



Le groupe symétrique

Exercices de Jean-Louis Rouget. Retrouver aussi cette fiche sur www.maths-france.fr

* très facile ** facile *** difficulté moyenne **** difficile ***** très difficile
 I : Incontournable T : pour travailler et mémoriser le cours

Exercice 1 **IT

Soit σ l'élément de S_{12} : $\sigma = (3\ 10\ 7\ 1\ 2\ 6\ 4\ 5\ 12\ 8\ 9\ 11)$.

1. Combien σ possède-t-elle d'inversions ? Que vaut sa signature ?
2. Décomposer σ en produit de transpositions. Retrouvez sa signature.
3. Déterminer les orbites de σ .
4. Déterminer σ^{2005} .

[Correction ▼](#)

[005353]

Exercice 2 ***IT

Démontrer que S_n est engendré par $\tau_{1,2}, \tau_{1,3}, \dots, \tau_{1,n}$.

[Correction ▼](#)

[005354]

Exercice 3 ***IT

Démontrer que A_n est engendré par les cycles de longueur 3 (pour $n \geq 3$).

[Correction ▼](#)

[005355]

Exercice 4 ***I

Démontrer que S_n est engendré par $\tau_{1,2}$ et le cycle $(2\ 3 \dots n\ 1)$.

[Correction ▼](#)

[005356]

Exercice 5 ***I

Soit (G, \times) un groupe. Montrer que (G, \times) est isomorphe à un sous-groupe de $(S(G), \circ)$ et que, en particulier, tout groupe fini d'ordre n est isomorphe à un sous-groupe de S_n (théorème de CAYLEY). (Indication : montrer que pour chaque x de G , l'application $y \mapsto xy$ est une permutation de G .)

[Correction ▼](#)

[005357]

Exercice 6 ***

Soit σ une permutation de $\{1, \dots, n\}$ et k le nombre d'orbites de σ . Montrer que $\varepsilon(\sigma) = (-1)^{n-k}$.

[Correction ▼](#)

[005358]

Exercice 7 ***I

σ étant une permutation de $\{1, \dots, n\}$ donnée, on définit la matrice notée P_σ , carrée d'ordre n dont le terme ligne i colonne j est $\delta_{i, \sigma(j)}$ (où $\delta_{i,j}$ est le symbole de KRONECKER. On note G l'ensemble des P_σ où σ décrit S_n .)

1. (a) σ et σ' étant deux éléments de S_n , calculer $P_\sigma \times P_{\sigma'}$.
 (b) En déduire que (G, \times) est un sous-groupe de $(GL_n(\mathbb{R}), \times)$, isomorphe à (S_n, \circ) (les matrices P_σ sont appelées « matrices de permutation »).

2. (Une utilisation des P_σ) A étant une matrice carrée donnée, calculer AP_σ et $P_\sigma A$. Que constate-t-on ?

[Correction ▼](#)

[005359]

Exercice 8 *I**

A_1, A_2, \dots, A_p sont p matrices carrées d'ordre n , deux à deux distinctes et inversibles. On suppose que $\{A_1, \dots, A_p\}$ est stable pour \times . Montrer que $\{A_1, \dots, A_p\}$ est un sous groupe de $(GL_n(\mathbb{R}), \times)$.

[Correction ▼](#)

[005360]

Exercice 9 ***

Dans $E = \mathbb{R}^n$, on considère l'hyperplan H d'équation $x_1 + \dots + x_n = 0$ dans la base canonique $(e_i)_{1 \leq i \leq n}$ de E . Pour $\sigma \in S_n$ donnée, on considère l'endomorphisme f_σ de E défini par : $\forall i \in E, f_\sigma(e_i) = e_{\sigma(i)}$.

On pose alors $p = \frac{1}{n!} \sum_{\sigma \in S_n} f_\sigma$. Montrer que p est une projection dont on déterminera l'image et la direction.

[Correction ▼](#)

[005361]

Correction de l'exercice 1 ▲

1. Les inversions de σ sont : $\sigma = (3\ 10\ 7\ 1\ 2\ 6\ 4\ 5\ 12\ 8\ 9\ 11)$.

$\{1,4\}, \{1,5\}, \{2,3\}, \{2,4\}, \{2,5\}, \{2,6\}, \{2,7\}, \{2,8\}, \{2,10\}, \{2,11\}, \{3,4\}, \{3,5\}, \{3,6\}, \{3,7\},$
 $\{3,8\}, \{6,7\}, \{6,8\}, \{9,10\}, \{9,11\}, \{9,12\}$.

Au total, il y a $2 + 8 + 5 + 2 + 3 = 20$ inversions. σ est donc une permutation paire (de signature 1).

2. $\tau_{11,12} \circ \sigma = (3\ 10\ 7\ 1\ 2\ 6\ 4\ 5\ 11\ 8\ 9\ 12)$.

Puis, $\tau_{9,11} \circ \tau_{11,12} \circ \sigma = (3\ 10\ 7\ 1\ 2\ 6\ 4\ 5\ 9\ 8\ 11\ 12)$.

Puis, $\tau_{10,8} \circ \tau_{9,11} \circ \tau_{11,12} \circ \sigma = (3\ 8\ 7\ 1\ 2\ 6\ 4\ 5\ 9\ 10\ 11\ 12)$.

Puis, $\tau_{8,5} \circ \tau_{10,8} \circ \tau_{9,11} \circ \tau_{11,12} \circ \sigma = (3\ 5\ 7\ 1\ 2\ 6\ 4\ 8\ 9\ 10\ 11\ 12)$.

Puis, $\tau_{7,4} \circ \tau_{8,5} \circ \tau_{10,8} \circ \tau_{9,11} \circ \tau_{11,12} \circ \sigma = (3\ 5\ 4\ 1\ 2\ 6\ 7\ 8\ 9\ 10\ 11\ 12)$.

Puis, $\tau_{5,2} \circ \tau_{7,4} \circ \tau_{8,5} \circ \tau_{10,8} \circ \tau_{9,11} \circ \tau_{11,12} \circ \sigma = (3\ 2\ 4\ 1\ 5\ 6\ 7\ 8\ 9\ 10\ 11\ 12)$.

Puis, $\tau_{1,4} \circ \tau_{5,2} \circ \tau_{7,4} \circ \tau_{8,5} \circ \tau_{10,8} \circ \tau_{9,11} \circ \tau_{11,12} \circ \sigma = (3\ 2\ 1\ 4\ 5\ 6\ 7\ 8\ 9\ 10\ 11\ 12) = \tau_{1,3}$.

Par suite,

$$\sigma = \tau_{11,12} \circ \tau_{9,11} \circ \tau_{10,8} \circ \tau_{8,5} \circ \tau_{7,4} \circ \tau_{5,2} \circ \tau_{1,4} \circ \tau_{1,3}.$$

3. $O(1) = \{1,3,4,7\} = O(3) = O(4) = O(7)$, puis $O(2) = \{2,5,8,10\}$ puis $O(6) = \{6\}$ et $O(9) = \{9,11,12\} = O(11) = O(12)$. σ a 4 orbites, deux de cardinal 4, une de cardinal 3 et un singleton (correspondant à un point fixe).

4. σ est donc le produit commutatif des cycles $c_1 = \begin{pmatrix} 1 & 3 & 4 & 7 \\ 3 & 7 & 7 & 4 \end{pmatrix}$, $c_2 = \begin{pmatrix} 2 & 5 & 8 & 10 \\ 10 & 2 & 5 & 8 \end{pmatrix}$ et

$$c_3 = \begin{pmatrix} 9 & 11 & 12 \\ 12 & 9 & 11 \end{pmatrix}.$$

On a $c_1^4 = c_2^4 = Id$ et $c_3^3 = Id$. Or, $2005 = 4 \cdot 1001 + 1$. Donc, $c_1^{2005} = c_1(c_1^4)^{1001} = c_1$, et de même $c_2^{2005} = c_2$.
Puis, $c_3^{2005} = (c_3^3)^{668} c_3 = c_3$. Puisque c_1, c_2 et c_3 commutent,

$$\sigma^{2005} = c_1^{2005} c_2^{2005} c_3^{2005} = c_1 c_2 c_3 = \sigma = (3\ 10\ 7\ 1\ 2\ 6\ 4\ 5\ 12\ 8\ 9\ 11).$$

Correction de l'exercice 2 ▲

(S_n, \circ) est engendré par les transpositions. Il suffit donc de montrer que pour $2 \leq i < j \leq n$, la transposition $\tau_{i,j}$ est produit des $\tau_{1,k}$, $2 \leq k \leq n$.

Mais $\tau_{1,i} \circ \tau_{1,j} \circ \tau_{1,i} = (i1j)(j1i)(i1j) = (1ij) = \tau_{i,j}$ ce qu'il fallait démontrer.

Correction de l'exercice 3 ▲

Les éléments de A_n sont les produits pairs de transpositions. Il suffit donc de vérifier qu'un produit de deux transpositions est un produit de cycles de longueur 3.

Soient i, j et k trois éléments deux à deux distincts de $\{1, \dots, n\}$. $\tau_{i,k} \circ \tau_{i,j}$ est le 3-cycle : $i \rightarrow j \rightarrow k \rightarrow i$, ce qui montre qu'un 3-cycle est pair et que le produit de deux transpositions dont les supports ont en commun un singleton est un 3-cycle.

Le cas $\tau_{i,j} \circ \tau_{i,j} = Id = (231)(312)$ est immédiat. Il reste à étudier le produit de deux transpositions à supports disjoints.

Soient i, j, k et l quatre éléments de deux à deux distincts de $\{1, \dots, n\}$.

$$\tau_{i,j} \circ \tau_{k,l} = (jkl)(ijlk) = (jilk) = (jkil)(ljik).$$

Donc, $\tau_{i,j} \circ \tau_{k,l}$ est un bien un produit de 3-cycles ce qui achève la démonstration.

Correction de l'exercice 4 ▲

D'après l'exercice 2, il suffit de montrer que pour $2 \leq i \leq n$, $\tau_{1,i}$ peut s'écrire en utilisant uniquement $\tau = \tau_{1,2}$ et $c = (2\ 3 \dots n\ 1)$. On note que $c^n = Id$.

Tout d'abord, pour $1 \leq i \leq n-1$, étudions $\sigma = c^{i-1} \circ \tau \circ c^{n-i+1}$.

Soit $k \in \{1, \dots, n\}$.

$$\begin{aligned} \tau \circ c^{n-i+1}(k) \neq c^{n-i+1}(k) \leq c^{n-i+1}(k) \in \{1, 2\} &\Leftrightarrow k \in \{c^{-n+i-1}(1), c^{-n+i-1}(2)\} \Leftrightarrow k \in \{c^{i-1}(1), c^{i-1}(2)\} \\ &\Leftrightarrow k \in \{i, i+1\}. \end{aligned}$$

Donc, si $k \notin \{i, i+1\}$,

$$\sigma(k) = c^{i-1}(k)(\tau \circ c^{n-i+1}(k)) = c^{i-1}(c^{n-i+1}(k)) = c^n(k) = k,$$

et la restriction de σ à $\{1, \dots, n\} \setminus \{i, i+1\}$ est l'identité de cet ensemble. Comme σ n'est pas l'identité puisque $\sigma(i) \neq i$, σ est donc nécessairement la transposition $\tau_{i,i+1}$.

On a montré que $\forall i \in \{1, \dots, n-1\}$, $c^{i-1} \circ \tau \circ c^{n-i+1} = \tau_{i,i+1}$.

Vérifions maintenant que les $\tau_{1,i}$ s'écrivent à l'aide des $\tau_{j,j+1}$. D'après l'exercice 2, $\tau_{i,j} = \tau_{1,i} \circ \tau_{1,j} \circ \tau_{1,i}$, et donc bien sûr, plus généralement, $\tau_{i,j} = \tau_{k,i} \circ \tau_{k,j} \circ \tau_{k,i}$.

Par suite, $\tau_{1,i} = \tau_{1,2} \circ \tau_{2,i} \circ \tau_{1,2}$ puis, $\tau_{2,i} = \tau_{2,3} \circ \tau_{3,i} \circ \tau_{2,3}$, puis, $\tau_{3,i} = \tau_{3,4} \circ \tau_{4,i} \circ \tau_{3,4} \dots$ et $\tau_{i-2,i} = \tau_{i-2,i-1} \circ \tau_{i-1,i} \circ \tau_{i-2,i-1}$. Finalement,

$$\tau_{1,i} = \tau_{1,2} \circ \tau_{2,3} \circ \dots \circ \tau_{i-2,i-1} \circ \tau_{i-1,i} \circ \tau_{i-2,i-1} \circ \dots \circ \tau_{2,3} \circ \tau_{1,2},$$

ce qui achève la démonstration.

Correction de l'exercice 5 ▲

Soit (G, \times) un groupe. Pour x élément de G , on considère $f_x : G \rightarrow G$. f_x est une application de G vers G et de plus, clairement $f_x \circ f_{x^{-1}} = f_{x^{-1}} \circ f_x = Id_G$. Donc, pour tout élément x de G , f_x est une permutation de G .

Soit alors $\varphi : (G, \times) \rightarrow (S_G, \circ)$. D'après ce qui précède, φ est une application. De plus, φ est de plus

$$x \mapsto f_x$$

un morphisme de groupes. En effet, pour $(x, x', y) \in G^3$, on a :

$$\varphi((xx'))(y) = f_{xx'}(y) = xx'y = f_x(f_{x'}(y)) = f_x \circ f_{x'}(y) = (\varphi(x) \circ \varphi(x'))(y),$$

et donc $\forall (x, x') \in G^2$, $\varphi(xx') = \varphi(x) \circ \varphi(x')$.

Enfin, φ est injectif car, pour x élément de G :

$$\varphi(x) = Id \Rightarrow \forall y \in G, xy = y \Rightarrow xe = e \Rightarrow x = e.$$

Donc, $\text{Ker } \varphi = \{e\}$, et φ est injectif.

φ est ainsi un isomorphisme de groupes de (G, \times) sur $(f(G), \circ)$ qui est un sous groupe de (S_G, \circ) . (G, \times) est bien isomorphe à un sous groupe de (S_G, \circ) .

Correction de l'exercice 6 ▲

Montrons d'abord par récurrence sur $l \geq 2$ que la signature d'un cycle de longueur l est $(-1)^{l-1}$.

C'est connu pour $l = 2$ (signature d'une transposition).

Soit $l \geq 2$. Supposons que tout cycle de longueur l ait pour signature $(-1)^{l-1}$. Soit c un cycle de longueur $l+1$.

On note $\{x_1, x_2, \dots, x_{l+1}\}$ le support de c et on suppose que, pour $1 \leq i \leq l$, $c(x_i) = x_{i+1}$ et que $c(x_{l+1}) = x_1$.

Montrons alors que $\tau_{x_1, x_{l+1}} \circ c$ est un cycle de longueur l . $\tau_{x_1, x_{l+1}} \circ c$ fixe déjà x_{l+1} puis, si $1 \leq i \leq l-1$, $\tau_{x_1, x_{l+1}} \circ c(x_i) = \tau_{x_1, x_{l+1}}(x_{i+1}) = x_{i+1}$ (car x_{i+1} n'est ni x_1 , ni x_{l+1}), et enfin $\tau_{x_1, x_{l+1}} \circ c(x_l) = \tau_{x_1, x_{l+1}}(x_{l+1}) = x_1$. $\tau_{x_1, x_{l+1}} \circ c$ est donc bien un cycle de longueur l . Par hypothèse de récurrence, $\tau_{x_1, x_{l+1}} \circ c$ a pour signature $(-1)^{l-1}$ et donc, c a pour signature $(-1)^{(l+1)-1}$.

Montrons maintenant que si σ est une permutation quelconque de $\{1, \dots, n\}$ ayant k orbites la signature de σ est $(-1)^{n-k}$.

Si σ est l'identité, σ a n orbites et le résultat est clair.

Si σ n'est pas l'identité, on décompose σ en produit de cycles à supports disjoints.

Posons $\sigma = c_1 \dots c_p$ où p désigne le nombre d'orbites de σ non réduites à un singleton et donc $k - p$ est le nombre de points fixes de σ . Si l_i est la longueur de c_i , on a donc $n = l_1 + \dots + l_p + (k - p)$ ou encore $n - k = l_1 + \dots + l_p - p$.

Mais alors,

$$\varepsilon(\sigma) = \prod_{i=1}^p \varepsilon(c_i) = \prod_{i=1}^p (-1)^{l_i-1} = (-1)^{l_1+\dots+l_p-p} = (-1)^{n-k}.$$

Correction de l'exercice 7 ▲

1. (a) Soient σ et σ' deux éléments de S_n . Soit $(i, j) \in \{1, \dots, n\}^2$. Le coefficient ligne i , colonne j de $P_\sigma P_{\sigma'}$ vaut

$$\sum_{k=1}^n \delta_{i, \sigma(k)} \delta_{k, \sigma'(j)} = \delta_{i, \sigma(\sigma'(j))},$$

et est donc aussi le coefficient ligne i , colonne j de la matrice $P_{\sigma \circ \sigma'}$. Par suite,

$$\forall (\sigma, \sigma') \in (S_n)^2, P_\sigma \times P_{\sigma'} = P_{\sigma \circ \sigma'}.$$

- (b) Soit $\sigma \in S_n$. D'après a), $P_\sigma P_{\sigma^{-1}} = P_{\sigma \circ \sigma^{-1}} = P_{Id} = I_n = P_{\sigma^{-1}} P_\sigma$. On en déduit que toute matrice P_σ est inversible, d'inverse $P_{\sigma^{-1}}$. Par suite, $G \subset GL_n(\mathbb{R})$ (et clairement, $G \neq \emptyset$).

Soit alors $(\sigma, \sigma') \in (S_n)^2$.

$$P_\sigma P_{\sigma'}^{-1} = P_\sigma P_{\sigma'^{-1}} = P_{\sigma \circ \sigma'^{-1}} \in G.$$

On a montré que G est un sous-groupe de $(GL_n(\mathbb{R}), \times)$.

Soit $\varphi : S_n \rightarrow G$. D'après a), φ est un morphisme de groupes. φ est clairement surjectif. Il

$$\sigma \mapsto P_\sigma$$

reste à vérifier que φ est injectif.

Soit $\sigma \in S_n$.

$$\begin{aligned} \sigma \in \text{Ker} \varphi &\Rightarrow P_\sigma = I_n \Rightarrow \forall (i, j) \in \{1, \dots, n\}^2, \delta_{i, \sigma(j)} = \delta_{i, j} \\ &\Rightarrow \forall i \in \{1, \dots, n\}, \delta_{i, \sigma(i)} = 1 \Rightarrow \forall i \in \{1, \dots, n\}, \sigma(i) = i \\ &\Rightarrow \sigma = Id. \end{aligned}$$

Puisque le noyau du morphisme φ est réduit à $\{Id\}$, φ est injectif.

Ainsi, φ est un isomorphisme du groupe (S_n, \circ) sur le groupe (G, \times) et on a montré que (G, \times) est un sous-groupe de $(GL_n(\mathbb{R}), \times)$, isomorphe à (S_n, \circ) .

2. Soit $(i, j) \in \{1, \dots, n\}^2$. Le coefficient ligne i , colonne j de AP_σ vaut :

$$\sum_{k=1}^n a_{i, k} \delta_{k, \sigma(j)} = a_{i, \sigma(j)}.$$

Ainsi, l'élément ligne i , colonne j , de AP_σ est l'élément ligne i , colonne $\sigma(j)$, de A , ou encore, si j est un élément donné de $\{1, \dots, n\}$, la j -ème colonne de AP_σ est la $\sigma(j)$ -ème colonne de A . Ainsi, si on note C_1, \dots, C_n les colonnes de A (et donc $A = (C_1, \dots, C_n)$), alors $AP_\sigma = (C_{\sigma(1)}, \dots, C_{\sigma(n)})$. En clair, multiplier A par P_σ à droite a pour effet d'appliquer la permutation σ aux colonnes de A (puisque P_σ est inversible, on retrouve le fait que permuter les colonnes de A ne modifie pas le rang de A).

De même, le coefficient ligne i , colonne j , de $P_\sigma A$ vaut

$$\sum_{k=1}^n \delta_{i, \sigma(k)} a_{k,j} = \sum_{k=1}^n \delta_{\sigma^{-1}(i), k} a_{k,j} = a_{\sigma^{-1}(i), j},$$

(on a utilisé $\sigma(k) = i \Leftrightarrow k = \sigma^{-1}(i)$) et multiplier A par P_σ à gauche a pour effet d'appliquer la permutation σ^{-1} aux lignes de A .

Correction de l'exercice 8 ▲

$G = \{A_1, \dots, A_p\}$ est déjà une partie non vide de $GL_n(\mathbb{R})$, stable pour \times . Il reste à vérifier que G est stable pour le passage à l'inverse.

Soient $i \in \{1, \dots, n\}$, puis $\varphi_i : G \rightarrow G$. Puisque G est stable pour le produit, φ_i est une application de $A \mapsto A_i A$

G dans G .

Montrons que φ_i est injective. Soit $(A, B) \in G$.

$$\varphi_i(A) = \varphi_i(B) \Rightarrow A_i A = A_i B \Rightarrow A_i^{-1} A_i A = A_i^{-1} A_i B \Rightarrow A = B.$$

Donc, φ_i est une application injective de l'ensemble fini G dans lui-même. On sait alors que φ_i est une permutation de G .

Par φ_i , A_i a un antécédent A dans G . $A_i A = A_i$ fournit $A_i^{-1} A_i A = A_i^{-1} A_i$ puis $A = I \in G$. Ainsi, G contient la matrice I . Ensuite, I a un antécédent par φ_i dans G . Donc, il existe $B \in G$ telle que $A_i B = I$. Mais alors $A_i^{-1} = B \in G$.

G est bien stable pour le passage à l'inverse et est donc un sous-groupe de $(GL_n(\mathbb{R}), \times)$.

Correction de l'exercice 9 ▲

Pour $(x_1, \dots, x_n) \in E$, on pose $\varphi((x_1, \dots, x_n)) = x_1 + \dots + x_n$. φ est une forme linéaire non nulle sur E et H est le noyau de φ . H est donc bien un hyperplan de E .

Il est clair que, pour $(\sigma, \sigma') \in S_n^2$, $f_\sigma \circ f_{\sigma'} = f_{\sigma \circ \sigma'}$. $(\mathcal{L}(E), +, \cdot)$ est un espace vectoriel et donc, p est bien un endomorphisme de E .

$$p^2 = \frac{1}{n!^2} \left(\sum_{\sigma \in S_n} f_\sigma \right)^2 = \sum_{(\sigma, \sigma') \in (S_n)^2} f_\sigma \circ f_{\sigma'}.$$

Mais, (S_n, \circ) est un groupe fini. Par suite, l'application $S_n \rightarrow S_n$, injective (même démarche que dans

$$\sigma \mapsto \sigma \circ \sigma'$$

l'exercice 8), est une permutation de S_n . On en déduit que, pour σ' donnée, $\sum_{\sigma \in S_n} f_{\sigma \circ \sigma'} = \sum_{\sigma \in S_n} f_\sigma$. Ainsi, en posant $q = n!p$.

$$p^2 = \frac{1}{n!^2} \sum_{\sigma' \in S_n} \left(\sum_{\sigma \in S_n} f_{\sigma \circ \sigma'} \right) = \frac{1}{n!^2} \sum_{\sigma' \in S_n} q = \frac{1}{n!^2} \cdot n!q = \frac{1}{n!} q = p.$$

p est donc une projection. Déterminons alors l'image et le noyau de p . Soit $i \in \{1, \dots, n\}$.

$$p(e_i) = \frac{1}{n!} \sum_{\sigma \in S_n} f_\sigma(e_i) = \frac{1}{n!} \sum_{\sigma \in S_n} e_{\sigma(i)}.$$

Maintenant, il y a (bien sûr) autant de permutations σ telles que $\sigma(i) = 1$, que de permutations σ telles que $\sigma(i) = 2, \dots$ ou de permutations σ telles que $\sigma(i) = n$, à savoir $\frac{n!}{n} = (n-1)!$. Donc,

$$\forall i \in \{1, \dots, n\}, p(e_i) = \frac{1}{n!} \frac{n!}{n} \sum_{k=1}^n e_k = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n e_k.$$

Posons $u = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n e_k$. D'après ce qui précède,

$$\text{Im } p = \text{Vect}(p(e_1), \dots, p(e_n)) = \text{Vect}(u).$$

Ensuite, si $x = x_1 e_1 + \dots + x_n e_n$ est un élément de E ,

$$p(x) = 0 \Leftrightarrow \sum_{k=1}^n x_k p(e_k) = 0 \Leftrightarrow \left(\sum_{k=1}^n x_k \right) u = 0 \Leftrightarrow \sum_{k=1}^n x_k = 0 \Leftrightarrow x \in H.$$

Ainsi, p est la projection sur $\text{Vect}(u)$ parallèlement à H .
