

BULLETIN DE LA S. M. F.

L. AUTONNE

Sur les polynomes à coefficients et à variable hypercomplexes

Bulletin de la S. M. F., tome 34 (1906), p. 205-212

http://www.numdam.org/item?id=BSMF_1906__34__205_0

© Bulletin de la S. M. F., 1906, tous droits réservés.

L'accès aux archives de la revue « Bulletin de la S. M. F. » (<http://smf.emath.fr/Publications/Bulletin/Presentation.html>) implique l'accord avec les conditions générales d'utilisation (<http://www.numdam.org/conditions>). Toute utilisation commerciale ou impression systématique est constitutive d'une infraction pénale. Toute copie ou impression de ce fichier doit contenir la présente mention de copyright.

NUMDAM

Article numérisé dans le cadre du programme
Numérisation de documents anciens mathématiques

<http://www.numdam.org/>

SUR LES POLYNOMES A COEFFICIENTS ET A VARIABLE
HYPERCOMPLEXES;

Par M. LÉON AUTONNE.

I.

Dans une Communication récente (*Comptes rendus de l'Académie des Sciences*, 28 mai 1906), intitulée : *Sur les propriétés qui, pour les fonctions d'une variable hypercomplexe, correspondent à la monogénéité*, j'ai énoncé diverses propositions relatives aux variables et aux fonctions hypercomplexes. La théorie détaillée, avec les démonstrations, est donnée dans un Mémoire, de même titre que la Communication, qui doit paraître dans le *Journal de Mathématiques*, de M. Jordan.

Je me sers notamment de la terminologie et des notations de M. Frobenius, telles que l'éminent algébriste les donne dans sa *Theorie der hyperkomplexen Grössen* (*Sitzungsberichte de l'Académie de Berlin*, pour avril 1903).

La théorie générale conduit, en ce qui concerne les polynomes à coefficients et à variables hypercomplexes, à diverses propositions, que je développe ci-après.

Rappelons d'abord les théorèmes sur lesquels on s'appuiera. Pour les démonstrations, on renverra aux publications précitées.

II.

1°. Prenons un groupe *simple* (ϵ) d'ordre $n = r^2$. Une quantité hypercomplexe x de (ϵ) est

$$(1) \quad x = \sum_{\alpha} \epsilon_{\alpha} x_{\alpha} \quad \{ \alpha = 1, 2, \dots, n \}$$

où les n coordonnées x_{α} de x sont des nombres scalaires (c'est-à-dire réels ou complexes, ordinaires). Les n symboles ϵ_{α} ont une multiplication (associative, mais non commutative) définie par la formule $\{ \alpha, \beta, \gamma = 1, 2, \dots, n \}$

$$(2) \quad \epsilon_{\beta} \epsilon_{\gamma} = \sum_{\alpha} \epsilon_{\alpha} a_{\alpha\beta\gamma},$$

où les $a_{\alpha\beta\gamma}$ sont n^3 constantes scalaires. Si, pour $x = \Sigma \varepsilon x$, $y = \Sigma \varepsilon y$, $z = \Sigma \varepsilon z$, on a, dans le groupe (ε) , $x = yz$, il viendra, eu égard à (2),

$$\sum_{\alpha} \varepsilon_{\alpha} x_{\alpha} = \left(\sum_{\beta} \varepsilon_{\beta} y_{\beta} \right) \left(\sum_{\gamma} \varepsilon_{\gamma} z_{\gamma} \right) = \sum_{\beta\gamma} \varepsilon_{\beta} \varepsilon_{\gamma} y_{\beta} z_{\gamma} = \sum_{\alpha} \varepsilon_{\alpha} \sum_{\beta\gamma} a_{\alpha\beta\gamma} y_{\beta} z_{\gamma}$$

d'où la formule fondamentale

$$(3) \quad x_{\alpha} = \sum_{\beta\gamma} a_{\alpha\beta\gamma} y_{\beta} z_{\gamma}.$$

2°. Au lieu des x_{α} et ε_{α} on peut introduire des coordonnées $x_{\lambda\mu}$ et des symboles $\varepsilon_{\lambda\mu}$ à double indice ($\lambda, \mu = 1, 2, \dots, r$; $r^2 = n$), tels que les formules (2) deviennent

$$(4) \quad \varepsilon_{\lambda\mu} \varepsilon_{\rho\nu} = 0, \quad \text{pour} \quad \mu \neq \rho, \quad \varepsilon_{\lambda\mu} \varepsilon_{\mu\nu} = \varepsilon_{\lambda\nu}$$

Le groupe (ε) est isomorphe sans hémicétrie aux groupes des matrices r -aires

$$(x) = \begin{pmatrix} x_{11} & \dots & x_{1r} \\ \dots & \dots & \dots \\ x_{r1} & \dots & x_{rr} \end{pmatrix};$$

si $x = yz$, on a $(x) = (y)(z)$, et, réciproquement,

$$(5) \quad x_{\lambda\mu} = \sum_{\rho} y_{\lambda\rho} z_{\rho\mu}, \quad \lambda, \mu, \rho = 1, 2, \dots, r.$$

Les coordonnées à double indice $x_{\lambda\mu}$ seront dites *spéciales*; elles sont d'ailleurs liées aux x_{α} par des relations

$$\sum_{\alpha} b_{\alpha\lambda\mu} x_{\alpha} = x_{\lambda\mu}, \quad b_{\alpha\lambda\mu} = \text{const. scalaire}, \\ \alpha = 1, 2, \dots, n; \quad \lambda, \mu = 1, 2, \dots, r.$$

3°. Avec les n variables scalaires x_{α} formons la *variable hypercomplexe*

$$(6) \quad x = \sum_{\alpha} \varepsilon_{\alpha} x_{\alpha}, \quad \alpha = 1, 2, \dots, n.$$

L'expression

$$(7) \quad X = \sum_{\alpha} \varepsilon_{\alpha} X_{\alpha}(x_1, \dots, x_n).$$

sera dite *fonction* de la variable hypercomplexe x .

Avec M. Frobenius, je désignerai par

$f(x)$, une fonction scalaire des n variables scalaires x_α ,
 $f((x))$, une fonction de la variable hypercomplexe x .

En coordonnées spéciales (2°), il viendra $\{\alpha, \beta, \gamma, \delta = 1, 2, \dots, r$;
 $n = r^2$;

$$(8) \quad x = \sum_{\beta\gamma} \varepsilon_{\beta\gamma} x_{\beta\gamma}, \quad X = \sum_{\alpha\delta} \varepsilon_{\alpha\delta} X_{\alpha\delta}(x).$$

4° . Posons $x_{\beta\gamma} = z_{\gamma\beta}$; prenons les $n^2 = r^4$ dérivées partielles

$$\frac{\partial X_{\alpha\delta}}{\partial z_{\gamma\beta}},$$

rangeons-les suivant les lignes d'indices $\alpha\delta$ et les colonnes d'indices $\gamma\beta$. On aura la matrice jacobienne des X par rapport aux z . Nommons-la H .

Disposons les $\alpha\delta$ et les $\gamma\beta$ suivant la suite

$$11, 12, \dots, 1r; 21, 22, \dots, 2r; r1, r2, \dots, rr.$$

Les r valeurs des α décomposent H en r bandes horizontales, de r lignes chacune. Les r valeurs de γ définissent de même r bandes verticales de r colonnes chacune. H est ainsi décomposée en r^2 matrices partielles $\theta_{\alpha\gamma}$, suivant le schéma

$$H = \begin{pmatrix} \theta_{11} & \theta_{12} & \dots & \theta_{1r} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \theta_{r1} & \theta_{r2} & \dots & \theta_{rr} \end{pmatrix} = \{ \theta_{\alpha\gamma} \};$$

la dérivée partielle $\frac{\partial X_{\alpha\delta}}{\partial z_{\gamma\beta}}$ est, dans la matrice $\theta_{\alpha\gamma}$, l'élément de ligne δ et de colonne β .

5° . J'introduis maintenant la matrice n -aire $W = \{ \theta'_{\alpha\gamma} \}$, laquelle diffère de H par la *transposition* de chaque matrice partielle $\theta_{\alpha\gamma}$, c'est-à-dire par l'échange des deux indices β et δ . Si l'on pose

$$w_{\alpha\beta\gamma\delta} = \frac{\partial X_{\alpha\delta}}{\partial z_{\gamma\beta}},$$

les $n^2 = r^4$ éléments $w_{\alpha\beta\gamma\delta}$ de la matrice W sont disposés suivant les lignes $\alpha\beta$ et les colonnes $\gamma\delta$.

H et W se définissent ainsi réciproquement d'une façon complète.

Quand on ne prend plus de coordonnées spéciales, H et W se définissent encore mutuellement sans ambiguïté. $\omega_{\lambda\mu}$ étant dans W l'élément de ligne λ et de colonne μ , $\{\lambda, \mu = 1, 2, \dots, n\}$, on a $\{\rho, \alpha, \beta = 1, 2, \dots, n\}$.

$$(9) \quad \left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial X_\alpha}{\partial x_\beta} = \sum_{\lambda\mu} \omega_{\lambda\mu} [\alpha\beta]_{\lambda\mu}, \\ [\alpha\beta]_{\lambda\mu} = \sum_{\rho} \alpha_{\alpha\lambda\rho} \alpha_{\rho\beta\mu}, \end{array} \right.$$

les α étant les constantes scalaires des formules (2).

On remarque aussi que

$$(10) \quad \varepsilon_\lambda \varepsilon_\beta \varepsilon_\mu = \sum_{\alpha} \varepsilon_\alpha [\alpha\beta]_{\lambda\mu}.$$

6°. Je n'insisterai pas sur les propriétés, assez remarquables, de la matrice W. On les trouvera dans mes publications précitées. Je passe de suite au problème, objet de la présente Note.

III.

7°. Je désigne (3°) par :

$P_m(x)$, un polynome de degré m , à coefficients scalaires et aux n variables scalaires x_1, \dots, x_n ;

$p_m(x)$, un polynome $P_m(x)$ homogène.

L'expression

$$\mathfrak{M}_m((x)) = a_0 x a_1 x \dots a_{m-1} x a_m,$$

aux $m+1$ coefficients hypercomplexes a_0, \dots, a_m , est dite un monome en x de degré m .

Une somme de monomes, de degrés $m' \leq m$, sera un polynome $\mathfrak{P}_m((x))$. Si tous les monomes ont le même degré m , $\mathfrak{P}_m((x))$ deviendra homogène et s'écrira

$$\mathfrak{P}_m((x))$$

On a évidemment, pour coordonnées de la quantité hyper-complexe $\mathfrak{P}_m((x))$, des expressions $p_m(x)$ ci-dessus. La quantité $\mathfrak{P}_m(x)$ aura pour coordonnées des expressions $P_m(x)$.

8°. Voici maintenant la question que je vais résoudre dans la présente Note :

Réciproquement à ce qui précède, une expression hyper-complexe X, dont les coordonnées sont des P_m(x), est-elle toujours un polynôme Q_m((x))?

On démontrera que la réponse est : *oui, et d'une infinité de façons.*

9°. Soit donc

$$(11) \quad X = \sum_{\alpha} \varepsilon_{\alpha} m X_{\alpha}(x),$$

où les X_α(x) sont des P_m(x) (7°). Comme un polynôme quelconque est toujours une somme de polynômes homogènes, il suffira, pour la démonstration du théorème, de supposer que les X_α(x) sont des p_m(x) (7°). On a à chercher si X peut être effectivement un P_m((x)) (7°).

10° Le théorème d'Euler donne { α, β, λ, μ, ρ, τ = 1, 2, ..., n }, eu égard aux formules (9) et (10),

$$(12) \quad X = \sum_{\alpha\beta} \varepsilon_{\alpha} x_{\beta} \frac{\partial X_{\alpha}}{\partial x_{\beta}} = \sum_{\alpha\beta\lambda\mu} \varepsilon_{\alpha} x_{\beta} w_{\lambda\mu} [\alpha\beta]_{\lambda\mu} = \sum_{\beta\lambda\mu} \varepsilon_{\lambda} \varepsilon_{\beta} \varepsilon_{\mu} x_{\beta} w_{\lambda\mu}.$$

Décomposons la matrice n-aire W ≡ [w_{λμ}] en un produit de deux matrices n-aies, W = UV',

$$(13) \quad U = [u_{\lambda\tau}], \quad V = [v_{\mu\tau}], \quad V' = [v_{\tau\mu}], \quad W = UV' = \left[\sum_{\tau} u_{\lambda\tau} v_{\tau\mu} \right].$$

La formule (12) donne

$$(14) \quad \left\{ \begin{aligned} X &= \sum_{\beta\lambda\mu\tau} \varepsilon_{\lambda} \varepsilon_{\beta} \varepsilon_{\mu} x_{\beta} u_{\lambda\tau} v_{\tau\mu} \\ &= \sum_{\tau} \left(\sum_{\lambda} \varepsilon_{\lambda} u_{\lambda\tau} \right) \left(\sum_{\beta} \varepsilon_{\beta} x_{\beta} \right) \left(\sum_{\mu} \varepsilon_{\mu} v_{\tau\mu} \right) = \sum_{\tau} u_{\tau} x v_{\tau}, \end{aligned} \right.$$

en désignant par u_τ et v_τ les quantités hypercomplexes.

$$(15) \quad u_{\tau} = \sum_{\lambda} \varepsilon_{\lambda} u_{\lambda\tau}, \quad v_{\tau} = \sum_{\mu} \varepsilon_{\lambda} v_{\tau\mu}.$$

11°. Prenons pour V une matrice quelconque, mais à déterminant $|V| \neq 0$ et à éléments $v_{\mu\tau}$ scalaires et constants; alors

$$(16) \quad U = WV^{-1}.$$

Les coefficients $w_{\lambda\mu}$ de W sont des polynomes $p_{m-1}(x)$; la formule (16) montre qu'il en est de même pour les $u_{\lambda\tau}$. Chacune des n quantités hypercomplexes u_τ est donc de même nature que X , mais le degré m a diminué d'une unité. On pourra donc écrire

$$u_\tau = \sum_{\tau_1} u_{\tau_1} x^{\nu_{\tau_1}} \quad \{ \tau_1 = 1, 2, \dots, n \}.$$

On donnera encore aux coordonnées de ν_{τ_1} des valeurs constantes; les coordonnées de u_{τ_1} seront alors des polynomes homogènes $p_{m-2}(x)$ et ainsi de suite.

Tout compte fait, on pourra écrire finalement

$$(17) \quad \left\{ \begin{array}{l} X = \sum_{\tau_1 \dots \tau_m} a_{\tau_1 \tau_2 \dots \tau_m} \prod_i (x^{\nu_{\tau_i}}) \\ i = 1, 2, \dots, m; \quad \tau_i = 1, 2, \dots, n \end{array} \right\},$$

où les n quantités hypercomplexes ν_{τ_i} ont pour coordonnées n^2 constantes scalaires arbitraires, à déterminant $\neq 0$.

$$a_{\tau_1 \dots \tau_m} = \text{const. hypercomplexe.}$$

12°. La formule (17) montre que X est la somme de n^m monomes

$$a_m((x)) \quad (7^\circ)$$

c'est-à-dire que X est un polynome

$$P_m((x)),$$

où les quantités ν_{τ_i} peuvent être choisies d'une infinité de façons. C'est ce qui est annoncé au 8°.

13°. La formule (17) peut être simplifiée. Nommons E la matrice n -aire unité. On peut faire, au calcul du 11°,

$$V = V' = E, \quad v_{\mu\tau} = 0, \quad v_{\tau\tau} = 1;$$

d'où

$$v_\tau = \varepsilon_\tau, \quad X = \sum_{\tau} u_\tau x^{\varepsilon_\tau}$$

et ainsi de suite.

Alors (17) devient

$$(18) \quad \left\{ \begin{array}{l} X = \mathfrak{P}_m(x) = \sum_{\tau_1 \dots \tau_m} a_{\tau_1 \dots \tau_m} x^{\varepsilon_{\tau_1}} x^{\varepsilon_{\tau_2}} \dots x^{\varepsilon_{\tau_i}} \dots x^{\varepsilon_{\tau_m}} \\ \left. \vphantom{\sum} \right\} \tau_1, \dots, \tau_i, \dots, \tau_m = 1, 2, \dots, n \left. \vphantom{\sum} \right\}. \end{array} \right.$$

14°. Les coordonnées de l'hypercomplexe X sont des polynomes $p_m(x)$ à coefficients scalaires b et à variables scalaires x_1, \dots, x_n . Il est facile d'établir des relations mutuelles entre les constantes scalaires b et les constantes hypercomplexes a des formules (17) et (18). Le calcul est plus court quand on emploie les coordonnées spéciales (2°) $x_{\xi\eta}$, $\{\xi, \eta = 1, 2, \dots, r; n = r^2\}$ et les symboles à double indice $\varepsilon_{\xi\eta} = \begin{pmatrix} \xi \\ \eta \end{pmatrix}$, de façon que

$$x = \sum_{\xi\eta} \begin{pmatrix} \xi \\ \eta \end{pmatrix} x_{\xi\eta} \text{ [et analogue de la formule (4)];}$$

$$\begin{pmatrix} \lambda \\ \mu \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \rho \\ \nu \end{pmatrix} = 0, \quad \begin{pmatrix} \lambda \\ \mu \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \mu \\ \nu \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \lambda \\ \nu \end{pmatrix}.$$

15°. Dans la formule (18) faisons

$$\varepsilon_{\tau_i} = \varepsilon_{\lambda_i} \mu_i = \begin{pmatrix} \lambda_i \\ \mu_i \end{pmatrix}; \quad x = \sum_{\xi_i \eta_i} x_{\xi_i \eta_i} \begin{pmatrix} \xi_i \\ \eta_i \end{pmatrix} = \dots = \sum_{\xi_i \eta_i} x_{\xi_i \eta_i} \eta_i \begin{pmatrix} \xi_i \\ \eta_i \end{pmatrix} = \dots$$

Désignons le coefficient $a_{\tau_1 \dots \tau_m}$ par

$$a \begin{pmatrix} \lambda_1 \dots \lambda_i \dots \lambda_m \\ \mu_1 \dots \mu_i \dots \mu_m \end{pmatrix};$$

mettons en évidence les coordonnées scalaires de l'hypercomplexe a, en écrivant

$$(19) \quad \left\{ \begin{array}{l} a \begin{pmatrix} \lambda_1 \dots \lambda_m \\ \mu_1 \dots \mu_m \end{pmatrix} = \sum_{\alpha\beta} \begin{pmatrix} \alpha \\ \beta \end{pmatrix} a \begin{pmatrix} \lambda_1 \dots \lambda_m \\ \mu_1 \dots \mu_m \mid \beta \end{pmatrix}, \\ \left. \vphantom{\sum} \right\} \alpha, \beta, \lambda_i, \mu_i, \xi_i, \eta_i = 1, 2, \dots, r; \quad n = r^2 \left. \vphantom{\sum} \right\}. \end{array} \right.$$

La formule (18) devient

$$(20) \quad \left\{ \begin{array}{l} \mathfrak{P}_m(x) = \sum x_{\xi_i \eta_i} \dots x_{\xi_m \eta_m} a \begin{pmatrix} \lambda_1 \dots \lambda_m \\ \mu_1 \dots \mu_m \mid \beta \end{pmatrix} \text{ (k)} \\ \left. \vphantom{\sum} \right\} \omega = \begin{pmatrix} \alpha \\ \beta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \xi_1 \\ \eta_1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \lambda_1 \\ \mu_1 \end{pmatrix} \dots \begin{pmatrix} \xi_i \\ \eta_i \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \lambda_i \\ \mu_i \end{pmatrix} \dots \begin{pmatrix} \xi_m \\ \eta_m \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \lambda_m \\ \mu_m \end{pmatrix}. \end{array} \right.$$

Pour que $\Omega \neq 0$, il faut que

$$\begin{aligned} \beta &= \xi_1, & \eta_1 &= \lambda_1, & \dots, & \eta_i &= \lambda_i, & \dots, & \eta_m &= \lambda_m, \\ & & \mu_1 &= \xi_2, & \dots, & \mu_{m-1} &= \xi_m, & & & \end{aligned}$$

c'est-à-dire

$$\beta = \xi_1, \quad \mu_1 = \xi_2, \quad \dots, \quad \mu_{m-1} = \xi_m, \quad \eta_i = \lambda_i.$$

Ω se réduit à $\binom{\alpha}{\eta_m}$. La formule (20) devient

$$(21) \quad \mathfrak{P}_m((x)) = \sum \binom{\alpha}{\eta_m} x_{\xi_1 \eta_1} \dots x_{\xi_m \eta_m} a \left(\begin{array}{c} \eta_1 \dots \eta_{m-1} \eta_m \\ \xi_2 \dots \xi_m \quad \mu_m \end{array} \middle| \begin{array}{c} \alpha \\ \xi_1 \end{array} \right).$$

Comme on a d'autre part

$$X = \mathfrak{P}_m((x)) = \sum_{\alpha \eta_m} \binom{\alpha}{\eta_m} X_{\alpha \eta_m}(x; b),$$

voici ce que donne l'identification des deux expressions, de $\mathfrak{P}_m((x))$:
le coefficient b , dans $X_{\alpha \eta_m}$, du produit

$$\Xi = x_{\xi_1 \eta_1} \dots x_{\xi_m \eta_m}$$

est la somme des constantes scalaires

$$a \left(\begin{array}{c} \eta_1 \dots \eta_{m-1} \eta_m \\ \xi_2 \dots \xi_m \quad \mu_m \end{array} \middle| \begin{array}{c} \alpha \\ \xi_1 \end{array} \right),$$

étendues à toutes les combinaisons des indices ξ et η qui donnent le même produit Ξ .

Il est évident qu'on peut annuler identiquement le polynome $\mathfrak{P}_m((x))$ sans avoir besoin d'égaliser à zéro chacun des coefficients hypercomplexes a .

16°. Toutes les présentes recherches se résument dans une proposition finale unique :

THÉORÈME. — *Pour qu'une quantité X hypercomplexe soit, par rapport à la variable hypercomplexe x , un polynome de degré m , à coefficients hypercomplexes,*

il faut et il suffit que :

les coordonnées de X soient, par rapport aux coordonnées de x , des polynomes de degré m , à coefficients scalaires.