

Jean-Marc Poitevin

Outils mathématiques pour physiciens et ingénieurs

Rappels de cours et exercices corrigés

2^e édition

DUNOD

Illustration de couverture : © Ninog/Fotolia

© Dunod, 2012, 2017,
2022 pour la nouvelle présentation

11 rue Paul Bert, 92240 Malakoff
www.dunod.com

EAN : 9782100848423

Le Code de la propriété intellectuelle n'autorisant, aux termes de l'article L. 122-5, 2° et 3° a), d'une part, que les « copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective » et, d'autre part, que les analyses et les courtes citations dans un but d'exemple et d'illustration, « toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite » (art. L. 122-4).

Cette représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit, constituerait donc une contrefaçon sanctionnée par les articles L. 335-2 et suivants du Code de la propriété intellectuelle.



Table des matières

1	Nombres réels et complexes, Identités remarquables, Suites	1
1.	Nombres réels	1
1.1	Catégories	1
1.2	Décomposition en facteurs premiers	2
1.3	Puissances de 10	3
2.	Nombres complexes	3
2.1	Représentation d'un point dans un plan	3
2.2	Les deux notations	4
2.3	Calculs avec les complexes	4
3.	Identités remarquables	5
4.	Suites arithmétique et géométrique	6
	L'essentiel	7
	Entraînez-vous	8
	Solutions	10
2	Trigonométrie, Fonctions hyperboliques, Développements en série	16
1.	Sinus, cosinus, tangente	16
1.1	Définitions, variations	16
1.2	Valeurs particulières	17
1.3	Angles opposés, supplémentaires ou complémentaires	17
2.	Relations trigonométriques	18
3.	Fonctions trigonométriques inverses	19
4.	Fonctions trigonométriques complexes	19
5.	Fonctions hyperboliques	20
6.	Développements en série	20
6.1	Développements au voisinage de zéro	20
6.2	Développements auprès d'une valeur quelconque	21
	L'essentiel	22
	Entraînez-vous	23
	Solutions	26

3	Fonctions de variables réelles ou complexes	39
1.	Fonctions réelles de variables réelles	39
1.1	Fonctions cartésiennes	39
1.2	Fonctions paramétriques	40
1.3	Fonctions polaires	40
2.	Dérivées, étude des variations	40
2.1	Dérivée d'une fonction cartésienne	40
2.2	Dérivée d'une fonction paramétrique	41
2.3	Dérivée d'une fonction polaire	41
2.4	Quelques dérivées usuelles	41
2.5	Tableau de variation	42
3.	Limites	42
4.	Fonctions complexes de variables complexes	43
4.1	Définition	43
4.2	Représentation	44
4.3	Dérivation	44
	L'essentiel	46
	Entraînez-vous	47
	Solutions	51
4	Séries et transformations de Fourier	63
1.	Série de Fourier	63
1.1	Notation réelle	63
1.2	Notation complexe	64
1.3	Spectre de fréquences	64
1.4	Égalité de Parseval	64
2.	Intégrale, ou transformée de Fourier	65
2.1	Définitions	65
2.2	Égalité de Parseval	65
2.3	Spectre	65
	L'essentiel	66
	Entraînez-vous	67
	Solutions	72
5	Équations différentielles	90
1.	Équations différentielles du 1 ^{er} ordre	90
1.1	Principe général	90

1.2 Équation linéaire à coefficients constants	91
1.3 Équation à variables séparées	91
1.4 Équation à variables séparables	92
1.5 Équation homogène	92
1.6 Différentielle exacte	92
1.7 Équation de Bernoulli	93
1.8 Équation de Riccati	93
2. Équations différentielles du 2^e ordre	93
2.1 Principe général	93
2.2 Équation où y ne figure pas	94
2.3 Équation sans second membre où x ne figure pas	94
2.4 Équation linéaire à coefficients constants	94
2.5 Équation de Legendre	95
2.6 Équation de Laguerre	96
2.7 Équation de Tchebychev	96
2.8 Équation de Bessel	96
L'essentiel	98
Entraînez-vous	99
Solutions	104

6	Intégrales de fonctions réelles et complexes, Convolution	124
1.	Primitives	124
2.	Surface, primitive, intégrale	125
2.1	Surface délimitée par une courbe	125
2.2	De la primitive à l'intégrale	126
3.	Intégrales définies et non définies	126
4.	Méthodes d'intégration	127
5.	Intégrales de fonctions complexes	128
5.1	Formulation générale	128
5.2	Lemmes de Jordan	128
5.3	Théorème de Green	128
5.4	Fonctions holomorphes, théorème de Cauchy	128
5.5	Intégrale de Cauchy	129
6.	Méthode des résidus	129
6.1	Série de Taylor	129
6.2	Série de Laurent	130
6.3	Résidu	130

6.4	Théorème des résidus	130
6.5	Intégrales sur des arcs de cercles	131
7.	Convolution	131
7.1	Définition et propriétés	131
7.2	Convolution et transformée de Fourier	132
	L'essentiel	133
	Entraînez-vous	134
	Solutions	141
7	Systèmes d'équations linéaires, Calcul matriciel	170
1.	Systèmes d'équations	170
1.1	n variables et n équations	170
1.2	n variables et p équations	171
2.	Méthodes de résolution	171
2.1	Par substitution	171
2.2	Par combinaison	171
3.	Notation matricielle	171
4.	Calcul matriciel	173
4.1	Addition	173
4.2	Multiplication par un nombre	173
4.3	Multiplication de deux matrices	173
4.4	Inversion	174
4.5	Transposition	174
4.6	Déterminant	175
4.7	Valeurs et vecteurs propres	176
	L'essentiel	177
	Entraînez-vous	178
	Solutions	182
8	Transformation de Laplace, transformée en z	199
1.	Définition	199
2.	Propriétés	200
3.	Table des transformées usuelles	201
4.	Passage de $f(p)$ à $f(t)$	202
4.1	Décomposition en éléments simples	202
4.2	Théorème de Heaviside	203

5. Convolution et transformée de Laplace	203
6. Transformée en z	203
6.1 Principe, définition	203
6.2 Propriétés	204
6.3 Table des transformées usuelles	204
6.4 Passage de $X(z)$ à $x(n)$ ou $x(t)$	205
L'essentiel	207
Entraînez-vous	208
Solutions	214
9 Analyse vectorielle	243
1. Systèmes de coordonnées	243
1.1 Coordonnées cartésiennes (x, y, z)	243
1.2 Coordonnées cylindriques (ρ, φ, z)	244
1.3 Coordonnées sphériques (r, θ, φ)	244
2. Vecteurs	245
2.1 Définitions	245
2.2 Addition, soustraction	246
2.3 Produit scalaire	246
2.4 Produit vectoriel	246
2.5 Autres produits	246
3. Gradient, divergence, rotationnel, laplacien	246
4. Relations entre opérateurs	248
5. Théorème de la divergence (d'Ostrogradsky)	248
6. Théorème du rotationnel (de Stokes ou Ampère)	248
7. Signification des opérateurs	249
7.1 Gradient	249
7.2 Divergence, rotationnel	250
L'essentiel	252
Entraînez-vous	253
Solutions	257
Index	277

À la découverte de votre livre

1 Ouverture de chapitre

Elle donne :

- une **introduction** aux sujets et aux problématiques abordés dans le chapitre
- un **rappel des objectifs** pédagogiques
- le **plan** du chapitre

2 Le cours

Le cours, concis et structuré, expose le programme. Il donne :

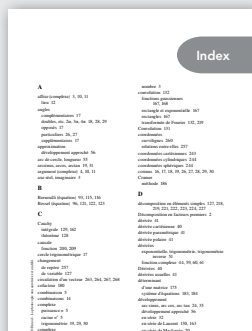
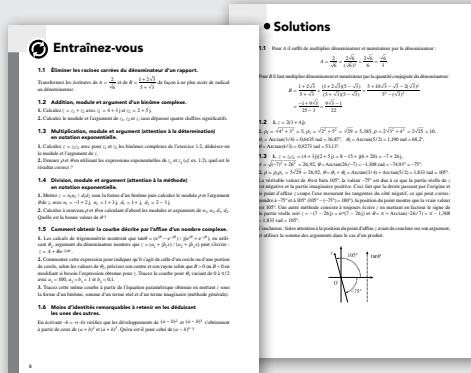
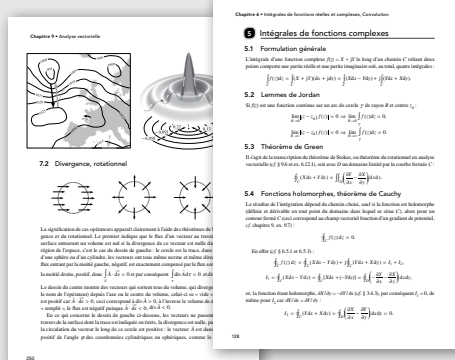
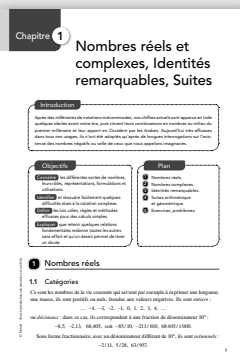
- un **rappel des définitions** clés
- des **schémas** pour maîtriser le cours
- des **exemples** et des **exercices** d'applications reliés au cours

3 En fin de chapitre

- L'**essentiel** : les points clés pour réviser les connaissances essentielles
- Des **exercices** pour tester ses connaissances et s'entraîner
- Les **corrigés** des exercices

4 En fin d'ouvrage

Un index



Nombres réels et complexes, Identités remarquables, Suites

Introduction

Après des millénaires de notations malcommodes, nos chiffres actuels sont apparus en Inde quelques siècles avant notre ère, puis vinrent leurs combinaisons en nombres au milieu du premier millénaire et leur apport en Occident par les Arabes. Aujourd'hui très efficaces dans tous nos usages, ils n'ont été adoptés qu'après de longues interrogations sur l'existence des nombres négatifs ou celle de ceux que nous appelons imaginaires.

Objectifs

Connaître les différentes sortes de nombres, leurs rôles, représentations, formulations et utilisations.

Identifier et résoudre facilement quelques difficultés dues à la notation complexe.

Définir les lois utiles, règles et méthodes efficaces pour des calculs simples.

Expliquer que retenir quelques relations fondamentales redonne toutes les autres sans effort et qu'un dessin permet de lever un doute.

Plan

- 1 Nombres réels.
- 2 Nombres complexes.
- 3 Identités remarquables.
- 4 Suites arithmétique et géométrique.
- 5 Exercices, problèmes.

1 Nombres réels

1.1 Catégories

Ce sont les nombres de la vie courante qui servent par exemple à exprimer une longueur, une masse, ils sont positifs ou nuls, étendus aux valeurs négatives. Ils sont *entiers* :

... -4, -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3, 4, ...

ou *décimaux* : dans ce cas, ils correspondent à une fraction de dénominateur 10^n :

-8,5, -2,13, 68,405, soit $-85/10$, $-213/100$, $68\,405/1\,000$.

Sous forme fractionnaire, avec un dénominateur différent de 10^n , ils sont *rationnels* :

$-2/11$, $5/28$, $63/957$.

Certains nombres sont dits *irrationnels* car ils ne peuvent pas s'exprimer sous la forme d'une fraction de nombres entiers et leurs expressions consistent en suites de chiffres infinies :

$$\sqrt{2} = 2^{1/2} = 1,4142136..., \sqrt[5]{57^3} = 57^{3/5} = 11,311622...,$$

les nombres e et π entrent dans cette catégorie

$$(2,718\ 281\ 828\ 459\ 05..., 3,141\ 592\ 653\ 589\ 79...).$$

Les *nombres premiers* sont des entiers à partir desquels peuvent s'obtenir tous les autres par additions ou multiplications, ils sont divisibles uniquement par eux-mêmes ou par 1, ce sont (jusqu'à 100) : 1, 2, 3, 5, 7, 11, 13, 17, 19, 23, 29, 31, 37, 41, 43, 47, 53, 59, 61, 67, 71, 73, 79, 83, 89, 97, d'où leur utilité pour effectuer des simplifications (cf. § 1.1.2).

En physique la façon d'écrire un nombre possède une signification, ainsi 12,1 m, 12,10 m, 12,100 m, indiquent qu'à douze mètres s'ajoute un décimètre à peut-être quelques centimètres près, puis dix centimètres à quelques millimètres près, enfin cent millimètres à quelques dixièmes de millimètres près.

Quand un nombre se présente sous la forme a^2 , a^3 , $\sqrt{a}$, $\sqrt[3]{a}$, il faut le laisser sous cette forme pour poursuivre les calculs. Hormis en mathématiques, le résultat final doit par contre être exprimé sous forme décimale.

Conduire des calculs à partir de données à, par exemple, quatre chiffres significatifs ne peut donner un résultat à cinq chiffres significatifs ou plus. Ceci signifierait un résultat plus précis que les données or ceci est impossible, la précision pouvant même être dégradée

Une façon simple de représenter les nombres réels est de les situer sur un axe, l'axe des réels, $\overline{Ox}$ ou $\overline{x'x}$.

1.2 Décomposition en facteurs premiers

Cette décomposition est intéressante quand un nombre se présente sous forme fractionnaire, elle permet une simplification. Par exemple :

$$\frac{48\ 510}{124\ 509} = \frac{2 \times 3^2 \times 5 \times 7^2 \times 11}{3 \times 7^3 \times 11^2} = \frac{2 \times 3 \times 5}{7 \times 11} = \frac{60}{77}.$$

Le calcul s'effectue en essayant de diviser par tous les nombres premiers successifs :

48 510	2	124 509	3
24 255	3	41 503	7
8 085	3	5 929	7
2 695	5	847	7
539	7	121	11
77	7	11	11
11	11	1	
1			

1.3 Puissances de 10

Un nombre décimal s'exprime avantageusement en utilisant les puissances de 10, positives (10^n) ou négatives ($10^{-n} = \frac{1}{10^n}$). Les valeurs de n peuvent être uniquement des multiples de 3, notation courante dans le domaine technique :

$$0,0026 = 26 \cdot 10^{-4} = 2,6 \cdot 10^{-3}, \quad 15\,300 = 153 \cdot 10^2 = 15,3 \cdot 10^3.$$

Ceci facilite les calculs approchés, les calculs de produits et de rapports :

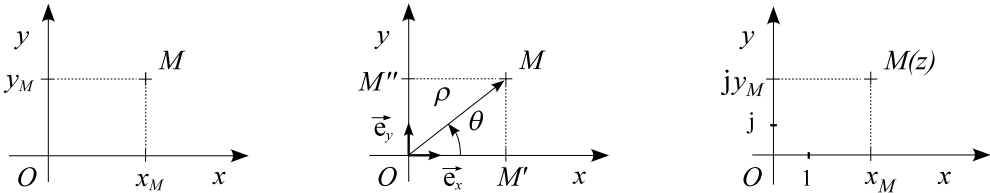
$$2,6 \cdot 10^{-3} \times 15,3 \cdot 10^3 = 2,6 \times 15,3,$$

$$2,6 \cdot 10^{-3} / 15,3 \cdot 10^3 = 2,6 \cdot 10^{-6} / 15,3,$$

$$\begin{aligned} \frac{49 \cdot 10^2 \times 544 \cdot 10^3}{69 \cdot 10^4 \times 133 \cdot 10^{-2}} &= \frac{49 \times 544 \times 10^5}{69 \times 133 \times 10^2} = \frac{49 \times 544}{69 \times 133} \times 10^3 \\ &= \frac{7^2 \times 2^3 \times 3^2 \times 7}{3 \times 23 \times 3^2 \times 7^2} \times 10^3 = \frac{2^3 \times 7}{3 \times 23} \times 10^3 = \frac{56}{69} \times 10^3. \end{aligned}$$

2 Nombres complexes

2.1 Représentation d'un point dans un plan



Une première façon de positionner un point M consiste à donner son abscisse x_M et son ordonnée y_M , nombres réels des axes perpendiculaires $\overrightarrow{Ox}$ et $\overrightarrow{Oy}$.

La position du point M peut aussi être donnée par le vecteur $\overrightarrow{OM}$ de longueur ρ faisant l'angle θ avec l'axe $\overrightarrow{Ox}$. Les vecteurs $\overrightarrow{OM}' = x_M \overrightarrow{e_x}$ et $\overrightarrow{OM}'' = y_M \overrightarrow{e_y}$, composantes de $\overrightarrow{OM}$, ont les longueurs $x_M = \rho \cos \theta$ et $y_M = \rho \sin \theta$, $\overrightarrow{e_x}$ et $\overrightarrow{e_y}$ sont les vecteurs élémentaires de longueur unité.

On peut encore conserver $\overrightarrow{Ox}$ comme *axe réel* et définir $\overrightarrow{Oy}$ comme *axe imaginaire*. Les unités sont 1 sur l'axe réel et j sur l'axe imaginaire (i en mathématique, correspond généralement, en physique, à une intensité). M est l'*image* du nombre complexe z et z est l'*affiche* de M donnée par :

$$z = z_M = x_M + jy_M,$$

cette notation algébrique remplace la notation vectorielle :

$$\overrightarrow{OM} = \overrightarrow{OM}' + \overrightarrow{OM}''.$$

2.2 Les deux notations

Le nombre complexe z peut s'écrire comme ci-dessus, d'où son *module* et son *argument* :

$$z = x + jy, \quad |z| = \rho = \sqrt{x^2 + y^2}, \quad \text{Arg } z = \theta = \text{Arctan}(y/x) \Leftrightarrow \tan \theta = y/x.$$

Le nombre réel y est devenu le nombre imaginaire jy à 90° du précédent. Multiplier à nouveau par j provoque une nouvelle rotation de 90° et met donc le nombre du côté négatif de l'axe réel soit $-y$.

En écrivant que $x = \rho \cos \theta$ et $y = \rho \sin \theta$ il est possible de passer à la notation exponentielle (vérifiable § 2.6.1, développements en série) :

$$z = \rho(\cos \theta + j \sin \theta) = \rho e^{j\theta},$$

le nombre j peut donc s'écrire $e^{j\pi/2}$ soit le nombre 1 ayant subi une rotation de $\pi/2$. Mettre j au carré donne $e^{j\pi}$ soit 1 ayant subi une rotation de π , et ainsi de suite, d'où :

$$j^2 = -1, \quad j^3 = -j, \quad j^4 = 1.$$

2.3 Calculs avec les complexes

Le nombre *conjugué* de $z = x + jy = \rho e^{j\theta}$ est $\bar{z} = x - jy = \rho e^{-j\theta}$, il intervient dans de nombreux calculs. Le produit de z par son conjugué donne :

$$z\bar{z} = (x + jy)(x - jy) = x^2 + y^2 = \rho^2, \quad \text{ou } \rho e^{j\theta} \rho e^{-j\theta} = \rho^2.$$

Addition et soustraction obéissent aux lois habituelles :

$$\left. \begin{array}{l} z_1 = x_1 + jy_1 \\ z_2 = x_2 + jy_2 \end{array} \right\} \Rightarrow \left\{ \begin{array}{l} z_1 + z_2 = x_1 + x_2 + j(y_1 + y_2), \\ z_1 - z_2 = x_1 - x_2 + j(y_1 - y_2), \end{array} \right.$$

Multipliation et division peuvent s'effectuer de différentes façons, avec la notation exponentielle si le module et l'argument sont les grandeurs intéressantes, avec le binôme complexe s'il faut séparer les parties réelle et imaginaire du résultat :

$$z = \rho e^{j\theta} = z_1 z_2 = \rho_1 \rho_2 e^{j(\theta_1 + \theta_2)} \Rightarrow \rho = \rho_1 \rho_2, \quad \theta = \theta_1 + \theta_2,$$

$$z = z_1 z_2 \dots z_k \Rightarrow |z| = |z_1| \cdot |z_2| \cdot \dots \cdot |z_k|, \quad \text{Arg } z = \text{Arg } z_1 + \text{Arg } z_2 + \dots + \text{Arg } z_k.$$

$$z = z_1 z_2 = (x_1 + jy_1)(x_2 + jy_2) = x_1 x_2 - y_1 y_2 + j(x_1 y_2 + x_2 y_1) = \text{Re}(z) + j\text{Im}(z).$$

$$z = \rho e^{j\theta} = \frac{z_1}{z_2} = \frac{\rho_1 e^{j\theta_1}}{\rho_2 e^{j\theta_2}} = \frac{\rho_1}{\rho_2} e^{j(\theta_1 - \theta_2)}, \Rightarrow \rho = \frac{\rho_1}{\rho_2}, \quad \theta = \theta_1 - \theta_2,$$

et si $n_1, n_2, \dots, n_j, d_1, d_2, \dots, d_k$ sont des nombres complexes et si $z = (n_1 n_2 \dots n_j) / (d_1 d_2 \dots d_k)$:

$$|z| = \frac{|n_1| \cdot |n_2| \cdot \dots \cdot |n_j|}{|d_1| \cdot |d_2| \cdot \dots \cdot |d_k|},$$

$$\text{Arg } z = \text{Arg } n_1 + \text{Arg } n_2 + \dots + \text{Arg } n_j - (\text{Arg } d_1 + \text{Arg } d_2 + \dots + \text{Arg } d_k),$$

pour séparer les parties réelle et imaginaire il faut effectuer des calculs du type suivant :

$$z = \frac{z_1}{z_2} = \frac{x_1 + jy_1}{x_2 + jy_2} = \frac{(x_1 + jy_1)(x_2 - jy_2)}{(x_2 + jy_2)(x_2 - jy_2)} = \frac{x_1x_2 + y_1y_2 + j(-x_1y_2 + x_2y_1)}{x_2^2 + y_2^2},$$

$$\operatorname{Re}(z) = \frac{x_1x_2 + y_1y_2}{x_2^2 + y_2^2}, \quad \operatorname{Im}(z) = \frac{-x_1y_2 + x_2y_1}{x_2^2 + y_2^2}.$$

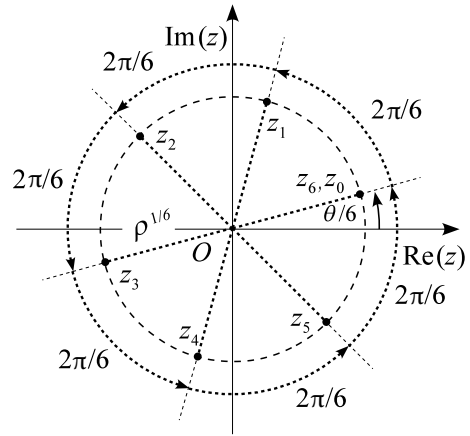
Avec la forme exponentielle le calcul de la puissance n^e d'un nombre complexe donne :

$$z^n = \rho^n (\cos n\theta + j \sin n\theta),$$

quant à la racine n^e elle tient compte de ce que changer θ en $\theta + 2k\pi$ ne change pas la position de $M(z)$ dans le plan complexe, il apparaît donc plusieurs solutions :

$$z^{1/n} = \rho^{1/n} e^{j(\theta/n + 2k\pi/n)} = \rho^{1/n} (\cos(\theta/n + 2k\pi/n) + j \sin(\theta/n + 2k\pi/n)).$$

Les racines de z correspondent à n points espacés de $2\pi/n$ sur un cercle de rayon $\rho^{1/n}$ et centre O , avec le point de départ à l'angle θ/n . Le dernier point est confondu avec le premier car alors $k = n$ et l'angle θ/n a augmenté de $2n\pi/n = 2\pi$. Ci-contre $n = 6$.



3 Identités remarquables

Certaines expressions possèdent des développements caractéristiques (remarquables), elles sont indiquées ci-après.

$$(a+b)^2 = a^2 + 2ab + b^2, \quad (a-b)^2 = a^2 - 2ab + b^2,$$

$$(a+b)^3 = a^3 + 3a^2b + 3ab^2 + b^3, \quad (a-b)^3 = a^3 - 3a^2b + 3ab^2 - b^3.$$

Pour passer de $a+b$ à $a-b$ il suffit d'écrire $-b = +(-b)$ et ces relations ont une forme générale :

$$(a+b)^n = \sum_{p=0}^n C_n^p a^{n-p} b^p, \quad \text{avec pour } 0 \leq p \leq n, \quad C_n^p = \frac{n!}{p!(n-p)!},$$

les factorielles ci-dessus ont une particularité, nécessaire pour obtenir des développements corrects, elles s'écrivent en effet :

$$k! = 1 \times 2 \times 3 \times \dots \times (k-2) \times (k-1) \times k, \quad \text{et } 0! = 1.$$

Les coefficients des termes successifs du développement de $(a + b)^n$ sont également donnés par le triangle de Pascal, calculés à l'aide d'additions comme indiqué par les flèches :

$$\begin{array}{ccccccc}
 n = 0 & 1 & & & & & \\
 n = 1 & 1 & 1 & & & & \\
 n = 2 & 1 & 2 & 1 & & & \\
 n = 3 & 1 & 3 & 3 & 1 & & \\
 n = 4 & 1 & 4 & 6 & 4 & 1 & \\
 n = 5 & 1 & 5 & 10 & 10 & 5 & 1
 \end{array}
 \qquad
 \begin{array}{ccccccc}
 & 1 & & 3 & & 3 & & 1 \\
 & \swarrow & & \downarrow & & \downarrow & & \swarrow \\
 & 1 & & 4 & & 6 & & 4 & & 1
 \end{array}$$

Les autres identités remarquables sont les suivantes avec, là encore, une forme générale :

$$\begin{aligned}
 a^2 - b^2 &= (a - b)(a + b), \quad a^3 - b^3 = (a - b)(a^2 + ab + b^2), \\
 a^n - b^n &= (a - b)(a^{n-1} + a^{n-2}b + \dots + a^{n-k}b^{k-1} + \dots + b^{n-1}).
 \end{aligned}$$

4 Suites arithmétique et géométrique

Une suite de nombres a_i dont chacun est donné par $a_i = a_{i-1} + r$, soit $a_0, a_1 = a_0 + r, \dots, a_n = a_0 + nr$, est une suite arithmétique de raison r et de somme (cf. ex. 1.9) :

$$S_n = n(2a_0 + nr) / 2.$$

Si chacun des nombres est donné par $a_i = qa_{i-1}$, soit $a_0, a_1 = qa_0, \dots, a_n = q^n a_0$, il s'agit d'une suite géométrique de raison q dont la somme est (cf. ex. 1.9) :

$$S_n = a_0 \frac{1 - q^{n+1}}{1 - q}.$$