

CONCOURS MINES-PONTS 2023
MATHÉMATIQUES 2 - PC

Pierre-Paul TACHER

This document is published under the [Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International license](#). 

1.

Soit $A \in M_n(\mathbb{R})$ ¹.

$$\begin{aligned} \forall i \in \llbracket 1, n \rrbracket, \quad \sum_{j=1}^n a_{ij} = 1 &\Leftrightarrow \forall i \in \llbracket 1, n \rrbracket, \quad \begin{bmatrix} a_{i1} & \dots & a_{in} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ \vdots \\ 1 \end{bmatrix} = 1 \\ &\Leftrightarrow \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \dots & a_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ \vdots \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ \vdots \\ 1 \end{bmatrix} \\ &\Leftrightarrow AU = U \end{aligned}$$

Soit A, B deux noyaux de Markov. Alors,

$$\begin{aligned} (AB)U &= A(BU) \\ &= AU \\ &= U \end{aligned}$$

ce qui montre que AB est un noyau de Markov.

2.

Immédiat d'après la question précédente.

3.

Soit $t \in \mathbb{R}$ et $(i, j \in \llbracket 1, n \rrbracket^2)$. Comme K^n est un noyau de Markov, $K_{ij}^n \in [0, 1]$ donc

$$\left| \frac{t^n K_{ij}^n}{n!} \right| \leq \frac{t^n}{n!}$$

cette expression étant le terme général de la série convergente e^t , on en déduit que la série proposée converge absolument, donc converge.

¹Dans tout ce qui suit, on utilisera, quand c'est lisible, pour les matrices des notations plus couramment utilisées que celles suggérées par l'énoncé, par exemple:

$$A = (a_{ij})_{(i,j) \in \llbracket 1, n \rrbracket^2}$$

$$X = \begin{bmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_n \end{bmatrix}$$

4.

Soit $t \in \mathbb{R}^+$. Soit $i \in \llbracket 1, n \rrbracket$. La ligne i du produit matriciel HU vaut:

$$\sum_{j=1}^n H_t[i, j] u_j = \sum_{j=1}^n \left(e^{-t} \sum_{p=0}^{+\infty} \frac{t^p K_{ij}^p}{p!} \right) \times 1$$

Bien sur la série $\sum_{p \geq 0} (e^{-t} \sum_{j=1}^n \frac{t^p K_{ij}^p}{p!})$ converge car c'est une somme (finie) de n séries convergentes, et la limite de la série vaut

$$\sum_{p=0}^{+\infty} e^{-t} \sum_{j=1}^n \frac{t^p K_{ij}^p}{p!} = \sum_{j=1}^n \left(e^{-t} \sum_{p=0}^{+\infty} \frac{t^p K_{ij}^p}{p!} \right)$$

donc

$$\begin{aligned} \sum_{j=1}^n H_t[i, j] u_j &= \sum_{p=0}^{+\infty} e^{-t} \sum_{j=1}^n \frac{t^p K_{ij}^p}{p!} \\ &= \sum_{p=0}^{+\infty} e^{-t} \frac{t^p}{p!} \underbrace{\sum_{j=1}^n K_{ij}^p}_{=1} \\ &= e^{-t} \sum_{p=0}^{+\infty} \frac{t^p}{p!} \\ &= e^{-t} e^t \\ &= 1 \\ &= u_i \end{aligned}$$

où on a utilisé le fait que la matrice K^p est un noyau de Markov.

On a montré que $H_t U = U$. On conclut que H_t est un noyau de Markov.

5.

Soit $(t, s) \in (\mathbb{R}^+)^2$, $(i, j) \in \llbracket 1, n \rrbracket^2$. Le coefficient (i, j) du produit matriciel $H_t H_s$ vaut

$$\begin{aligned} (H_t H_s)_{ij} &= \sum_{k=1}^n H_t[i, k] H_s[k, j] \\ &= \sum_{k=1}^n \left(e^{-t} \sum_{p=0}^{+\infty} \frac{t^p K_{ik}^p}{p!} e^{-s} \sum_{l=0}^{+\infty} \frac{s^l K_{kj}^l}{l!} \right) \\ &= \sum_{k=1}^n \left(e^{-(s+t)} \sum_{p=0}^{+\infty} \frac{t^p K_{ik}^p}{p!} \times \sum_{l=0}^{+\infty} \frac{s^l K_{kj}^l}{l!} \right) \quad \textcircled{1} \end{aligned}$$

$\forall k \in \llbracket 1, n \rrbracket$, on a vu dans la question 3 que les séries $\sum_{p \geq 0} \frac{t^p K_{ik}^p}{p!}$ et $\sum_{l \geq 0} \frac{s^l K_{kj}^l}{l!}$ sont absolument convergentes. On sait que leur produit de Cauchy $\sum_{m \geq 0} \left(\sum_{p=0}^m \frac{t^p K_{ik}^p}{p!} \frac{s^{m-p} K_{kj}^{m-p}}{(m-p)!} \right) = \sum_{m \geq 0} \left(\sum_{p=0}^m \frac{t^p s^{m-p} K_{ik}^p K_{kj}^{m-p}}{p!(m-p)!} \right)$ converge absolument et

$$\sum_{p=0}^{+\infty} \frac{t^p K_{ik}^p}{p!} \times \sum_{l=0}^{+\infty} \frac{s^l K_{kj}^l}{l!} = \sum_{m=0}^{+\infty} \left(\sum_{p=0}^m \frac{t^p s^{m-p} K_{ik}^p K_{kj}^{m-p}}{p!(m-p)!} \right)$$

On reprend en ①:

$$\begin{aligned}(H_t H_s)_{ij} &= \sum_{k=0}^n (e^{-(s+t)} \sum_{p=0}^{+\infty} \frac{t^p K_{ik}^p}{p!} \times \sum_{l=0}^{+\infty} \frac{s^l K_{kj}^l}{l!}) \\ &= e^{-(s+t)} \sum_{k=0}^n \sum_{m=0}^{+\infty} \left(\sum_{p=0}^m \frac{t^p s^{m-p} K_{ik}^p K_{kj}^{m-p}}{p!(m-p)!} \right)\end{aligned}$$

En ayant conscience qu'ici n est un entier fixé, il n'y a pas de difficultés à intervertir les deux premiers symboles Σ : on ne fait qu'utiliser les théorèmes généraux sur la limite d'une somme (finie) de n séries convergentes:

$$(H_t H_s)_{ij} = e^{-(s+t)} \sum_{m=0}^{+\infty} \sum_{k=0}^n \left(\sum_{p=0}^m \frac{t^p s^{m-p} K_{ik}^p K_{kj}^{m-p}}{p!(m-p)!} \right)$$

L'addition étant commutative,

$$\begin{aligned}(H_t H_s)_{ij} &= e^{-(s+t)} \sum_{m=0}^{+\infty} \sum_{p=0}^m \left(\sum_{k=0}^n \frac{t^p s^{m-p} K_{ik}^p K_{kj}^{m-p}}{p!(m-p)!} \right) \\ &= e^{-(s+t)} \sum_{m=0}^{+\infty} \sum_{p=0}^m \frac{t^p s^{m-p}}{p!(m-p)!} \underbrace{\left(\sum_{k=0}^n K_{ik}^p K_{kj}^{m-p} \right)}_{K_{ij}^m}\end{aligned}$$

On reconnait le coefficient (i, j) du produit matriciel $K^p K^{m-p} = K^m$

$$\begin{aligned}&= e^{-(s+t)} \sum_{m=0}^{+\infty} K_{ij}^m \sum_{p=0}^m \frac{t^p s^{m-p}}{p!(m-p)!} \\ &= e^{-(s+t)} \sum_{m=0}^{+\infty} K_{ij}^m \frac{1}{m!} \sum_{p=0}^m t^p s^{m-p} \frac{m!}{p!(m-p)!} \\ &= e^{-(s+t)} \sum_{m=0}^{+\infty} K_{ij}^m \frac{1}{m!} \sum_{p=0}^m t^p s^{m-p} \binom{m}{p} \\ &= e^{-(s+t)} \sum_{m=0}^{+\infty} K_{ij}^m \frac{1}{m!} (s+t)^m \\ &= e^{-(s+t)} e^{s+t} H_{s+t}[i, j] \\ (H_t H_s)_{ij} &= H_{s+t}[i, j]\end{aligned}$$

On peut conclure

$$\forall (s, t) \in (\mathbb{R}^+)^2, \quad H_t H_s = H_{t+s}$$

6.

soit $i \in \llbracket 1, N \rrbracket$. soit $k \in \mathbb{N}^{*(?)2}$.

$$\begin{aligned}
 \sum_{j=1}^N K_{ij} &= \sum_{j=1}^N p_{ij} \\
 &= \sum_{j=1}^n P(Z_{k+1} = j \mid Z_k = i) \\
 &= P(Z_{k+1} \in \llbracket 1, N \rrbracket \mid Z_k = i) \\
 &= 1
 \end{aligned}$$

7.

On a déjà

$$\begin{aligned}
 \forall j \in \llbracket 1, N \rrbracket, \quad P(Z_0 = j) &= \delta_{1j} \\
 &= I_{1j} \\
 &= K_{1j}^0
 \end{aligned}$$

Soit maintenant $n \in \mathbb{N}$ tel que $\forall j \in \llbracket 1, N \rrbracket, \quad P(Z_n = j) = K_{1j}^n$. Soit $i \in \llbracket 1, N \rrbracket$.

$$\begin{aligned}
 P(Z_{n+1} = i) &= \sum_{j=1}^N P(Z_{n+1} = i \cap Z_n = j) \\
 &= \sum_{j=1}^N P(Z_{n+1} = i \mid Z_n = j) P(Z_n = j) \\
 &= \sum_{j=1}^N p_{ji} K_{1j}^n \\
 &= \sum_{j=1}^N K_{ji} K_{1j}^n \\
 &= \sum_{j=1}^n K_{1j}^n K_{ji} \\
 &= (K^n K)_{1i} \\
 &= K_{1i}^{n+1}
 \end{aligned}$$

Conclusion:

$$\forall n \in \mathbb{N} \quad \forall j \in \llbracket 1, N \rrbracket, \quad P(Z_n = j) = K_{1j}^n$$

²Il y a une ambiguïté dans la définition des nombres p_{ij} : que se passe-t-il si pour un certain $i \in \llbracket 1, N \rrbracket, \forall k \in \mathbb{N}, \quad P(Z_k = i) = 0$?

8.

Soit $t \in \mathbb{R}^+$, Soit $j \in \llbracket 1, N \rrbracket$.

$$\begin{aligned}
 P(A_{t,j}) &= P(A_{t,j} \cap \Omega) \\
 &= P(A_{t,j} \cap \bigcup_{n=0}^{+\infty} Y_t = n) \\
 &= P\left(\bigcup_{n=0}^{+\infty} (A_{t,j} \cap Y_t = n)\right) \\
 &= \sum_{n=0}^{+\infty} P(A_{t,j} \cap Y_t = n) \quad (\text{les évènements } Y_t = n \text{ sont deux à deux incompatibles.}) \\
 &= \sum_{n=0}^{+\infty} P(A_{t,j} \mid Y_t = n) P(Y_t = n) \\
 &= \sum_{n=0}^{+\infty} P(Z_n = j) e^{-t} \frac{t^n}{n!} \\
 &= e^{-t} \sum_{n=0}^{+\infty} K_{1j}^n \frac{t^n}{n!} \\
 &= H_t[1, j]
 \end{aligned}$$

9.

un endomorphisme autoadjoint d'un espace Euclidien est diagonalisable en base orthonormale; soit $(e_i)_{i \in \llbracket 1, n \rrbracket}$ une base orthonormale constituée de vecteurs propres de u , et $\lambda_i \in \mathbb{R}$ la valeur propre associée au vecteur e_i .

$$\begin{aligned}
 \forall i \in \llbracket 1, n \rrbracket, \quad \langle u(e_i) \mid e_i \rangle &= \langle \lambda_i e_i \mid e_i \rangle \\
 &= \lambda_i \underbrace{\langle e_i \mid e_i \rangle}_{=1} \\
 &= \lambda_i
 \end{aligned}$$

montre que $\forall i \in \llbracket 1, n \rrbracket, \quad \lambda_i \geq 0$.

10.

Quitte à renuméroter, on peut supposer $\lambda_1 = 0 < \lambda_2 \leq \dots \leq \lambda_n$. Soit $x = \sum_{i=1}^n x_i e_i \in E$. On a :

$$\begin{aligned}
 p(x) &= x_1 e_1 \\
 x - p(x) &= \sum_{i=2}^n x_i e_i \\
 u(x - p(x)) &= u\left(\sum_{i=2}^n x_i e_i\right) \\
 &= \sum_{i=2}^n u(x_i e_i) \\
 &= \sum_{i=2}^n x_i u(e_i) \\
 &= \sum_{i=2}^n x_i \lambda_i e_i
 \end{aligned}$$

puis

$$\begin{aligned}
 p(x) &= x_1 e_1 \\
 x - p(x) &= \sum_{i=2}^n x_i e_i \\
 \langle u(x - p(x)) \mid x \rangle &= \left\langle \sum_{i=2}^n x_i \lambda_i e_i \mid \sum_{j=1}^n x_j e_j \right\rangle \\
 &= \sum_{i=2}^n x_i \lambda_i \sum_{j=1}^n x_j \underbrace{\langle e_i \mid e_j \rangle}_{=\delta_{ij}} \\
 &= \sum_{i=2}^n x_i^2 \lambda_i \\
 &\geq \sum_{i=2}^n x_i^2 \lambda_2 \\
 &= \lambda_2 \sum_{i=2}^n x_i^2 \\
 &= \lambda_2 \|x - p(x)\|^2
 \end{aligned}$$

11.

Soit $i \in \llbracket 1, N \rrbracket$. La colonne i du produit πK vaut:

$$\begin{aligned} \sum_{j=1}^N \pi(j) K_{ji} &= \sum_{j=1}^N \pi(i) K_{ij} \\ &= \pi(i) \underbrace{\sum_{j=1}^N K_{ij}}_{=1} \\ &= \pi(i) \end{aligned}$$

car K est un noyau de Markov. On a donc bien:

$$\pi K = \pi$$

12.

Il est clair que

$$\langle X, Y \rangle = \langle Y, X \rangle$$

et

$$\langle \mu X + Z, Y \rangle = \mu \langle X, Y \rangle + \langle Z, Y \rangle$$

i.e. \langle, \rangle est une forme bilinéaire symétrique. Ensuite,

$$\langle X, X \rangle = \sum_{i=1}^N x_i^2 \underbrace{\pi(i)}_{\geq 0} \geq 0$$

et en plus

$$\begin{aligned} \langle X, X \rangle = 0 &\Leftrightarrow \sum_{i=1}^N x_i^2 \pi(i) = 0 \\ &\Leftrightarrow \forall i \in \llbracket 1, N \rrbracket, \quad x_i^2 \pi(i) = 0 \\ &\Leftrightarrow \forall i \in \llbracket 1, N \rrbracket, \quad x_i = 0 \\ &\Leftrightarrow X = 0 \end{aligned}$$

car $\forall i \in \llbracket 1, N \rrbracket, \quad \pi(i) \neq 0$.

\langle, \rangle est bien un produit scalaire.

13.

d'après l'énoncé, 1 est une valeur propre de K d'ordre 1, autrement dit $\dim(K - I_N) = 1$. Or K est un noyau de Markov, ce qui implique $KU = U$ d'après 1. On en déduit que $\ker u = \ker(K - I_N) = \text{vect}(U)$.

Soit $(X, Y) \in M_{n1}(\mathbb{R})$.

$$\begin{aligned}
\langle X, u(Y) \rangle &= \sum_{i=1}^N x_i \left(- \sum_{j=1}^N K_{ij} y_j + y_i \right) \pi(i) \\
&= - \sum_{i=1}^N x_i \left(\sum_{j=1}^N K_{ij} y_j \pi(i) \right) + \sum_{i=1}^N x_i y_i \pi(i) \\
&= - \sum_{i=1}^N x_i \left(\sum_{j=1}^N y_j K_{ij} \pi(i) \right) + \sum_{i=1}^N x_i y_i \pi(i) \\
&= - \sum_{i=1}^N x_i \left(\sum_{j=1}^N y_j K_{ji} \pi(j) \right) + \sum_{j=1}^N x_j y_j \pi(j) \\
&= - \sum_{j=1}^N \left(\sum_{i=1}^N x_i y_j K_{ji} \pi(j) \right) + \sum_{j=1}^N x_j y_j \pi(j) \\
&= - \sum_{j=1}^N y_j \pi(j) \left(\sum_{i=1}^N x_i K_{ji} \right) + \sum_{j=1}^N x_j y_j \pi(j) \\
&= \sum_{j=1}^N y_j \pi(j) \left(- \sum_{i=1}^N x_i K_{ji} + x_j \right) \\
&= \sum_{j=1}^N y_j \pi(j) \left((-K + I_N) X \right)_j \\
&= \langle u(X), Y \rangle
\end{aligned}$$

On a montré que u est un endomorphisme autoadjoint de E .

14.

$$\begin{aligned}
\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N (x_i - x_j)^2 K_{ij} \pi(i) &= \sum_{i=1}^N \pi(i) \sum_{j=1}^N (x_i - x_j)^2 K_{ij} \\
&= \sum_{i=1}^N \pi(i) \sum_{j=1}^N (x_i^2 + x_j^2 - 2x_i x_j) K_{ij} \\
&= \sum_{i=1}^N \pi(i) \left(\sum_{j=1}^N x_i^2 K_{ij} + \sum_{j=1}^N x_j^2 K_{ij} - 2 \sum_{j=1}^N x_i x_j K_{ij} \right) \\
&= \sum_{i=1}^N \pi(i) \left(x_i^2 \underbrace{\sum_{j=1}^N K_{ij}}_{=1} + \sum_{j=1}^N x_j^2 K_{ij} - 2x_i \sum_{j=1}^N x_j K_{ij} \right) \\
&= \sum_{i=1}^N \left(\pi(i) x_i^2 + \sum_{j=1}^N x_j^2 K_{ij} \pi(i) - 2x_i \sum_{j=1}^N x_j \underbrace{K_{ij} \pi(i)}_{K_{ji} \pi(j)} \right) \\
&= \sum_{i=1}^N \left(\pi(i) x_i^2 + \sum_{j=1}^N x_j^2 K_{ij} \pi(i) - 2x_i \sum_{j=1}^N x_j K_{ji} \pi(j) \right)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&= \sum_{i=1}^N \pi(i) x_i^2 + \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N x_j^2 \underbrace{K_{ij} \pi(i)}_{K_{ji} \pi(j)} - 2 \sum_{i=1}^N x_i \sum_{j=1}^N x_j K_{ji} \pi(j) \\
&= \sum_{i=1}^N \pi(i) x_i^2 + \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N x_j^2 K_{ji} \pi(j) - 2 \sum_{j=1}^N x_j \pi(j) \sum_{i=1}^N K_{ji} x_i \\
&= \sum_{i=1}^N \pi(i) x_i^2 + \sum_{j=1}^N x_j^2 \pi(j) \underbrace{\sum_{i=1}^N K_{ji}}_{=1} - 2 \sum_{j=1}^N x_j \pi(j) (KX)_j \\
&= 2 \sum_{i=1}^N \pi(i) x_i^2 - 2 \sum_{j=1}^N x_j \pi(j) (KX)_j \\
&= 2 \sum_{i=1}^N \pi(i) x_i^2 - 2 \sum_{i=1}^N x_i \pi(i) (KX)_i \\
&= 2 \sum_{i=1}^N \pi(i) x_i (x_i - (KX)_i) \\
&= 2 \sum_{i=1}^N \pi(i) x_i u(X)_i \\
&= 2 \langle X, u(X) \rangle \\
&= 2q_u(X)
\end{aligned}$$

Cela montre en particulier que $\forall X \in M_{n1}(\mathbb{R}), \quad q_u(X) \geq 0$.

D'après la question 9, les valeurs propres de l'endomorphisme autoadjoint positif u sont positives.

15.

Soit $(i, j) \in \llbracket 1, N \rrbracket$, fixé. la somme de la série entière de rayon $R = +\infty : \sum_{n=0}^{+\infty} \frac{t^n K_{ij}^n}{n!}$ est dérivable sur $] -\infty, +\infty[$ et de même $H_t[i, j]$:

$$\begin{aligned}
\forall t \in \mathbb{R}, \quad H'_t[i, j] &= e^{-t} \left(- \sum_{n=0}^{+\infty} \frac{t^n K_{ij}^n}{n!} + \sum_{n=1}^{+\infty} \frac{nt^{n-1} K_{ij}^n}{n!} \right) \\
&= e^{-t} \left(- \sum_{n=0}^{+\infty} \frac{t^n K_{ij}^n}{n!} + \sum_{n=1}^{+\infty} \frac{t^{n-1} K_{ij}^n}{(n-1)!} \right) \\
&= e^{-t} \left(- \sum_{n=0}^{+\infty} \frac{t^n K_{ij}^n}{n!} + K_{ij} \sum_{n=1}^{+\infty} \frac{t^{n-1} K_{ij}^{n-1}}{(n-1)!} \right) \\
&= e^{-t} \left(- \sum_{n=0}^{+\infty} \frac{t^n K_{ij}^n}{n!} + K_{ij} \sum_{n=0}^{+\infty} \frac{t^n K_{ij}^n}{(n)!} \right) \\
&= e^{-t} (-1 + K_{ij}) \sum_{n=0}^{+\infty} \frac{t^n K_{ij}^n}{n!} \\
&= (-1 + K_{ij}) H_t[i, j] \quad \textcircled{2}
\end{aligned}$$

Calculons le coefficient (i, j) du produit matriciel KH_t :

$$\begin{aligned}
 (KH_t)_{ij} &= \sum_{k=0}^N K_{ik} H_t[k, j] \\
 &= e^{-t} \sum_{k=0}^N K_{ik} \sum_{n=0}^{+\infty} \frac{t^n K_{kj}^n}{n!} \\
 &= e^{-t} \sum_{n=0}^{+\infty} \sum_{k=0}^N K_{ik} \frac{t^n K_{kj}^n}{n!} \\
 &= e^{-t} \sum_{n=0}^{+\infty} \frac{t^n}{n!} \sum_{k=0}^N K_{ik} K_{kj}^n \\
 &= e^{-t} \sum_{n=0}^{+\infty} \frac{t^n}{n!} K_{ij}^{n+1} \\
 &= K_{ij} e^{-t} \sum_{n=0}^{+\infty} \frac{t^n}{n!} K_{ij}^n \\
 (KH_t)_{ij} &= K_{ij} H_t[i, j]
 \end{aligned}$$

Autrement dit, les deux matrices K et H ont la relativement troublante propriété que leur produit matriciel revient à multiplier les éléments correspondants deux à deux (et a priori elles ne commutent pas donc ne sont pas nécessairement simultanément diagonalisables). On peut reformuler ② :

$$\forall t \in \mathbb{R}, \quad H'_t[i, j] = -H_t[i, j] + (KH_t)_{ij}$$

ce qui montre que $H'(t) = -H + KH = (-I_N + K)H$.

Soit $X \in E$ fixé, indépendamment de t . La fonction

$$\begin{aligned}
 \psi_X : \mathbb{R} &\rightarrow M_{n,1}(\mathbb{R}) \\
 t &\mapsto H_t X
 \end{aligned}$$

est dérivable sur \mathbb{R} , et

$$\begin{aligned}
 \forall t \in \mathbb{R}, \quad \psi'_X(t) &= H'_t(t)X \\
 &= (-I_N + K)H_t X
 \end{aligned}$$