

# Endomorphismes cycliques, invariants de similitude et réduction de Frobenius

2012-2013

Référence : Xavier Gourdon, *Algèbre (2<sup>e</sup> édition)*, Ellipses, 2009, p.290.

## **Théorème 1.**

Soit  $E$  un  $\mathbb{K}$ -espace vectoriel de dimension finie  $n$ .

Soit  $f \in \mathcal{L}(E)$ .

Alors il existe une suite  $F_1, \dots, F_r$  de sous-espaces vectoriels de  $E$  non réduits à  $\{0\}$  et stables par  $f$  telle que :

(i)  $E = F_1 \oplus \dots \oplus F_r$

(ii)  $\forall i \in \{1, \dots, r\}, f_i := f|_{F_i}$  est un endomorphisme cyclique

(iii) si  $P_i$  désigne le polynôme minimal de  $f_i$ , on a :

$$\forall i \in \{1, \dots, r-1\}, P_{i+1} \mid P_i$$

La suite de polynômes  $P_1, \dots, P_r$  ne dépend que de  $f$ . On l'appelle suite des invariants de similitude de  $f$ .

## **Théorème 2** (Réduction de Frobenius).

Soit  $f \in \mathcal{L}(E)$ .

Soit  $P_1, \dots, P_r$  la suite des invariants de similitude de  $f$ .

Alors il existe une base  $\mathcal{B}$  de  $E$  telle que :

$$\text{Mat}_{\mathcal{B}}(f) = \begin{pmatrix} C(P_1) & & 0 \\ & \ddots & \\ 0 & & C(P_r) \end{pmatrix}$$

où  $C(P_i)$  désigne la matrice compagnon de  $P_i$ .

On a  $P_1 = \pi_f$  et  $P_1 \dots P_r = \chi_f$ .

## **Lemme.**

Soit  $f \in \mathcal{L}(E)$  un endomorphisme cyclique.

Alors il existe une base de  $E$  dans laquelle la matrice de  $f$  est égale à  $C(\pi_f)$ .

*Démonstration.* Il existe  $x \in E$  tel que  $(x, f(x), \dots, f^{n-1}(x))$  soit une base de  $E$ .

Si  $\pi_f = X^n + a_{n-1}X^{n-1} + \dots + a_0$ , alors  $f^n(x) = -a_{n-1}f^{n-1}(x) - \dots - a_0x$  car  $\pi_f$  annule  $f$ .  $\square$

*Démonstration du théorème 1.*

– Existence : soit  $k = \deg(\pi_f)$ , soit  $x \in E$ .

On note  $P_x$  le polynôme unitaire engendrant l'idéal :

$$\{P \in \mathbb{K}[X] / P(f)(x) = 0\}$$

et

$$E_x := \{P(f)(x) / P \in \mathbb{K}[X]\}$$

Soit  $x \in E$  tel que  $P_x = \pi_f$  (une preuve de l'existence d'un tel  $x$  est donnée en fin de document).

Le sous-espace vectoriel  $F := E_x$  est de dimension  $k$  et est stable par  $f$ .

On pose :

$$e_1 = x, e_2 = f(x), \dots, e_k = f^{k-1}(x)$$

Alors  $(e_1, \dots, e_k)$  forme une base de  $F$  car  $\deg(P_x) = k$  (plus de détails sont donnés en fin de document).

On la complète en une base  $(e_1, \dots, e_n)$  de  $E$  et on note  $(e_1^*, \dots, e_n^*)$  la base duale associée.

On note  $G = \Gamma^\circ$  où  $\Gamma = \{e_k^* \circ f^i, i \in \mathbb{N}\}$  (orthogonal vis-à-vis du dual).

i.e.  $G$  est l'ensemble des  $x$  tels que la  $k$ -ième coordonnée de  $f^i(x)$  dans  $(e_1, \dots, e_n)$  soit nulle pour tout  $i$ .

$G$  est un sev de  $E$  stable par  $f$ .

Montrons  $F \oplus G = E$  :

–  $F \cap G = \{0\}$  :

soit  $y \in F \cap G$ , si  $y \neq 0$  on peut écrire  $y = a_1e_1 + \dots + a_pe_p$  avec  $a_p \neq 0$  et  $p \leq k$ .

En composant par  $e_k^* \circ f^{k-p}$ , on a :

$$0 = e_k^*(a_1e_{k-p+1} + \dots + a_pe_k) = a_p$$

donc  $F \cap G = \{0\}$ .

–  $\dim F + \dim G = n$  :

$G = (\text{Vect } \Gamma)^\circ$  donc prouvons  $\dim(\text{Vect } \Gamma) = k$ .

On considère :

$$\begin{aligned} \varphi : \mathcal{L}_f &:= \{P(f) / P \in \mathbb{K}[X]\} \rightarrow \text{Vect } \Gamma \\ &g \mapsto e_k^* \circ g \end{aligned}$$

$\varphi$  est surjective par définition.

Si  $e_k^* \circ g = 0$  avec  $g \neq 0$ , on peut écrire :

$$g = a_1 \text{Id}_E + \dots + a_p f^{p-1}$$

avec  $p \leq k$  et  $a_p \neq 0$  car  $(\text{Id}_E, \dots, f_{p-1})$  est une base de  $\mathcal{L}_f$  (détails supplémentaires en fin de document).

$$\begin{aligned} 0 &= e_k^* \circ g(f^{k-p}(x)) \\ &= e_k^*(a_1 f^{k-p}(x) + \dots + a_p f^{k-1}(x)) = a_p \end{aligned}$$

Donc  $g = 0$  et  $\varphi$  est injective.

Donc  $\dim(\text{Vect } \Gamma) = \dim \mathcal{L}_f = k$ .

On note  $P_1$  le polynôme minimal de  $f|_F$  ( $\pi_f = P_x = P_1$ ) et  $P_2$  le polynôme minimal de  $f|_G$ .

$G$  est stable par  $f$  donc  $P_2 \mid P_1$ .

Puis on recommence sur  $f|_G$ .

– Unicité : soient  $F_1, \dots, F_r$  et  $G_1, \dots, G_s$  vérifiant les hypothèses du théorème.

On note  $P_i = \pi_{f|_{F_i}}$  et  $Q_j = \pi_{f|_{G_j}}$ .

On a  $P_1 = \pi_f = Q_1$ .

Supposons  $(P_1, \dots, P_r) \neq (Q_1, \dots, Q_s)$ .

On note  $j = \inf\{i, P_i \neq Q_i\}$ ,  $j$  existe car  $\sum_i \deg(P_i) = n = \sum_j \deg(Q_j)$ .

$$P_j(f)(E) = P_j(f)(F_1) \oplus \dots \oplus P_j(f)(F_{j-1})$$

car  $E = F_1 \oplus \dots \oplus F_r$  et  $P_j(f)(F_k) = 0$  pour  $k \geq j$  et les  $F_i$  sont stables par  $f$ .

Or

$$P_j(f)(E) = P_j(f)(G_1) \oplus \dots \oplus P_j(f)(G_s)$$

et

$$\dim P_j(f)(F_i) = \dim P_j(f)(G_i) \text{ pour } 1 \leq i \leq j-1$$

car d'après le lemme, il existe  $\mathcal{B}_i$  et  $\mathcal{B}'_i$  telles que  $\text{Mat}_{\mathcal{B}_i}(f|_{F_i}) = \text{Mat}_{\mathcal{B}'_i}(f|_{G_i})$ .

D'où :

$$0 = \dim P_j(f)(G_j) = \dots = \dim P_j(f)(G_s)$$

D'où  $Q_j \mid P_j$ , donc  $Q_j = P_j$  par symétrie. □

*Démonstration du théorème 2.* Soit  $\mathcal{B}_i$  base de  $F_i$  telle que  $\text{Mat}_{\mathcal{B}_i}(f|_{F_i}) = C(P_i)$ . La matrice de  $f$  dans la base  $(\mathcal{B}_1, \dots, \mathcal{B}_r)$  est bien de la forme voulue. □

## Détails supplémentaires

### Proposition.

Si  $k = \deg(\pi_f)$ ,  $\mathcal{L}_f$  est un sev de  $\mathcal{L}(E)$  de dimension  $k$ , dont une base est  $(Id_E, f, \dots, f^{k-1})$ .

Si  $l = \deg(P_x)$ ,  $E_x$  est un sev de  $E$  de dimension  $l$ , dont une base est  $(x, \dots, f^{l-1}(x))$ .

*Démonstration.*

$$\begin{aligned} \varphi : \mathbb{K}[X] &\rightarrow \mathcal{L}(E) \\ P &\mapsto P(f) \end{aligned}$$

est linéaire,  $\text{Im } \varphi = \mathcal{L}_f$ .

$$\ker \varphi = \{P \in \mathbb{K}[X] \mid P(f) = 0\} = (\pi_f)$$

Donc

$$\mathcal{L}_f \cong \mathbb{K}[X]/(\pi_f)$$

dont une base est  $(1, X, \dots, X^{k-1})$

Idem avec

$$\begin{aligned} \varphi : \mathbb{K}[X] &\rightarrow E \\ P &\mapsto P(f)(x) \end{aligned}$$

□

### Proposition.

Il existe  $x \in E$  tel que  $P_x = \pi_f$ .

*Démonstration.* Soit  $\pi_f = Q_1^{\alpha_1} \dots Q_l^{\alpha_l}$  avec  $Q_i$  irréductible unitaire,  $\alpha_i > 0$ .

– soit  $i \in \{1, \dots, l\}$ , soit  $R$  tel que  $\pi_f = Q_i^{\alpha_i} R$ .

$$0 = \pi_f(f) = Q_i^{\alpha_i}(f) \circ R(f)$$

Donc

$$\text{Im } R(f) \subseteq \ker Q_i^{\alpha_i}(f)$$

Si

$$\text{Im } R(f) \subseteq \ker Q_i^{\alpha_i-1}(f)$$

alors

$$Q_i^{\alpha_i-1}(f) \circ R(f) = 0$$

donc  $\pi_f \mid Q_i^{\alpha_i-1} R$ , or  $\deg Q_i^{\alpha_i-1} R < \deg \pi_f$ , donc il existe  $a_i \in \text{Im } R(f)$  tel que  $Q_i^{\alpha_i-1}(f)(a_i) \neq 0$ .

Mais  $Q_i^{\alpha_i}(f)(a_i) = 0$  donc  $P_{a_i} \mid Q_i^{\alpha_i}$ , donc  $P_{a_i} = Q_i^{\alpha_i}$  car  $P_{a_i} \nmid Q_i^{\alpha_i-1}$  et  $Q_i$  est irréductible.

En résumé, pour  $1 \leq i \leq l$ , il existe  $a_i \in E$  tel que  $P_{a_i} = Q_i^{\alpha_i}$ .

– Montrons que :

$$P_x \wedge P_y = 1 \implies P_{x+y} = P_x P_y$$

On a

$$P_x P_y(f)(x+y) = P_x P_y(f)(x) + P_x P_y(f)(y) = 0$$

Donc  $P_{x+y} \mid P_x P_y$ .

D'autre part,

$$P_{x+y}(f)(y) = -P_{x+y}(f)(x)$$

Donc

$$P_x P_{x+y}(f)(y) = -P_x P_{x+y}(f)(x) = 0$$

Donc  $P_y \mid P_x P_{x+y}$  et  $P_x \wedge P_y = 1$  donc  $P_y \mid P_{x+y}$ .

De même,  $P_x \mid P_{x+y}$  donc  $P_x P_y \mid P_{x+y}$  car  $P_x \wedge P_y = 1$ .

D'où  $P_x P_y = P_{x+y}$ .

– Alors pour  $1 \leq i \leq l$ , il existe  $a_i$  tel que  $P_{a_i} = Q_i^{\alpha_i}$  et  $Q_i^{\alpha_i} \wedge Q_j^{\alpha_j} = 1$  pour  $i \neq j$ , donc :

$$P_{\sum_{i=1}^l a_i} = \prod_{i=1}^l P_{a_i} = \pi_f$$

□