sum_{n \geq 0} \frac{\gamma_n}{n!} x^n$ et l'on pose $g(x) = \sum_{n=0}^{+\infty} \frac{\gamma_n}{n!} x^n$ lorsque la série converge.

II.5.1 Montrer que le rayon de convergence de cette série entière est supérieur ou égal à 1.

II.5.2 Pour tout x de $] - 1, 1[$, on pose $g(x) = e^x g(x)$. Justifier l'existence du développement en série entière de la fonction h sur $] - 1, 1[$ et expliciter ce développement.

II.5.3 Expliciter $g(x)$ pour tout nombre réel x de $] - 1, 1[$. En déduire la valeur du rayon de convergence de la série $\sum_{n \geq 0} \frac{\gamma_n}{n!} x^n$.

- II.5.4** Comparer les deux suites β et γ .
II.5.5 La fonction g est-elle définie en 1 ?
II.5.6 La fonction g est-elle définie en -1 ?
II.5.7 Calculer γ_8 .

3 Sur $\delta_n = e^{-1}n! - \beta_n$.

Pour tout entier naturel n , on note :

- $\delta_n = e^{-1}n! - \beta_n$.
- $J_n = \int_0^1 x^n e^x dx$.
- $v_n = (-1)^{n+1} J_n$.

III.1. La série $\sum_{n \geq 0} v_n$.

III.1.1 Quelle est la limite de J_n lorsque n tend vers $+\infty$?

III.1.2 Etablir la convergence de la série $\sum_{n \geq 0} v_n$.

III.2. Estimation intégrale de δ_n .

III.2.1 Justifier, pour tout nombre réel x et pour tout entier naturel n , l'égalité :

$$e^x = \sum_{k=0}^n \frac{x^k}{k!} + \int_0^x \frac{(x-t)^n}{n!} e^t dt \quad (1)$$

III.2.2 Dédurre de (1) l'expression de δ_n en fonction de v_n .

III.3. Sur la série $\sum_{n \geq 0} \delta_n$.

Justifier la convergence de la série $\sum_{n \geq 0} \delta_n$; la convergence est-elle absolue ?

III.4. Sur la série $\sum_{n \geq 1} \frac{|\delta_n|}{n}$.

III.4.1 Justifier la convergence de la série $\sum_{n \geq 1} \frac{|\delta_n|}{n}$.

III.4.2 On pose $A = -\int_0^1 e^x \ln(1-x) dx$.

III.4.2.1 Justifier la convergence de l'intégrale impropre A .

III.4.2.2 Exprimer la somme $\sum_{n=1}^{+\infty} \frac{|\delta_n|}{n}$ en fonction de l'intégrale A .

III.4.3 Justifier la convergence de la série $\sum_{n \geq 0} \frac{(-1)^n}{n!(n+1)^2}$ et expliciter la somme $\sum_{n=0}^{+\infty} \frac{(-1)^n}{n!(n+1)^2}$ en

fonction de $\sum_{n=0}^{+\infty} \frac{|\delta_n|}{n}$.

III.4.4 Expliciter un nombre rationnel $\frac{p}{q}$ vérifiant $\left| \sum_{n=0}^{+\infty} \frac{|\delta_n|}{n} - \frac{p}{q} \right| \leq \frac{1}{600}$.