

III. Espaces de s.r.l. sur K

Objektyp: **Chapter**

Zeitschrift: **L'Enseignement Mathématique**

Band (Jahr): **33 (1987)**

Heft 1-2: **L'ENSEIGNEMENT MATHÉMATIQUE**

PDF erstellt am: **13.09.2024**

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

$$h_{ij} = \binom{i}{j}_q = \begin{cases} \frac{(i)_q!}{(j)_q!(i-j)_q!} & \text{si } i \geq j \\ 0 & \text{si } i < j, \end{cases}$$

où $(0)_q! = 1$, $(i)_q! = \prod_{s=1}^i (s)_q$ et $(s)_q = 1 + q + \dots + q^{s-1}$.

d) si $X_i = i$ alors H est la matrice des nombres de Stirling de seconde espèce $h_{ij} = S(i, j)$ pour $i \geq j$, $h_{ij} = 0$ pour $i < j$, définis par la formule

$$X^i = \sum_{j=0}^i S(i, j) X(X-1) \dots (X-j+1)$$

(voir [15]).

13) Soit $\xi = (\xi_n)$ une s.r.l. d'échelle $G(X) = X^m - a_{m-1}X^{m-1} - \dots - a_0$; on peut regarder son terme ξ_n en tant que polynôme en les variables a_0, \dots, a_{m-1} . Alors la suite donnée par

$$\eta_n = \frac{\partial^h \xi_n}{\partial a_0^{h_0} \dots \partial a_{m-1}^{h_{m-1}}}$$

est une s.r.l. d'échelle G^{h+1} .

III. ESPACES DE s.r.l. SUR \mathcal{K}

Dans I nous avons étudié une suite particulière $\xi = (\xi_n)$ à valeurs dans \mathcal{K} et donné différentes conditions équivalentes pour que ξ soit une s.r.l. Ici, nous étudions des espaces de suites et nous utilisons la structure d'espace vectoriel de l'ensemble des suites à valeurs dans \mathcal{K} .

1. Nous considérons l'ensemble $\mathcal{K}[X]$ des polynômes à coefficients dans \mathcal{K} et l'ensemble $\mathcal{K}[[X]]$ des séries formelles sur \mathcal{K} , tous deux avec leur structure de \mathcal{K} -espace vectoriel. Nous identifierons implicitement $\mathcal{K}[X]$ à l'espace $\mathcal{K}^{(\mathbb{N})}$ des suites à valeurs dans \mathcal{K} ultimement nulles et $\mathcal{K}[[X]]$ à l'espace $\mathcal{K}^{\mathbb{N}}$ des suites quelconques à valeurs dans \mathcal{K} (rappelons que $\mathcal{K}^{\mathbb{N}}$ est le dual linéaire de $\mathcal{K}^{(\mathbb{N})}$).

2. Etant donné une s.r.l. ξ , l'ensemble de toutes les échelles de récurrence qu'elle vérifie est un idéal de l'anneau $\mathcal{K}[X]$ il admet donc un générateur unitaire unique que l'on appelle le *polynôme minimal* de ξ . On appellera *rang* de ξ le degré du polynôme précédent. Evidemment, une suite d'ordre m

possède un rang au plus égal à m (contrairement au rang, l'ordre d'une s.r.l. fixée n'est pas défini de manière unique).

3. Soit G un polynôme fixé à coefficients dans \mathcal{K} . On écrira encore

$$G(X) = X^m - a_{m-1} X^{m-1} - \dots - a_0 = \prod_{i=1}^k (X - \omega_i)^{r_i}, \omega_i \in \mathcal{L}.$$

Nous considérons l'ensemble S_G de toutes les s.r.l. d'échelle G . Un élément ξ de S_G est uniquement déterminé par ses m premiers termes $\xi_0, \xi_1, \dots, \xi_{m-1}$; chaque autre terme ξ_n dépend linéairement de ceux-ci. Il en résulte que S_G est un sous-espace vectoriel de dimension m de $\mathcal{K}^{\mathbb{N}}$. Les m éléments $\xi^{(i)} = (\xi_n^{(i)})_{n \geq 0}$, $i = 0, \dots, m-1$, constituent une base de S_G si et seulement si le déterminant

$$\det((\xi_j^{(i)})_{0 \leq i, j \leq m-1})$$

est non nul.

Suivant les cas, il est utile de prendre une base de S_G de l'un des types suivants :

a) la base constituée par les s.r.l. dites *fondamentales*

$$\zeta^{(i)} = (\zeta_n^{(i)})_{n \geq 0}, i = 0, \dots, m-1$$

définies par les conditions initiales $\zeta_j^{(i)} = \delta_j^i$, $0 \leq j \leq m-1$ (δ_j^i est le symbole de Kronecker, $\delta_j^i = 1$ si $i = j$ et 0 sinon). Sur cette base, un élément ξ de S_G s'écrit tout simplement

$$(8) \quad \xi = \xi_0 \zeta^{(0)} + \dots + \xi_{m-1} \zeta^{(m-1)};$$

b) la base formée par les suites

$$(\omega_i^n)_{n \geq 0}, \binom{n}{1} \omega_i^{n-1}, \dots, \binom{n}{r_i-1} \omega_i^{n-r_i+1}, i = 1, \dots, k,$$

ce qui correspond aux formules (3) et (4);

c) enfin une base de la forme $\varphi, E\varphi, \dots, E^{m-1}\varphi$ où φ est une s.r.l. quelconque admettant G comme polynôme minimal (par exemple les suites $\zeta^{(0)}$ et $\zeta^{(m-1)}$ de la base a)).

4. Si à une suite $\xi = (\xi_n)_{n \geq 0}$ quelconque, on associe la *matrice de Hankel*

$$(9) \quad H(\xi) = \begin{pmatrix} \xi_0 & \xi_1 & \xi_2 & \dots & \xi_n & \dots \\ \xi_1 & \xi_2 & \xi_3 & \dots & \xi_{n+1} & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \xi_p & \xi_{p+1} & \xi_{p+2} & \dots & \xi_{n+p} & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \end{pmatrix}$$

alors on vérifie facilement que

- (i) la suite ξ est une s.r.l. si et seulement si il existe un entier m tel que tout mineur d'ordre plus grand que m extrait de $H(\xi)$ soit nul;
- (ii) si ξ est une s.r.l. de rang m alors son polynôme minimal est donné par le déterminant

$$(10) \quad G(X) = \begin{vmatrix} 1 & X & X^2 & \dots & X^m \\ \xi_0 & \xi_1 & \xi_2 & \dots & \xi_m \\ \xi_1 & \xi_2 & \xi_3 & \dots & \xi_{m+1} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \xi_{m-1} & \xi_m & \xi_{m+1} & \dots & \xi_{2m-1} \end{vmatrix}$$

5. De (5) résulte, comme nous l'avons déjà observé, que chaque élément de S_G admet un multiple quelconque de G comme polynôme caractéristique; autrement dit, l'espace S_G est l'orthogonal de l'idéal (G) engendré par G (regardé en tant que sous-espace de $\mathcal{K}[X]$):

$$(11) \quad S_G = (G)^\perp .$$

La dualité sous-entendue dans la formule précédente peut être décrite de manière plus explicite. Identifions la variable X à l'application linéaire

$$\begin{aligned} \ll X \gg : \mathcal{K}[X] &\rightarrow \mathcal{K}[X] \\ A(X) &\mapsto X \cdot A(X) \end{aligned}$$

(tout simplement la multiplication par X); alors l'application duale est l'opérateur de décalage E . Ainsi, à l'application de multiplication par $G(X)$: $A(X) \mapsto G(X) A(X)$ — dont l'image est (G) — correspond par dualité l'opérateur $G(E)$ — dont le noyau est S_G . La relation $(\text{Im } f)^\perp = \text{Ker } f^*$, valable pour une application linéaire quelconque f de duale f^* , équivaut à la relation (11) dans le cas considéré.

6. Le lien que nous avons indiqué entre le sous-espace S_G et l'idéal (G) peut être étendu en un lien entre l'espace S de toutes les s.r.l. et l'espace $\mathcal{K}[X]$, ceci en ayant recours à la notion de *bialgèbre*.

Une étude détaillée de la structure usuelle de bialgèbre sur $\mathcal{K}[X]$ et de sa bialgèbre duale est contenue en [51]. Pour un développement général sur la structure de bialgèbre et de coalgèbre, nous renvoyons à [59] et [1]. Pour la commodité du lecteur, nous indiquons ici les notions utilisées dans le présent article.

Nous noterons par V un espace vectoriel sur \mathcal{K} et par $(b^{(i)})$, ou plus simplement (b^i) , une base de cet espace. On considère ici une structure d'algèbre comme un triplet $\mathcal{A} = (V, m, n)$ avec la condition que l'application linéaire

$$m: V \otimes V \rightarrow V$$

$$b^i \otimes b^j \mapsto \sum_h t^{ij}_h b^h$$

[autrement dit, m correspond à la multiplication et on a $b^i b^j = \sum_h t^{ij}_h b^h$] et le plongement

$$u: \mathcal{K} \rightarrow V$$

$$1 \mapsto \sum e_i b^i$$

rendent commutatifs les diagrammes

$$\begin{array}{ccc} V \otimes V \otimes V & \xrightarrow{I \otimes m} & V \otimes V \\ \downarrow m \otimes I & & \downarrow m \\ V \otimes V & \xrightarrow{m} & V \end{array}$$

et

$$\begin{array}{ccccc} \mathcal{K} \otimes V & \xrightarrow{\tilde{u} \otimes I} & V \otimes V & \xrightarrow{I \otimes u} & V \otimes \mathcal{K} \\ & \searrow & \downarrow m & \swarrow & \\ & & V & & \end{array}$$

(Le premier diagramme exprime tout simplement l'associativité de la multiplication; dans le second — qui ne fait que traduire que u est unité — les flèches doubles représentent les isomorphismes canoniques). En termes des constantes de structure, ces conditions s'expriment par les formules

$$\sum_h t^{ij}_h t^{hl}_k = \sum_h t^{jl}_h t^{ih}_k$$

et

$$\sum_i e_i t^{ij}_h = \sum_i e_i t^{ji}_h = \delta^j_h \text{ (le symbole de Kronecker).}$$

La définition d'une coalgèbre $\mathcal{C} = (V, \Delta, \varepsilon)$ s'obtient par dualisation de la précédente; maintenant les deux applications linéaires

$$\Delta: V \rightarrow V \otimes V \quad (\text{diagonalisation ou comultiplication})$$

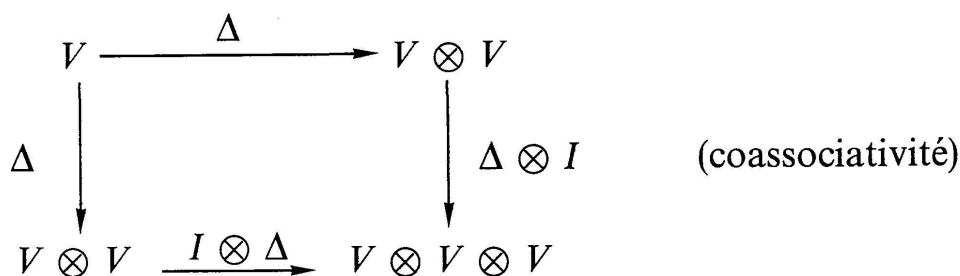
$$b^h \mapsto \sum_{i,j} \tau_{ij}^h b^i \otimes b^j$$

et

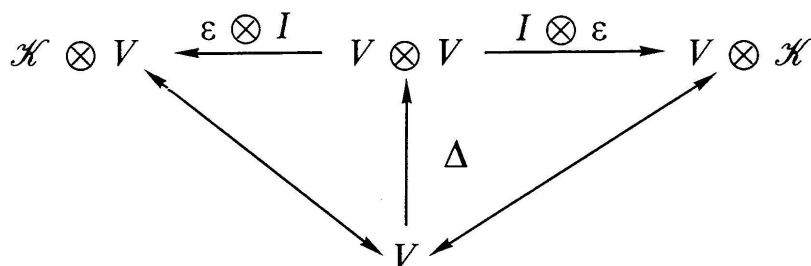
$$\varepsilon: V \rightarrow \mathcal{K} \quad (\text{counité})$$

$$b^h \mapsto \varepsilon^h$$

doivent rendre commutatifs les diagrammes



et



(On renverse les flèches des diagrammes précédents.)

Une application $f: V \rightarrow V$ est un morphisme d'algèbre (resp. de coalgèbre) si elle est linéaire et vérifie $f \circ m = m \circ (f \otimes f)$ et $f \circ u = u$ (respectivement: $\Delta \circ f = (f \otimes f) \circ \Delta$ et $\varepsilon \circ f = \varepsilon$).

A chaque coalgèbre $\mathcal{C} = (V, \Delta, \varepsilon)$ est associée son algèbre duale $\mathcal{C}^* = (V^*, \Delta^*, \varepsilon^*)$, où V^* est le dual linéaire de V et Δ^*, ε^* les applications linéaires respectivement duales de Δ et ε . Sur la (pseudo-)base (b_i) duale de (b^i) , i.e. $b_i(b^j) = \delta_i^j$, les constantes de l'algèbre \mathcal{C}^* coïncident avec celles de \mathcal{C} .

Le passage de l'algèbre $\mathcal{A} = (V, m, n)$ à sa coalgèbre duale $\mathcal{A}^\circ = (V^\circ, m^\circ, u^\circ)$ est défini d'une manière analogue en dimension finie (on a alors $V^\circ = V^*, m^\circ = m^*$ et $u^\circ = u^*$); par contre, si la dimension de V est infinie, alors l'ensemble V° sous-jacent à \mathcal{A}° est un sous-ensemble strict de V^* [car $m^*: V^* \rightarrow (V \otimes V)^*$ mais $V^* \otimes V^* \subsetneq (V \otimes V)^*$]. Il est bien connu

qu'on doit prendre pour V° l'espace des *fonctions linéaires représentatives*, c'est-à-dire des formes linéaires $f: V \rightarrow \mathcal{K}$ telles que $\text{Ker } f$ contienne un idéal J de V de codimension finie.

La structure $\mathcal{B} = (V, m, \Delta, u, \varepsilon)$ est une *bialgèbre* si (V, m, u) est une algèbre, (V, Δ, ε) une coalgèbre et si Δ et ε sont des morphismes d'algèbre (ou, ce qui est équivalent, si m et u sont des morphismes de coalgèbre). Ceci se traduit évidemment en termes de constantes de structures (voir [16], formule (5) à (8)).

Le passage à la bialgèbre duale $\mathcal{B}^\circ = (V^\circ, \Delta^\circ, m^\circ, \varepsilon^\circ, u^\circ)$ ne représente pas de problème puisque $\Delta^*(V^\circ \otimes V^\circ) \subseteq V^\circ$ (Δ° et ε° sont définies respectivement comme les restrictions à V° de Δ^* et ε^*).

En ce qui nous concerne, les deux exemples suivants sont fondamentaux.

1) L'espace vectoriel $\mathcal{K}[X]$ des polynômes possède une structure naturelle de bialgèbre $\mathcal{B} = (\mathcal{K}[X], m, \Delta, u, \varepsilon)$ dont les applications linéaires sont définies par

$$\begin{aligned} m(X^i \otimes X^j) &= X^{i+j}, & \Delta(X) &= X \otimes 1 + 1 \otimes X, \\ u(1) &= 1 & \text{et} & \quad \varepsilon(X^i) = \delta_0^i \quad (\text{le symbole de Kronecker}). \end{aligned}$$

Plus simplement: m est la multiplication usuelle des polynômes, Δ associe à $P(X)$ le polynôme $P(X+Y)$ [ici on identifie $X^i \otimes X^j$ à $X^i Y^j$] et enfin ε associe à $P(X)$ son terme constant $P(0)$.

2) L'espace S de toutes les s.r.l. possède lui aussi une structure naturelle de bialgèbre $\mathcal{S} = (S, \tilde{m}, \tilde{\Delta}, \tilde{u}, \tilde{\varepsilon})$

$$\begin{aligned} \tilde{u}: \mathcal{K} &\rightarrow S, & 1 &\mapsto (\delta_n^0)_{n \geq 0} \\ \tilde{\varepsilon}: S &\rightarrow \mathcal{K}, & (\xi_n)_{n \geq 0} &\mapsto \xi_0 \\ \tilde{m}: S \otimes S &\rightarrow S, & \xi \otimes \eta &\mapsto \xi * \eta \\ && & (\text{c'est le produit défini en A II 5}) \end{aligned}$$

et

$$\tilde{\Delta}: S \rightarrow S \otimes S, \quad \xi \mapsto H(\xi)$$

(dans ce dernier cas on identifie $\mathcal{K}^{\mathbb{N}} \otimes \mathcal{K}^{\mathbb{N}}$ avec l'espace des matrices infinies de type $\omega \times \omega$ et $H(\xi)$ désigne la matrice de Hankel de ξ).

Le lien entre les structures ci-dessus est fourni par le résultat fondamental suivant [51]:

THÉORÈME (Peterson-Taft, 1980). *La bialgèbre \mathcal{S} des s.r.l. est la bialgèbre duale de celle des polynômes.*

IV.

Dans ce paragraphe nous montrons comment la théorie des s.r.l. permet d'obtenir des algorithmes utiles pour la résolution de certains problèmes algébriques et numériques relatifs à $\mathcal{K}[X]$. Le contenu de la fin du paragraphe précédent fournit une justification théorique générale à la méthode utilisée ici.

En général, nous utiliserons sans les rappeler les notations introduites plus haut.

1. *Quelques problèmes d'élimination*

Premier problème. Soient donnés $n + 2$ polynômes $G_i(X_i)$, $i = 0, \dots, n$, et $Z = Z(X_0, \dots, X_n)$; déterminer — rationnellement en fonction des coefficients des G_i et de Z — un polynôme $G(X)$ dont les racines sont toutes les valeurs $Z(\omega_{0, j_0}, \omega_{1, j_1}, \dots, \omega_{n, j_n})$ où les ω_{i, j_i} parcourent les racines de G_i .

Algorithme 1. Il comporte les pas suivants :

- a) construire $n + 1$ s.r.l. $\xi^{(i)}$, où $\xi^{(i)}$ admet G_i comme polynôme minimal;
- b) construire la s.r.l. $\eta = (\eta_m)_{m \geq 0}$ donné par

$$\eta_m = \sum_{m_0, \dots, m_n} Z_{m_0 \dots m_n}^{(m)} \xi_{m_0}^{(0)} \xi_{m_1}^{(1)} \dots \xi_{m_n}^{(n)}$$

où on a posé

$$[Z(X_0, \dots, X_n)]^m = \sum_{m_0 \dots m_n} Z_{m_0 \dots m_n}^{(m)} X_0^{m_0} \dots X_n^{m_n}$$

- c) le polynôme cherché est l'échelle de la suite η et on peut le calculer grâce à la formule (10).

Second problème. Il s'agit d'une généralisation du précédent. Soient $n + 1$ polynômes $G_i(X_i)$, $i = 1, \dots, n$ et $Z(X_0, \dots, X_n)$, déterminer rationnellement un polynôme $H(Y)$ ayant pour racines toutes les valeurs ω_j satisfaisant à une équation du type

$$Z(\omega_j; \omega_{1, j_1}, \dots, \omega_{n, j_n}) = 0$$

les ω_{i, j_i} parcourant encore l'ensemble des racines de G_i .

Algorithme 2.

- a) Posons $G_0(X_0) = X_0 - Y$; on utilise l'algorithme 1 pour déterminer le polynôme $G(X)$ (Y étant considéré momentanément comme une constante);