Zeitschrift: L'Enseignement Mathématique

Herausgeber: Commission Internationale de l'Enseignement Mathématique

**Band:** 2 (1956)

Heft: 1-2: L'ENSEIGNEMENT MATHÉMATIQUE

Artikel: ALGÈBRE DES POLYNOMES

Autor: Zamansky, Marc

**DOI:** https://doi.org/10.5169/seals-32901

#### Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

#### **Conditions d'utilisation**

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

#### Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

**Download PDF:** 09.12.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

# ALGÈBRE DES POLYNOMES

PAR

Marc ZAMANSKY, Paris

### Introduction

L'objet de cet article est de présenter les propriétés algébriques fondamentales des êtres qu'on appelle polynômes à une indéterminée ou improprement, polynômes à une variable.

On n'y trouvera que des résultats élémentaires bien connus (sauf peut-être celui qui concerne le lien entre les deux divisions) mais tout ce qui pourrait rappeler l'analyse a été banni de la présentation car la confusion de notations entraîne souvent chez les jeunes étudiants la confusion des concepts et des propriétés.

# Premières définitions. Notations.

# Définition d'un polynôme

On appelle polynôme un ensemble ordonné d'une infinité dénombrable de nombres (réels ou complexes) tous nuls à partir d'un certain rang.

Nous représenterons au début un polynôme par  $(a_0, a_1, a_2, ..., a_n, 0, 0, ...)$ . Les nombres  $a_k$  sont appelés coefficients et dans cette écriture l'entier k repère le rang d'ordre du coefficient  $(a_k$  est le  $(k+1)^{\frac{e}{-}}$  coefficient).

Nous désignons aussi un polynôme par une seule lettre et écrirons:

$$A = (a_0, a_1, ..., a_n, 0, 0, ...)$$
.

## Egalité de deux polynômes

Deux polynômes  $A=(a_0,\,a_1,\,...,\,a_n,\,0,\,0,\,...)$  et  $B=(b_0,\,b_1,\,...,\,b_m,\,0,\,...)$  seront dits égaux si quel que soit  $k:a_k=b_k,$   $(k\geqslant 0)$ . Cette définition entraı̂ne qu'à partir du même rang  $a_k$  et  $b_k$  sont nuls.

On écrira A = B, le symbole = pouvant alors être employé de nouveau.

Lois algébriques sur l'ensemble des polynomes

### Lois internes

Les conventions suivantes construisent des polynômes à partir de polynômes; elles définissent ce qu'on appelle des lois internes. Ce seront l'addition et la multiplication. Leur définition entraîne des propriétés qui feront de l'ensemble des polynômes muni de ces deux lois, un anneau commutatif unitaire.

## 1º Addition.

Soit  $A = (a_0, a_1, ...)$ ,  $B = (b_0, b_1, ...)$ , deux polynômes. Par définition le polynôme  $(a_0 + b_0, a_1 + b_1, ..., a_k + b_k, ...)$  est appelé somme de A et B et on écrit:

$$A + B = (a_0 + b_0, a_1 + b_1, ..., a_k + b_k, ...)$$
.

Les propriétés des nombres complexes montrent que cette addition est associative, c'est-à-dire que (A + B) + C = A + (B + C) et commutative, c'est-à-dire que A + B = B + A, quels que soient A, B, C.

Désignons par  $\Theta$  le polynôme dont tous les coefficients sont nuls:  $a_k = 0$  pour k = 0, 1, 2, ... On a alors quel que soit le polynôme A:

$$A + \Theta = \Theta + A = A$$

 $\Theta$  est donc l'élément neutre pour l'addition.

Désignons par (— A) le polynôme (—  $a_0$ , —  $a_1$ , …, —  $a_k$ , …). On a alors: A + (— A) =  $\Theta$ . Donc tout polynôme A a un symétrique (— A) pour l'addition.

Ces propriétés de l'addition signifient que l'ensemble des polynômes muni de l'addition est un groupe commutatif ou groupe abélien.

# 2º Multiplication.

Soit A =  $(a_0, a_1, ...)$ , B =  $(b_0, b_1, ...)$  deux polynômes. Par définition le polynôme  $(a_0 b_0, a_0 b_1 + a_1 b_0, ..., a_0 b_k + a_1 b_{k-1} + a_2 b_{k-2} + ... + a_k b_0, ...)$  est appelé produit de A par B et on écrit:

$$AB = (a_0 b_0, a_0 b_1 + a_1 b_0, ...) .$$

Cette multiplication est évidemment associative et commutative, c'est-à-dire que quels que soient A, B, C: (AB) C = A (BC) et AB = BA.

Désignons par I le polynôme dont tous les coefficients sont nuls sauf le premier  $a_0$  qui vaut 1:I = (1, 0, 0, ...). On a quel que soit A:

$$IA = AI$$
.

I est donc l'élément neutre pour la multiplication.

En général A n'a pas de symétrique pour la multiplication. Car s'il existe B, tel que AB = I, on doit avoir  $a_0$   $b_0$  = 1 ce qui exige  $a_0 \neq 0$ ,  $b_0 \neq 0$ .

# 3º Propriété de la multiplication par rapport à l'addition.

De la distributivité de la multiplication par rapport à l'addition dans le corps des nombres complexes résulte que quels que soient les polynômes A, B, C:

$$A (B + C) = (B + C) A = AB + AC$$
.

La multiplication des polynômes est donc distributive (doublement) par rapport à l'addition.

## 4º L'anneau des polynômes.

Les propriétés de l'addition jointes à l'associativité et la distributivité (par rapport à l'addition) de la multiplication font de l'ensemble des polynômes un *anneau*.

Si on y ajoute la commutativité de la multiplication, cet ensemble prend le nom d'anneau commutatif.

Si on y ajoute encore l'existence de l'élément neutre I, cet ensemble prend le nom d'anneau commutatif unitaire.

### II. Loi externe

On peut définir une opération qui construira un polynôme à partir de deux êtres qui seront l'un un polynôme, l'autre un nombre du corps des complexes. A tout polynôme A et tout nombre  $\alpha$ , on fait correspondre le polynôme ( $\alpha a_0$ ,  $\alpha a_1$ , ...,  $\alpha a_k$ , ...) qu'on désigne par  $\alpha$  A et qu'on appelle produit de A par  $\alpha$ .

Les propriétés suivantes, vraies quels que soient les polynômes A, B, C et les nombres  $\alpha$ ,  $\beta$ , ... découlent immédiatement des définitions et propriétés qui précèdent:

- 1)  $\alpha (A + B) = \alpha A + \alpha B$
- 2)  $\alpha (\beta A) = (\alpha \beta) A$
- 3)  $1 \cdot A = A$
- 4)  $(\alpha + \beta) A = \alpha A + \beta A$
- 5)  $\alpha (AB) = (\alpha A) B = A (\alpha B)$ .

De ces propriétés, résulte que quel que soit A,  $OA = \Theta$ . Désormais nous remplaçons  $\Theta$  par O. D'autre part comme 1.A = A et I.A = A, nous remplacerons I par 1 et de façon générale, le polynôme  $(a_0, 0, 0, ...)$  pouvant être considéré comme le produit de (1, 0, 0, ...) par  $a_0$  nous identifions le polynôme  $(a_0, 0, 0, ...)$  où  $a_k = 0$  si  $k \ge 1$  et le nombre  $a_0$ . Un tel polynôme s'appelle parfois une constante.

Enfin (— A), symétrique de A pour l'addition, est aussi le polynôme (— 1) A obtenu en multipliant A par (— 1). Nous ne les distinguerons donc pas.

# III. Espace vectoriel

Si on considère l'ensemble des polynômes muni de l'addition et de la précédente loi externe, les propriétés de l'addition et les quatre premières propriétés de la loi externe font de cet ensemble un espace vectoriel sur le corps des nombres complexes. Mais comme on le verra ci-dessous cet espace n'est pas de dimension finie.

### BASE DE L'ESPACE VECTORIEL DES POLYNOMES

Les propriétés de l'espace vectoriel des polynômes permettent d'écrire tout polynôme A sous la forme:

$$A = a_0 (1, 0, 0, ...) + a_1 (0, 1, 0, ...) + ... + a_n (0, 0, ..., 1, 0, ...)$$

c'est-à-dire, en désignant par  $e_k$  le polynôme dont tous les coefficients sont nuls sauf celui de rang k+1 qui vaut 1,

$$A = a_0 e_0 + a_1 e_1 + \dots + a_n e_n.$$

L'ensemble des polynômes  $e_k$  s'appelle base et l'écriture précédente réalise ce qu'on appelle la décomposition de A sur la base.  $a_p$   $e_p$  s'appelle terme de degré p.

La définition de l'égalité de deux polynômes entraîne que cette décomposition est unique.

Appliquons la définition du produit de deux polynômes à deux polynômes  $e_p$ ,  $e_q$ . On a  $e_p = (\alpha_0, \alpha_1, ..., \alpha_p, \alpha_{p+1}, ...)$  où  $\alpha_k = 0$  si  $k \neq p$  et  $\alpha_p = 1$ ;  $e_q = (\beta_0, \beta_1, ..., \beta_q, \beta_{q+1}, ...)$  où  $\beta_k = 0$  si  $k \neq q$  et  $\beta_q = 1$ .

Le  $(k+1)^{\frac{e}{-}}$  coefficient de  $e_p$   $e_q$  est  $\alpha_k$   $\beta_0$  +  $\alpha_{k-1}$   $\beta_1$  + ... +  $\alpha_0$   $\beta_k$ . Ce coefficient ne peut être différent de zéro que s'il contient  $\alpha_p$   $\beta_p$ . Or le  $(k+1)^{\frac{e}{-}}$  coefficient de  $e_p$   $e_q$  est une somme de termes tels que la somme des indices de chaque terme  $\alpha_{k-m}$   $\beta_m$  est k; on ne trouvera donc  $\alpha_p$   $\beta_p$  que dans le  $(p+q+1)^{\frac{e}{-}}$  coefficient de  $e_p$   $e_q$  n'est pas nul. Ce dernier coefficient est par définition:

$$\alpha_{p+q} \, \beta_0 \, + \, \alpha_{p+q-1} \, \beta_1 \, + \, \dots \, + \, \alpha_p \, \beta_q \, + \, \dots \, + \, \alpha_0 \, \beta_{p+q} = \, \alpha_p \, \beta_q = \, 1 \, \, .$$

Donc:

$${}^{e_p}{}^{e_q} = {}^{e_q}{}^{e_p} = {}^{e_{p+q}} \cdot$$

Les propriétés suivantes:

$$\alpha (A + B) = \alpha A + \alpha B$$

$$(\alpha + \beta) A = \alpha A + \beta A$$

$$\alpha (\beta A) = \alpha \beta A$$

$$A (B + C) = AB + AC$$

$$e_p e_q = e_{p+q}.$$

permettent alors de calculer plus aisément que ne l'indiquaient les définitions, la somme et le produit de polynômes.

Ainsi:

$$= a_0 b_0 e_0 + (a_0 b_1 + a_1 b_0) e_1 + (a_1 b_1 + a_2 b_0) e_2 .$$
 AB =  $(a_0 e_0 + a_1 e_1 + a_2 e_2) (b_0 e_0 + b_1 e_1)$ 

On retrouve les règles de calcul élémentaires.

Enfin la règle de calcul  $e_p \, e_q = e_{p+q}$  pour le produit de deux polynômes de la base permet de montrer facilement que si A et B sont deux polynômes tels que AB = 0, l'un au moins des polynômes est nul. Supposons en effet que ni A, ni B ne sont nuls; alors soit parmi les termes  $a_k \, e_k$  de A celui d'indice le plus élevé  $a_p \, e_p$  tel que  $a_p \neq 0$  et de même  $b_q \, e_q$  dans B. Dans AB figure  $a_p \, b_q \, e_{p+q}$  et comme  $a_p \neq 0$ ,  $b_q \neq 0$ ,  $AB \neq 0$ .

Ainsi AB = 0 entraı̂ne A = 0 ou B = 0. Il en résulte que si  $A \neq 0$  et si AB = 0, alors B = 0. Il en résulte encore que si  $A \neq 0$  et si AB = AC, on a A(B - C) = 0, donc B - C = 0, donc B = C. En d'autres termes cela signifie que tout polynôme différent de 0 est régulier pour la multiplication.

# DEGRÉ, VALUATION D'UN POLYNOME

Définition. — Soit  $A=(a_0,a_1,...,a_n,0,...)$  un polynôme. Nous appellerons  $degré\ de\ A$  et nous le désignerons par degA, le plus grand entier  $n\geqslant 0$  tel que  $a_n\neq 0$ :

$$n = \deg A$$

Cela signifie que si  $k \le n$ , il y a au moins un  $a_k \ne 0$  et que  $a_k = 0$  quel que soit k > n.

deg A = 0 signifie que A est une constante, mais ne signifie pas nécessairement que A = 0.

Le degré de 0 n'est pas défini.

Le degré et les deux lois algébriques.

D'après la définition du degré, on a les propriétés suivantes:

1º Si deg A > deg B, alors deg (A + B) = deg A  
Si deg A = deg B = 
$$n$$
 et si  $a_n + b_n \neq 0$ , alors deg (A + B) = deg A = deg B.

Dans le cas général:

 $deg (A + B) \leq max (deg A, deg B)$ , c'est-à-dire est inférieur ou égal au plus grand des entiers deg A, deg B.

2º Si AB  $\neq$  0, deg AB = deg A + deg B.

Définition. — Soit  $A = (a_0, ..., a_n, 0, ...)$  un polynôme. Nous appellerons valuation de A et nous la désignerons par v (A), le plus petit entier  $m \ge 0$  tel que  $a_m \ne 0$ .

Cela entraîne que si  $m \ge 1$  on a  $a_k = 0$  pour  $0 \le k \le m-1$ . La valuation de 0 n'est pas définie.

On remarquera que quel que soit A:  $\rho$  (A)  $\leq$  deg A.

La valuation et les deux lois algébriques.

D'après la définition, on a les propriétés suivantes:

1º Si 
$$\varphi$$
 (A)  $> \varphi$  (B), alors  $\varphi$  (A + B) =  $\varphi$  (B).  
Si  $\varphi$  (A) =  $\varphi$  (B) =  $m$  et si  $a_m + b_m \neq 0$ ,  
alors  $\varphi$  (A + B) =  $\varphi$  (A) =  $\varphi$  (B).

Dans le cas général:  $\nu$  (A + B)  $\geqslant$  min ( $\nu$  (A),  $\nu$  (B)), c'està-dire supérieure ou égale au plus petit des entiers  $\nu$  (A),  $\nu$  (B). 2º Si AB  $\neq$  0, alors  $\nu$  (AB) =  $\nu$  (A) +  $\nu$  (B).

Remarque. — Une condition nécessaire (seulement) pour que A = B est que deg A = deg B et v(A) = v(B). La négation de cette proposition signifie que si l'une des conditions deg A = deg B ou v(A) = v(B) n'est pas réalisée, alors  $A \neq B$ .

## LE PROBLÈME DE LA DIVISION DES POLYNOMES

L'ensemble  $\mathfrak{T}$  des polynômes est un anneau commutatif unitaire, mais n'est pas un corps, c'est-à-dire que la division n'est pas en général possible, c'est-à-dire encore, que deux polynômes A et B étant donnés il n'existe pas en général de polynômes X tel que A = BX.

Définition. — On dit que A est divisible par  $B \neq 0$ , s'il existe Q tel que A = BQ. On dit aussi que A est multiple de B ou que B divise A ou est diviseur de A. Alors A est aussi multiple de Q.

Si Q existe, il est unique car s'il existait encore Q' tel que A = BQ' on aurait BQ = BQ' et comme  $B \neq 0$ , Q = Q'.

On peut alors présenter cette définition de la façon suivante: Soit A et  $B \neq 0$  deux polynômes; considérons tous les polynômes A - BX où X parcourt  $\mathfrak T$  (c'est-à-dire où X est un polynôme quelconque); dire que A est divisible par B c'est dire qu'il existe  $Q \in \mathfrak T$  tel que A - BQ = 0; Q est alors unique.

Lorsque A n'est pas divisible par B, il est alors naturel d'étudier les polynômes A — BX où X parcourt  $\mathfrak{T}$  et de tenter de trouver X de façon que A — BX possède quelque propriété vraie lorsque A = BQ. Or si A = BQ, nécessairement deg A = deg BQ et  $\nu$  (A) =  $\nu$  (BQ); si A  $\neq$  0 (A = 0 n'offre pas d'intérêt) on doit avoir deg A = deg B + deg Q et  $\nu$  (A) =  $\nu$  (B) +  $\nu$ (Q).

On peut être tenté de chercher pour deux polynômes A et B, un polynôme X tel que simultanément deg  $A = \deg B + \deg X$  et  $\rho(A) = \rho(B) + \rho(X)$ . Il est facile de voir par un exemple que c'est en général impossible.

On peut alors chercher à sauvegarder l'une des deux propriétés précédentes pour tout couple A, B; en d'autres termes la propriété cherchée doit être vraie quels que soient les polynômes A et B. Mais si alors on cherche X en lui imposant la seule condition deg A = deg B + deg X, on peut satisfaire à cette condition d'une infinité de manières; nous sommes donc amenés à chercher parmi tous les X possibles, ceux qui possèdent une autre propriété. Cette discussion motive le point de vue qui suit.

Considérons une famille quelconque de polynômes non nuls. Comme les degrés sont des entiers  $\geqslant 0$ , il existe dans cette famille, au moins un polynôme dont le degré est inférieur ou égal à tous les degrés des polynômes de cette famille. Considérons alors la famille de tous les polynômes A - BX où  $X \in \mathcal{R}$ . Si à cette famille on applique la remarque qui vient d'être faite on en conclut qu'il existe au moins un polynôme Q tel que deg  $(A - BQ) \leqslant \deg(A - PX)$  quel que soit  $X \in \mathcal{R}$ . Nous verrons alors que nécessairement deg  $(A - BQ) < \deg B$  et que pour tout couple A, B, le polynôme Q tel que deg  $(A - BQ) < \deg B$  est unique. Ce sera la division euclidienne de A par B ou division suivant les puissances décroissantes.

L'idée de la division suivant les puissances croissantes sera

déduite de la précédente division, puis nous montrerons que les deux divisions peuvent être ramenées l'une à l'autre.

## LA DIVISION EUCLIDIENNE

Soit A et B deux polynômes. Soit  $B \neq 0$ . Si A = 0, on a A = BO donc A est divisible par B. Supposons  $A \neq 0$  et parmi tous les polynômes A - BX soit A - BQ tel que deg  $(A - BQ) \leq \deg(A - BX)$  quel que soit X, lorsque A n'est pas divisible par B.

Montrons que 1º: deg (A — BQ) < deg B; 2º Q est unique. 1º Soit en effet:

$$\begin{split} \mathbf{B} \, = \, b_0 \, e_0 \, + \, \dots \, + \, b_p \, e_p \, (b_p \, \neq \, 0) \\ \mathbf{A} \, - \, \mathbf{B} \mathbf{Q} \, = \, c_0 \, e_0 \, + \, \dots \, + \, c_p \, e_p \, + \, \dots \, + \, c_m \, e_m \end{split}$$

et supposons m > p et  $c_m \neq 0$ , m étant le plus petit degré possible de tous les polynômes  $A \longrightarrow BX$ .

On a alors:

$$\begin{split} e_{m-p}\,\mathbf{B} \,=\, b_0\,e_{m-p} \,+\, \dots \,+\, b_p\,e_m \\ \frac{c_m}{b_p}\,e_{m-p}\,\mathbf{B} \,=\, \frac{b_0\,c_m}{b_p}\,e_{m-p} \,+\, \dots \,+\, \frac{c_m}{b_p}\,b_{p-1}\,e_{m-1} \,+\, c_m\,e_m \;. \end{split}$$

D'où

$$\begin{split} \mathbf{A} - \mathbf{B} \mathbf{Q} - \frac{c_m}{b_p} e_{m-p} \, \mathbf{B} &= \mathbf{A} - \mathbf{B} \left( \mathbf{Q} \, + \frac{c_m}{b_p} e_{m-p} \right) = \\ &= c_0 \, e_0 \, + \, \dots \, + \, \left( c_{m-1} - \frac{c_m}{b_p} \, b_{p-1} \right) e_{m-1} \; . \end{split}$$

Q' désignant le polynôme Q  $+\frac{c_m}{b_p}e_{m-p}$ , A — BQ' serait de degré < m ce qui est en contradiction avec l'hypothèse faite sur m. L'hypothèse  $m \gg p$  est donc incompatible avec "m est le plus petit degré possible de tous les A — BX". On a donc m < p, c'est-à-dire deg (A — BQ) < deg B.

2º Si existait  $Q' \neq Q$  tel que deg  $(A - BQ') \leq deg$  (A - BX) quel que soit X, on aurait deg (A - BQ') < deg B d'après ce qui précède. Donc

$$\mathrm{deg}\;(\mathrm{A}-\mathrm{BQ}-(\mathrm{A}-\mathrm{BQ'}))\,=\,\mathrm{deg}\;\mathrm{B}\;(\mathrm{Q'}-\mathrm{Q})\,<\,\mathrm{deg}\;\mathrm{B}\;.$$

Or si on suppose  $Q' \neq Q$ , on a deg  $(Q' - Q) \geqslant 0$ , donc deg  $B(Q' - Q) \geqslant \deg B$  ce qui contredit deg  $B(Q' - Q) < \deg B$ . Nécessairement Q' = Q.

D'où:

Théorème. — Etant donnés deux polynômes A et B, B  $\neq$  0 il existe un polynôme Q et un seul tel que A — BQ = 0 ou bien tel que deg (A — BQ)  $\leq$  deg (A — BX) quel que soit le polynôme X; de plus dans le second cas deg (A — BQ)  $\leq$  deg B.

Ce résultat peut alors être écrit:

$$A = BQ + R$$
,  $deg R < deg B$ 

où le couple Q, R est unique. Q est le quotient, R le reste.

On notera que la première partie de la démonstration fournit la méthode pratique bien connue.

## LA DIVISION SUIVANT LES PUISSANCES CROISSANTES

Soit  $A = a_0 e_0 + ... + a_n e_n$  un polynôme non nul, de degré n  $(a_n \neq 0)$ . Appelons polynôme transposé de A le polynôme  $\overline{A} = a_n e_0 + a_{n-1} e_1 + ... + a_0 e_n$ . Quel que soit  $A \neq 0$ , v  $(\overline{A}) = 0$  et deg  $\overline{A} = \deg A - v$  (A); on a donc deg  $\overline{A} \leq \deg A$ .

Cherchons les propriétés de l'opération qui à A associe  $\overline{A}$  relativement au produit de A par une croissante  $\alpha$ , à la somme A + B, au produit AB.

1º Si  $\alpha \neq 0$ , on a  $\overline{(\alpha A)} = \alpha \overline{A}$ .

2º Soit  $A = a_0 e_0 + ... + a_n e_n (a_n \neq 0)$  et  $B = b_0 e_0 + ... + b_p e_p (b_p \neq 0)$  et supposons par exemple  $\deg A = n \geqslant \deg B = p$ . Remarquons que quel que soit h,  $\overline{(e_h A)} = \overline{A} e_0$ 

a) Si deg A =  $n > p = \deg B$ , on a:

$$\overline{(\mathbf{A}\,+\,\mathbf{B})}\,=\,\overline{\mathbf{A}}\,+\,e_{n-p}\,\overline{\mathbf{B}}$$

b) Si deg A =  $n = p = \deg B$  et si deg (A + B) = deg A (c'est-à-dire si  $a_n + b_n \neq 0$ ), on a:

$$\overline{A + B} = \overline{A} + \overline{B}$$

c) Si deg A = deg B et si deg (A + B) < deg A (c'est-à-dire si  $a_n + b_n \neq 0$ ), soit alors  $m = \deg (A + B) < n$ .

On a:

$$\overline{\mathbf{A} + \mathbf{B}} = (a_m + b_m) e_0 + \dots + (a_0 + b_0) e_m$$

$$\overline{\mathbf{A}} + \overline{\mathbf{B}} = (a_m + b_m) e_{n-m} + \dots + (a_0 + b_0) e_n = e_{n-m} \overline{(\mathbf{A} + \mathbf{B})}.$$

Donc 
$$\overline{A} + \overline{B} = e_{n-m} (\overline{A + B}).$$

3º Soit  $a_n \neq 0$ ,  $b_p \neq 0$ .

$$AB = A b_p e_p + A b_{p-1} e_{p-1} + ... + A b_0 e_0.$$

En appliquant le résultat du 2º a) précédent on a:

$$\begin{split} \overline{\rm AB} &= \overline{\rm A} \ b_0 \, e_0 \, + \, e_{n+p-(n+p-1)} \, \overline{({\rm A} \ b_{p-1} \, e_{p-1} \, + \, \ldots)} \, = \\ &= \, \overline{\rm A} \ b_p \, e_0 \, + \, e_1 \, \overline{\rm A} \ b_{p-1} \, + \, \ldots \, . \end{split}$$

D'où  $\overline{AB} = \overline{A} \overline{B}$ .

Ces règles étant établies, soient A et B non nuls et supposons deg  $A \gg deg$  B. Soient Q et R les quotient et reste de la division euclidienne de A par B:

$$A = BQ + R \ , \qquad deg \ R < deg \ B \ .$$

Soit  $n = \deg A$ ,  $p = \deg B$ ,  $r = \deg R < p$ On a alors:

$$\overline{\mathbf{A}} = \overline{\mathbf{B}} \, \overline{\mathbf{Q}} \, + \, e_{n-r} \, \overline{\mathbf{R}} = \overline{\mathbf{B}} \, \overline{\mathbf{Q}} \, + \, e_{\text{deg A-deg (A-BQ)}} \, \overline{\mathbf{R}} \ .$$

Comme deg Q = n - p, deg  $\overline{Q} < n - p$  et comme r < p, n - p < v  $(e_{n-r} \overline{R}) = v$   $(\overline{A} - \overline{B} \overline{Q})$ .

Ainsi aux polynômes  $\overline{A}$ ,  $\overline{B}$ , transposés de A et B est associé un polynôme  $\overline{Q}$  tel que deg  $\overline{Q} < \rho$  ( $\overline{A} - \overline{B} \overline{Q}$ ). [On notera que  $\rho$  ( $\overline{A}$ ) =  $\rho$  ( $\overline{B}$ ) = 0].

Donc dans certains cas (jusqu'à présent), à deux polynômes A, B on peut associer un polynôme Q tel que deg Q < v (A — BQ). C'est l'origine du théorème suivant:

Théorème. — Etant donnés deux polynômes A, B tels que v(B) = 0 et un entier  $k \ge 0$ , il existe un polynôme Q et un seul tel que

$$\deg Q \leqslant k < \rho \ (A - DQ)$$

à moins que A - BQ = 0.

Existence. — Considérons tous les polynômes X tels que deg  $X \leqslant k$ . Tous les polynômes A - BX ont une valuation bornée car

$$o(A - BX) \le deg(A - BX) < max(deg A, k + deg B)$$
.

Il existe donc au moins un polynôme Q (deg  $Q \le k$ ) pour lequel  $\nu$  (A - BX)  $\le \nu$ (A - BQ) quel que soit X. Je dis que pour ce polynôme Q, on a  $\nu$  (A - BQ) > k. En effet supposons que Q donne à A - BQ la plus grande valuation possible et que cette valuation soit  $m \le k$ .

On aurait alors

$$\begin{aligned} \mathbf{A} - \mathbf{B} \mathbf{Q} &= c_m \, e_m + \ldots + \, c_k \, e_k + \ldots + \, c_{\scriptscriptstyle \mathbf{N}} \, e_{\scriptscriptstyle \mathbf{N}} \\ \\ \mathbf{B} &= b_0 \, e_0 + \ldots + \, b_p \, e_p \\ \\ \mathbf{A} - \mathbf{B} \mathbf{Q} - \frac{c_m}{b_0} \, e_m \, \mathbf{B} &= \lambda \, e_{m+1} + \ldots \, . \end{aligned}$$

Donc A — B  $\left(Q + \frac{c_m}{b_0} e_m\right)$  aurait une valuation > m et  $Q + \frac{c_m}{b_0} e_m$  serait de degré  $\leqslant k$ , ce qui contredit l'hypothèse faite sur Q.

*Unicité*. — Si existait  $Q' \neq Q$  tel que deg  $Q' \leqslant k$  et k < v (A — BQ') on aurait:

$$k < o \text{ (A - BQ - A + BQ')} = o \text{ (B (Q' - Q))} = o \text{ (B)} + o \text{ (Q' - Q)} = o \text{ (Q' - Q)} \leq \deg \text{ (Q' - Q)} \leq k$$

ce qui est impossible.

Ainsi à tout couple de polynôme A, B ( $\rho$  (B) = 0) et un entier  $k \ge 0$  correspond un couple unique de polynômes Q, R tels que

$$A = BQ + e_{k+1} R$$
 et  $\deg Q \leqslant k$ .

Cette opération s'appelle division suivant les puissances croissantes à l'ordre k.

### RELATIONS ENTRE LES DEUX DIVISIONS

Nous avons introduit la seconde division en écrivant l'égalité déduite de A = BQ + R, deg R < deg B, pour les polynômes transposés:

$$\overline{\mathbf{A}} = \overline{\mathbf{B}} \, \overline{\mathbf{Q}} + e_{n-r} \, \overline{\mathbf{R}}$$

où  $n = \deg A$ ,  $r = \deg R$ .

Il est évident que dans ce cas les coefficients de  $\overline{Q}$  et  $\overline{R}$  dans la division suivant les puissances croissantes sont les mêmes que ceux de Q et R, écrits dans l'ordre inverse.

Nous montrerons maintenant qu'on obtient la même propriété en partant de la division suivant les puissances croissantes.

Soit A = BQ + 
$$e_{k+1}$$
 R avec  $\rho$  (B) = 0, deg Q  $\leqslant k$ .

Posons  $\deg A = n$ ,  $\deg B = p$ ,  $\deg Q = q \le k$ . Comme v(B) = 0, on a:  $\deg \overline{B} = \deg B = p$ . Ecrivons  $\overline{R} = \overline{A - BQ}$  et distinguons les quatre cas possibles suivants:

1er cas. Si deg A > deg BQ, on a: 
$$\overline{A} - e_{n-p-q} \, \overline{B} \, \overline{Q} = \overline{R}$$
.

2e cas. Si  $\deg A = \deg BQ$  et  $\deg (A - BQ) = \deg A$ , on a:  $\overline{A} - \overline{B} \, \overline{Q} = \overline{R}$ .

3e cas. Si deg A = deg BQ et si  $m = \deg (A - BQ) < \deg A$ , on a  $\overline{A} - \overline{B} \overline{Q} = e_{n-m} \overline{R}$ .

4e cas. Si deg A < deg BQ, on a: 
$$e_{p+q-n} \, \overline{\mathbf{A}} - \overline{\mathbf{B}} \, \overline{\mathbf{Q}} = \overline{\mathbf{R}}.$$

Je dis que dans tous ces cas on a l'égalité d'une division euclidienne.

Remarquons qu'on a toujours deg  $\overline{R} \leqslant \deg R = \deg (A - BQ) - k - 1 < \deg (A - BQ) - q$ .

Examinons les quatre cas:

1er cas. — On a deg  $\overline{R} <$  deg (A — BQ) — q=n-q= deg ( $e_{n-p-q}$   $\overline{B}$ ) puisque deg  $\overline{B}=p$ .

Donc  $\overline{\mathbb{Q}}$  et  $\overline{\mathbb{R}}$  sont les quotient et reste de la division euclidienne de  $\overline{\mathbb{A}}$  par  $e_{n-p-q}$   $\overline{\mathbb{B}}$ .

2e cas. — On a deg 
$$\overline{R} .$$

Donc  $\overline{Q}$  et  $\overline{R}$  sont les quotient et reste de la division euclidienne de  $\overline{A}$  par  $\overline{B}$ .

3e cas. — On a deg  $\overline{\mathbf{R}} < m-q$ , donc deg  $(e_{n-m}\ \overline{\mathbf{R}}) < n-m+m-q = n-q = \deg \mathbf{B} = \deg \overline{\mathbf{B}}$ .

Donc  $\overline{Q}$  et  $e_{n-m}$   $\overline{R}$  sont les quotient et reste de la division euclidienne de  $\overline{A}$  par  $\overline{B}$ .

4e cas. — On a deg  $\overline{\mathbf{R}} < p+q-q=p=\deg \overline{\mathbf{B}}$ . Donc  $\overline{\mathbf{Q}}$  et  $\overline{\mathbf{R}}$  sont les quotient et reste de la division euclidienne de  $e_{p+q-n}$   $\overline{\mathbf{A}}$  par  $\overline{\mathbf{B}}$ .

### Conclusion

Dans tous les cas on peut obtenir les coefficients des quotient Q et reste R de la division de A par B suivant les puissances croissantes à un ordre k, en effectuant la division euclidienne des transposés  $\overline{A}$ ,  $\overline{B}$  de A, B multipliés éventuellement par un  $e_h$  et en prenant les coefficients des transposés des quotient et reste de cette division euclidienne.