

BROUILLON - IDENTITÉS REMARQUABLES VIA DES CALCULS « GÉOMÉTRIQUES », EST-CE RIGOUREUX ? - FONCTION POLY AU LIEU DE POLY

CHRISTOPHE BAL

*Document, avec son source L^AT_EX, disponible sur la page
<https://github.com/bc-writings/bc-public-docs/tree/main/drafts>.*

Mentions « légales »

Ce document est mis à disposition selon les termes de la licence Creative Commons “Attribution – Pas d’utilisation commerciale – Partage dans les mêmes conditions 4.0 International”.

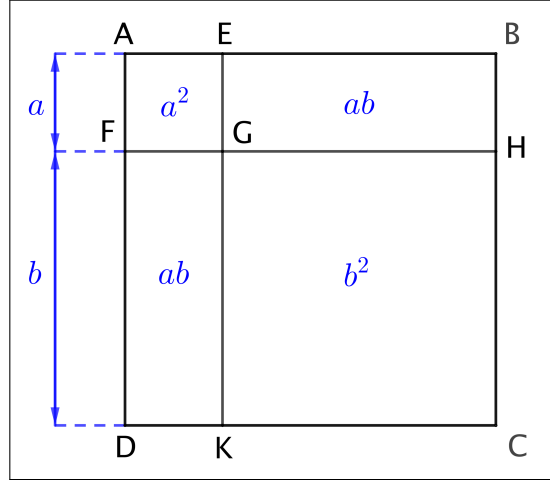


TABLE DES MATIÈRES

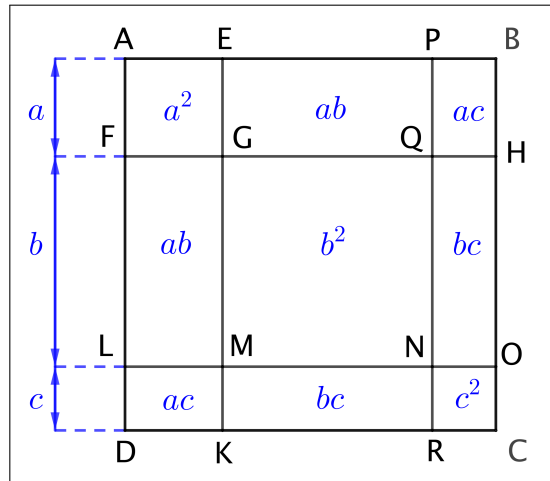
- | | |
|--|---|
| 1. Echauffement avec des égalités entre des polynômes | 2 |
| 2. Allons plus loin avec les formules trigonométriques | 5 |

1. ÉCHAUFFEMENT AVEC DES ÉGALITÉS ENTRE DES POLYNÔMES

Via de simples calculs d'aires, il est très facile de découvrir les classiques identités remarquables $(a + b)^2 = a^2 + b^2 + 2ab$, $(a - b)^2 = a^2 + b^2 - 2ab$ et $(a + b)(a - b) = a^2 - b^2$. Par exemple, en considérant le dessin ci-dessous où $ABCD$, $AEGF$ et $GHCK$ sont des carrés, il est évident que $(a + b)^2 = a^2 + b^2 + 2ab$. Malheureusement, cette démonstration n'est valable que pour $a > 0$ et $b > 0$ (ce sont des contraintes géométriques concrètes).



Comment passer à $(a + b)^2 = a^2 + b^2 + 2ab$ pour a et b deux réels de signes quelconques ? Classiquement, on fait une vérification via un calcul algébrique : en résumé, on conjecture géométriquement, puis on valide algébriquement. Bien que rigoureuse, la démarche précédente est peu satisfaisante, car elle balaye d'un revers de main l'approche géométrique, dont le rôle est réduit à la découverte d'une formule. Si l'on considère le dessin ci-après, il est dommage de devoir faire du calcul algébrique pour valider $(a + b + c)^2 = a^2 + b^2 + c^2 + 2ab + 2ac + 2bc$ pour a, b et c des réels de signes quelconques. Ce serait bien de pouvoir passer directement de $(a + b + c)^2 = a^2 + b^2 + c^2 + 2ab + 2ac + 2bc$ vraie pour $a > 0, b > 0$ et $c > 0$, à la validation de l'identité pour a, b et c de signes quelconques.



Le fait 1 ci-après va rendre licite le passage de la formule géométrique contrainte au cas général en faisant les choix suivants.

- $P(a; b) = (a + b)^2 - a^2 - b^2 - 2ab$
- $P(a; b; c) = (a + b + c)^2 - a^2 - b^2 - c^2 - 2ab - 2ac - 2bc$

Fait 1. Soit $P \in \mathbb{R}[X_1; \dots; X_n]$ un polynôme réel à n variables où $n \in \mathbb{N}^*$. Si P s'annule sur $(\mathbb{R}_+^*)^n$, alors P s'annule sur \mathbb{R}^n tout entier.

Démonstration. Raisonnons par récurrence sur $n \in \mathbb{N}^*$ pour démontrer la validité de la propriété $\mathcal{P}(n)$ définie par « Pour tout polynôme réel $P \in \mathbb{R}[X_1; \dots; X_n]$ à n variables, si P s'annule sur $(\mathbb{R}_+^*)^n$, alors P s'annule sur \mathbb{R}^n tout entier. ».

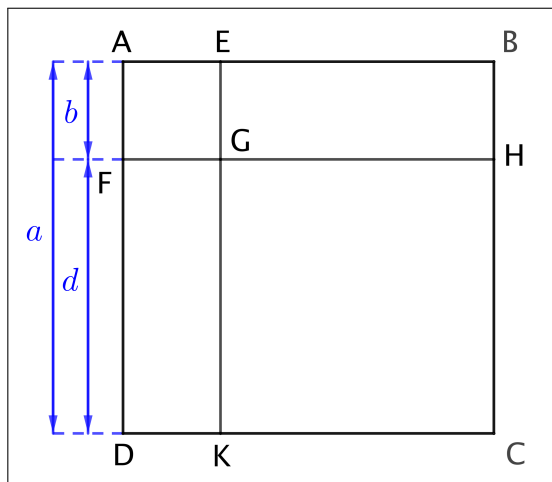
- **Cas de base.** $\mathcal{P}(1)$ signifie qu'un polynôme réel à une variable s'annulant sur \mathbb{R}_+^* est identiquement nul sur \mathbb{R} tout entier. Comme un polynôme réel non nul n'a qu'un nombre fini de racines, nous avons la validité de $\mathcal{P}(1)$.
- **Hérédité.** Supposons $\mathcal{P}(n)$ valide pour un naturel n fixé, mais quelconque. Soit un polynôme P de $(n+1)$ variables vérifiant les conditions de la propriété $\mathcal{P}(n+1)$.
 - (1) Fixons $x \in \mathbb{R}_+^*$, et considérons le polynôme $P_x(X_1; \dots; X_n) = P(X_1; \dots; X_n; x)$. Comme P_x vérifie les conditions de la propriété $\mathcal{P}(n)$, par hypothèse de récurrence, on a $P_x(x_1; \dots; x_n) = 0$, soit $P(x_1; \dots; x_n; x) = 0$, pour tous réels x_1, \dots, x_n .
 - (2) Fixons maintenant des réels x_1, \dots, x_n de signes quelconques, et considérons le polynôme $p(X) = P(x_1; \dots; x_n; X)$. Le point précédent montre que p vérifie $\mathcal{P}(1)$, donc $p(x) = 0$, soit $P(x_1; \dots; x_n; x) = 0$, pour tout réel x , d'après le cas de base.
 - (3) Finalement $P(x_1; \dots; x_n; x) = 0$ pour tous réels x_1, \dots, x_n et x . Autrement dit, nous avons déduit la validité de $\mathcal{P}(n+1)$ à partir de celle de $\mathcal{P}(n)$.
- **Conclusion.** Par récurrence sur $n \in \mathbb{N}^*$, la propriété $\mathcal{P}(n)$ est vraie pour tout naturel non nul n . \square

Exemple 1. En utilisant une approche géométrique semblable à celle présentée plus haut, il devient évident, et rigoureux maintenant, d'affirmer que $\forall n \in \mathbb{N}^*, \forall (a_1; \dots; a_n) \in \mathbb{R}^n$, on a :

$$\left(\sum_{k=1}^n a_k\right)^2 = \sum_{k=1}^n (a_k)^2 + 2 \sum_{1 \leq i < j \leq n} a_i a_j$$

Exemple 2. Nous laissons le soin au lecteur de vérifier à l'aide d'un cube, le solide géométrique, la validité de l'identité $(a+b)^3 = a^3 + 3a^2b + 3ab^2 + b^3$ pour tous réels a et b .

Considérons maintenant le dessin ci-dessous avec $d = a - b$, et la contrainte $a > b$.



Le fait 1, bien que très utile, ne peut plus s'appliquer ici au calcul géométrique évident suivant.

$$\mathcal{A}_{GHCK} = \mathcal{A}_{ABCD} - \mathcal{A}_{ABHF} - \mathcal{A}_{AEKD} + \mathcal{A}_{AEGF}$$

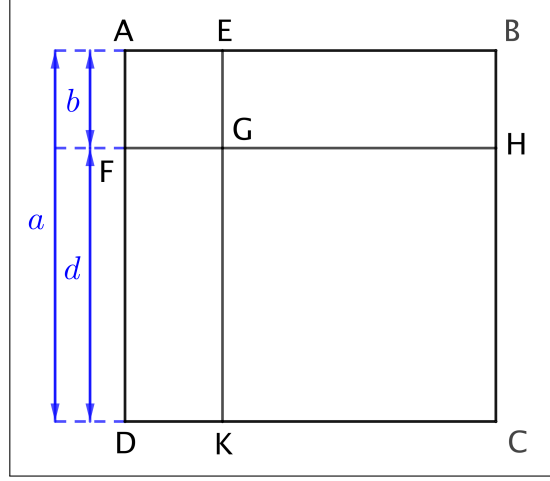
$$\iff (a-b)^2 = a^2 - 2ab + b^2$$

Peut-on tout de même déduire du calcul géométrique précédent la validité, pour tous réels a et b , de l'identité $(a-b)^2 = a^2 + b^2 - 2ab$? Le fait 2 suivant montre que cela est possible.

Fait 2. Soit $P \in \mathbb{R}[X_1; \dots; X_n]$ un polynôme réel à n variables où $n \in \mathbb{N}^*$. Si $\mathcal{E} \subseteq \mathbb{R}^n$ contient $\mathcal{E}_1 \times \dots \times \mathcal{E}_n$ où chaque $\mathcal{E}_k \subseteq \mathbb{R}$ est infini, et si P s'annule sur \mathcal{E} alors P s'annule sur \mathbb{R}^n tout entier.

Démonstration. La preuve du fait 1 s'adapte facilement au cadre proposé ici. \square

Exemple 3. Considérons le dessin ci-dessous avec $d = a - b$, et la contrainte $a > b$.

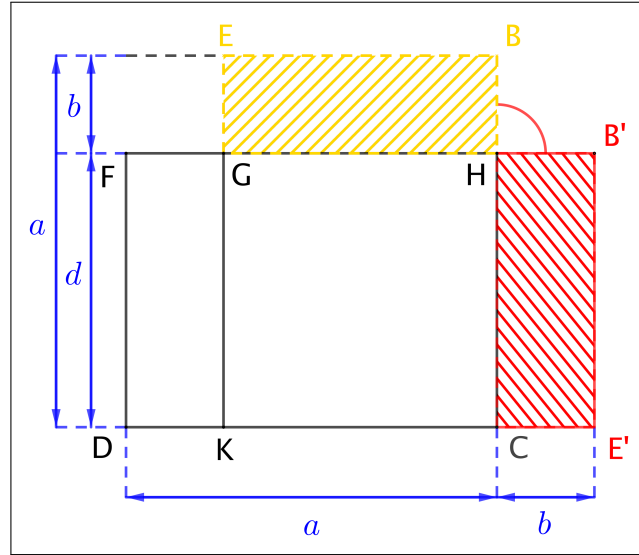


Nous avons les calculs géométriques simples suivants.

$$\mathcal{A}_{ABCD} - \mathcal{A}_{AEGF} = \mathcal{A}_{GHCK} + \mathcal{A}_{EBHG} + \mathcal{A}_{FGKD}$$

$$\Leftrightarrow a^2 - b^2 = \mathcal{A}_{GHCK} + \mathcal{A}_{EBHG} + \mathcal{A}_{FGKD}$$

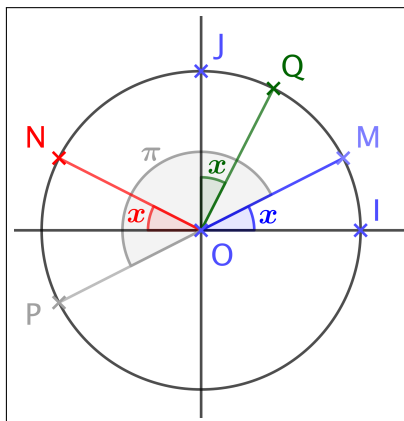
En déplaçant ensuite le rectangle $EBHG$ comme ci-dessous, nous obtenons alors un rectangle de dimension $(a + b) \times (a - b)$.



Finalement, nous obtenons $a^2 - b^2 = (a + b)(a - b)$ si $a > b$, puis, en appliquant le fait 2 à $P(a; b) = a^2 - b^2 - (a + b)(a - b)$, on obtient : $\forall (a; b) \in \mathbb{R}^2, a^2 - b^2 = (a + b)(a - b)$.

2. ALLONS PLUS LOIN AVEC LES FORMULES TRIGONOMÉTRIQUES

Considérons le dessin suivant, où les mesures des angles sont en radians.



Via les points M , N , P et Q , il est facile de fournir des arguments géométriques justifiant que, sous la condition $x \in]0; \frac{\pi}{4}[$, on a :

$$\begin{array}{lll} \bullet \cos(\pi - x) = -\cos x & \bullet \cos(x + \pi) = -\cos x & \bullet \cos\left(\frac{\pi}{2} - x\right) = \sin x \\ \sin(\pi - x) = \sin x & \sin(x + \pi) = -\sin x & \sin\left(\frac{\pi}{2} - x\right) = \cos x \end{array}$$

De nouveau, il serait bien de pouvoir passer à la validité des formules précédentes sur \mathbb{R} tout entier sans plus d'effort (*considérer les autres cas n'est pas compliqué, mais c'est pénible*). Nous allons voir que cela est licite grâce au fait 3 suivant qui est un peu technique, car il nécessite la notion de fonction holomorphe, un concept dont nous redonnons la définition tout de suite.

Définition. Soit une fonction complexe f définie sur un ouvert Ω de \mathbb{C} .

f est dite holomorphe en $\omega \in \Omega$, si la limite $\lim_{\substack{|z-\omega| \rightarrow 0 \\ z \in \Omega - \{\omega\}}} \frac{f(z) - f(\omega)}{z - \omega}$ existe dans \mathbb{C} .

Tout comme avec les fonctions réelles dérivables sur \mathbb{R} , la propriété d'holomorphie se conserve par addition, multiplication, inverse et composition. De plus, comme les fonctions polynomiales, les fonctions holomorphes vérifient des restrictions fortes sur leurs zéros éventuels, comme le montre le fait classique suivant.

Fait 3. Soit f une fonction holomorphe, et non identiquement nulle, sur un ouvert Ω de \mathbb{C} . Si $\lambda \in \Omega$ vérifie $f(\lambda) = 0$, alors il existe un ouvert V tel que $\lambda \in V \subseteq \Omega$, et $\forall z \in V - \{\lambda\}$, $f(z) \neq 0$ (c'est le principe des zéros isolés d'une fonction holomorphe).

Démonstration. Ceci nous amènerait trop loin, donc nous admettrons ce résultat. \square

Si nous revenons à nos identités trigonométriques, il suffit de savoir que les fonctions circulaires réelles ne sont en fait que les restrictions à \mathbb{R} de fonctions holomorphes sur \mathbb{C} tout entier, et de noter que le raisonnement géométrique au début de cette section fait clairement apparaître des zéros non isolés pour les fonctions holomorphes sur \mathbb{C} suivantes.¹

- $A(z) = \cos(\pi - z) + \cos z$ et $B(z) = \sin(\pi - z) - \sin z$
- $C(z) = \cos(z + \pi) + \cos z$ et $D(z) = \sin(z + \pi) + \sin z$
- $E(z) = \cos\left(\frac{\pi}{2} - z\right) - \sin z$ et $F(z) = \sin\left(\frac{\pi}{2} - z\right) - \cos z$

1. Nous admettrons ces affirmations qui ne sont pas violentes à démontrer une fois que l'on a les bases de la théorie des fonctions holomorphes.

Que faire si nous avons des formules trigonométriques impliquant deux variables ? Par exemple, le dessin suivant, par simple application des définitions géométriques du cosinus et du sinus, donne à la fois $\cos(\alpha + \beta) = \cos \alpha \cos \beta - \sin \alpha \sin \beta$ et $\sin(\alpha + \beta) = \cos \alpha \sin \beta + \sin \alpha \cos \beta$ pour $(\alpha; \beta) \in (\mathbb{R}_+^*)^2$ tel que $0 < \alpha + \beta < \frac{\pi}{2}$.

