



# De l'heptadivision d'un triangle au théorème de Routh

*Cet article revisite l'un des fameux problèmes de la géométrie dont le résultat a surpris plus d'un mathématicien. Alors régalez-vous de ces triangles qui se mettent en sept pour vous.*

**Jean-Baptiste Hiriart-Urruty & Patrice Lassère**



## Introduction

Le point de départ est l'exercice suivant qui est posé régulièrement (un exemple très récent est dans la rubrique *Au fil des problèmes* du bulletin *Au fil des maths* problème 546-4, p. 67, décembre 2022 [▶](#) ; voir aussi le problème 474-3 du bulletin de l'APMEP Vol. 474 (2008) p. 390-391 [▶](#)) :

À partir de chaque sommet A, B, C d'un triangle non dégénéré on construit sur le côté opposé les points A', B', C' tels que

$$AB' = \frac{1}{3}AC, \quad BC' = \frac{1}{3}BA, \quad CA' = \frac{1}{3}CB.$$

Alors les points d'intersection des droites (AA'), (BB'), (CC') forment un nouveau triangle IJK (nous conserverons tout le long de ce texte ces notations pour ces points) dont l'aire vaut exactement  $\frac{1}{7}$  de l'aire du triangle initial.

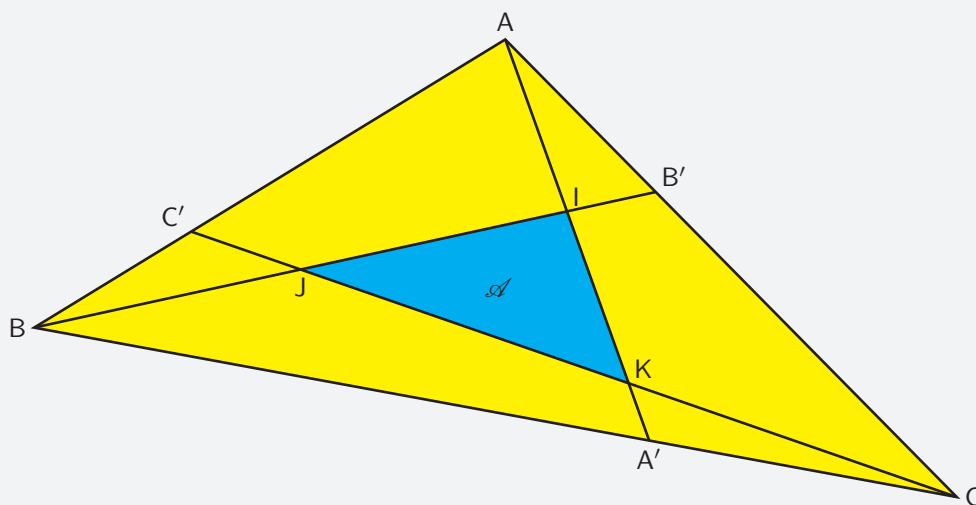


Figure 1. L'aire du triangle IJK vaut  $\frac{1}{7}$  de l'aire du triangle ABC.

Cet exercice d'une apparence inoffensive remporte en général un franc succès. Il faut dire que la constante 7 arrive comme un cheveu dans la soupe et semble n'avoir aucun lien avec le 3 qui pilote la construction.



Une recherche rapide conduit à de nombreuses solutions où l'on croise quelques noms fameux : Richard Feynman, Hugo Steinhaus, Ivan Niven...

On parle parfois de triangle de Feynman : lors d'une soirée, on avait soumis ce problème à Richard Feynman (le célèbre physicien américain) et l'histoire dit (voir [1]) que Feynman n'en avait pas cru un mot et avait passé une partie de la nuit à essayer d'infirmer ce résultat... avant de finalement trouver une solution lorsque le triangle est équilatéral !

## Quelques cas particuliers

Comme Feynman, commençons par considérer le cas particulier où le triangle ABC est équilatéral (ou rectangle).

Le cas où ABC est équilatéral ou rectangle n'est pas innocent car il fournit une solution à notre problème, vu que tout triangle est l'image par une transformation affine d'un triangle équilatéral (ou rectangle) et qu'une transformation affine conserve le rapport des longueurs (notre hypothèse) et donc des aires (notre conclusion).

### Le cas d'un triangle équilatéral

Voici la preuve « presque » sans mots de Pierre-Jean Laurent (Grenoble).

On suppose que  $\mathcal{A}(ABC) = 1$ .

1. Montrer que les triangles de même couleur ont même aire.
2. Montrer que les triangles bleus sont isocèles.
3. Montrer que  $3a = -4a + \frac{1}{3}$ .
4. Conclure.

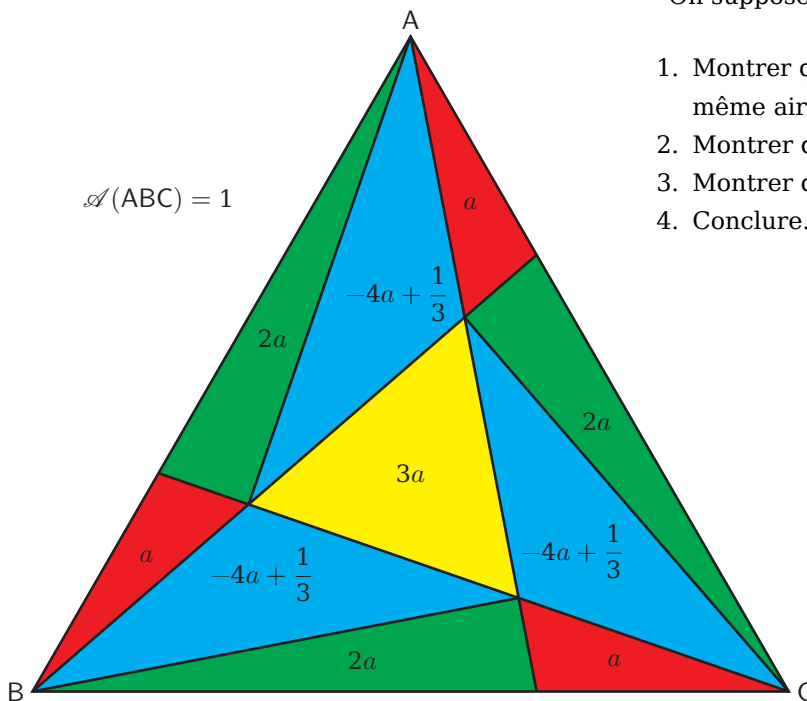


Figure 2. Le carrelage de Pierre-Jean Laurent.



### Le cas d'un triangle rectangle

Avec un peu d'algèbre linéaire on résout le problème sans peine pour le triangle rectangle de sommets  $(0,0)$ ,  $(1,0)$  et  $(0,1)$  :

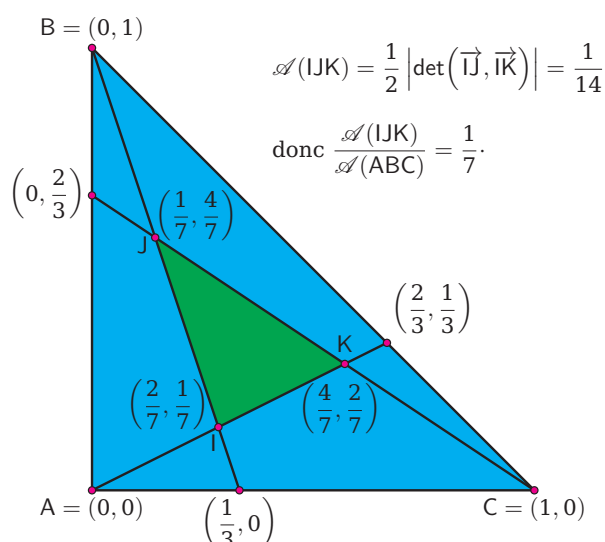


Figure 3. L'aire du triangle rectangle IJK vaut  $\frac{1}{7}$  de l'aire du triangle ABC.

De là, on en déduit le cas général vu que tout triangle est l'image par une application affine  $\varphi : \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}^2$ . Plus précisément, si (en fixant un repère)  $A = (0,0)$ ,  $B = (a,b)$  et  $C = (c,0)$ , le triangle ABC est l'image du triangle rectangle de sommets  $(0,0)$ ,  $(1,0)$  et  $(0,1)$  par l'application linéaire

$$\varphi(x, y) = \begin{pmatrix} c & a \\ 0 & b \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} cx + ay \\ by \end{pmatrix}.$$

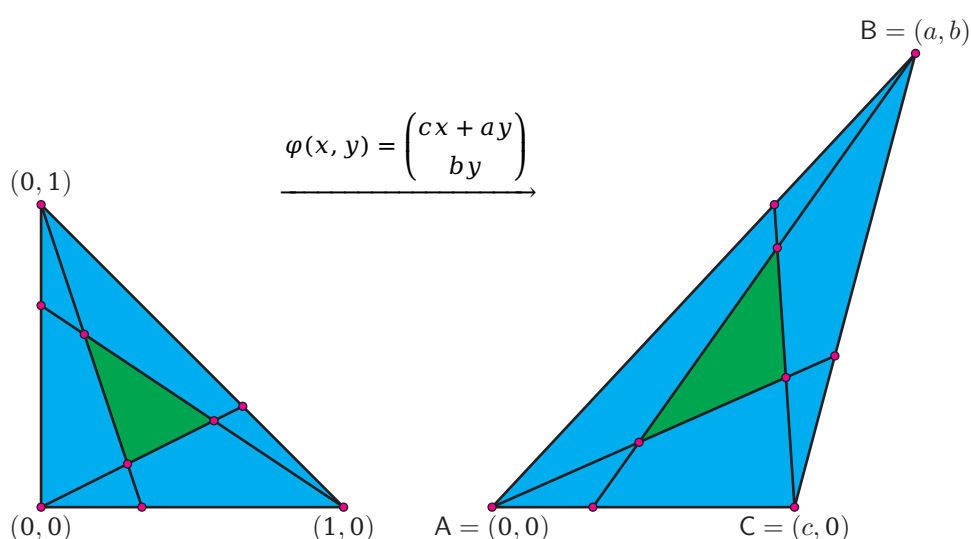


Figure 4. L'application  $\varphi$  envoie notre premier triangle sur ABC en conservant les rapports des longueurs et des aires.

### Remarque

Cette méthode se généralise aussitôt pour prouver le théorème de Routh (voir page 6), les calculs sont juste plus pénibles pour déterminer les coordonnées des sommets dans le triangle rectangle.



## Le triangle est quelconque : quelques approches

### Une première solution

Une preuve presque sans mots dans le même esprit que celle de Pierre-Jean Laurent.

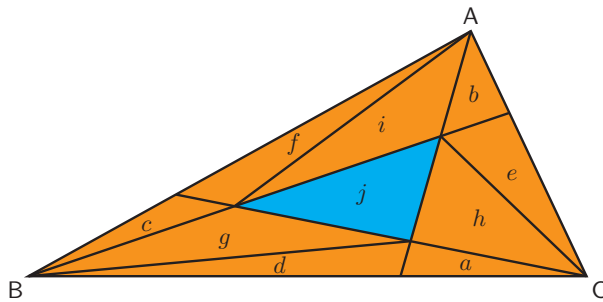


Figure 5. Un autre carrelage.

1. Montrer que

$$2a = d, 2h = g + j, 2(e + b) = c + f + i$$

puis donner deux autres séries de formules analogues.

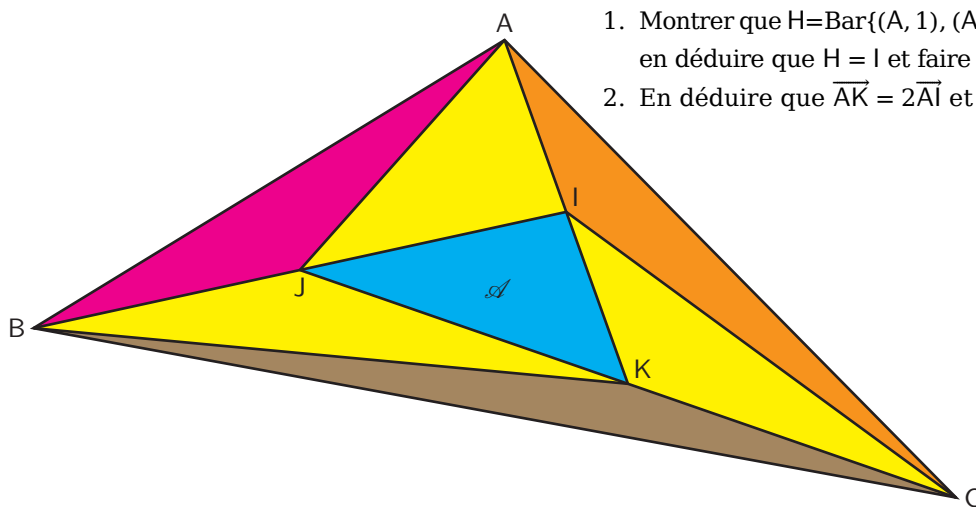
2. En déduire que  $6j = a + b + c + d + e + f + g + h + i$ .

3. Conclure.

### Une deuxième solution

Celle de Beñat Mirabel (Biarritz). On utilise les coordonnées barycentriques pour montrer que I est le milieu de [AK], et par symétrie J est le milieu de [BI] et K le milieu de [CJ]. La médiane d'un triangle définissant deux triangles de même aire on en déduit alors sans peine que les sept triangles colorés ci dessous ont la même aire soit :  $\mathcal{A}(\text{IJK}) = \frac{\mathcal{A}(\text{ABC})}{7}$ .

Plus précisément : considérons le point H de coordonnées barycentriques (1, 2, 4) dans le repère A, B, C i.e. :  $H = \text{Bar}\{(A, 1), (B, 2), (C, 4)\}$  ou encore  $\overrightarrow{HA} + 2\overrightarrow{HB} + 4\overrightarrow{HC} = \vec{0}$ .



1. Montrer que  $H = \text{Bar}\{(A, 1), (A', 6)\} = \text{Bar}\{(C, 4), (C', 3)\}$ , en déduire que  $H = I$  et faire de même pour J et K.
2. En déduire que  $\overrightarrow{AK} = 2\overrightarrow{AI}$  et conclure.

Figure 6. Le carrelage de Beñat Mirabel.



### Une troisième solution (Mikuzinski, 1943)

Une preuve pratiquement sans mots comme la première, connue semble-t-il comme le puzzle de Mikuzinski...

À partir de notre configuration on dédouble et prolonge parallèlement les trois céviennes (une céviene est un segment reliant un sommet d'un triangle à son côté opposé)  $[AA']$ ,  $[BB']$  et  $[CC']$  comme sur la figure ci-dessous, ce qui nous donne un nouveau triangle DEF pavé par seize copies du triangle IJK.

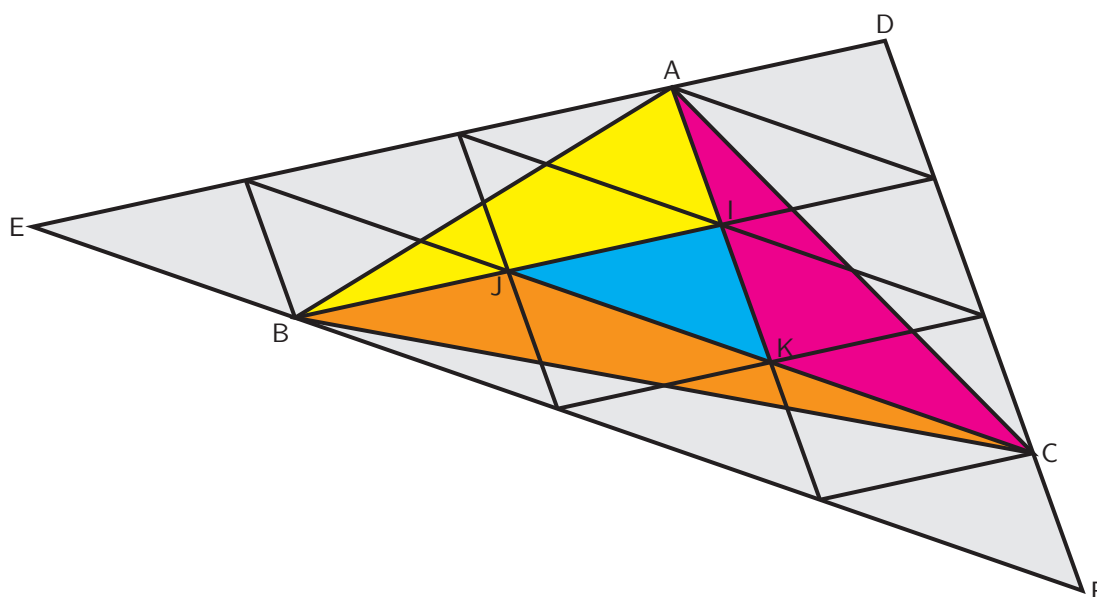


Figure 7. Le carrelage de Mikuzinski.

Alors, les trois cotés  $[AB]$ ,  $[BC]$  et  $[CA]$  étant les diagonales d'un parallélogramme d'aire  $4\mathcal{A}(\text{IJK})$ , il est maintenant clair que  $\mathcal{A}(\text{AIB}) = \mathcal{A}(\text{BJC}) = \mathcal{A}(\text{CKA}) = 2\mathcal{A}(\text{IJK})$  soit  $\mathcal{A}(\text{IJK}) = \frac{\mathcal{A}(\text{ABC})}{7}$ . CQFD. ■

### D'autres solutions

Il n'en manque pas ! Par exemple Hugo Steinhaus [2, p. 20] dans le même esprit que le carrelage de Mikuzinski ou encore Kline et Velleman [3]. Nous nous sommes contentés de celles qui étaient originales (voire inédites) et s'appuyant sur différents aspects de la géométrie.



## Cas général : le théorème de Routh

Comme on peut le soupçonner, cet exercice est le cas particulier d'une situation plus générale, c'est l'objet du théorème de Routh [4].

### Théorème de Routh, 1891

Dans un triangle  $ABC$ , trois points  $D$ ,  $E$  et  $F$  (on suit ici les notations de la figure du traité de Routh ci-dessous) sont choisis sur les cotés  $[BC]$ ,  $[CA]$ ,  $[AB]$  respectivement. Les droites  $[AD]$ ,  $[BE]$  et  $[CF]$  forment un nouveau triangle  $PQR$  dans  $ABC$  comme sur la figure :

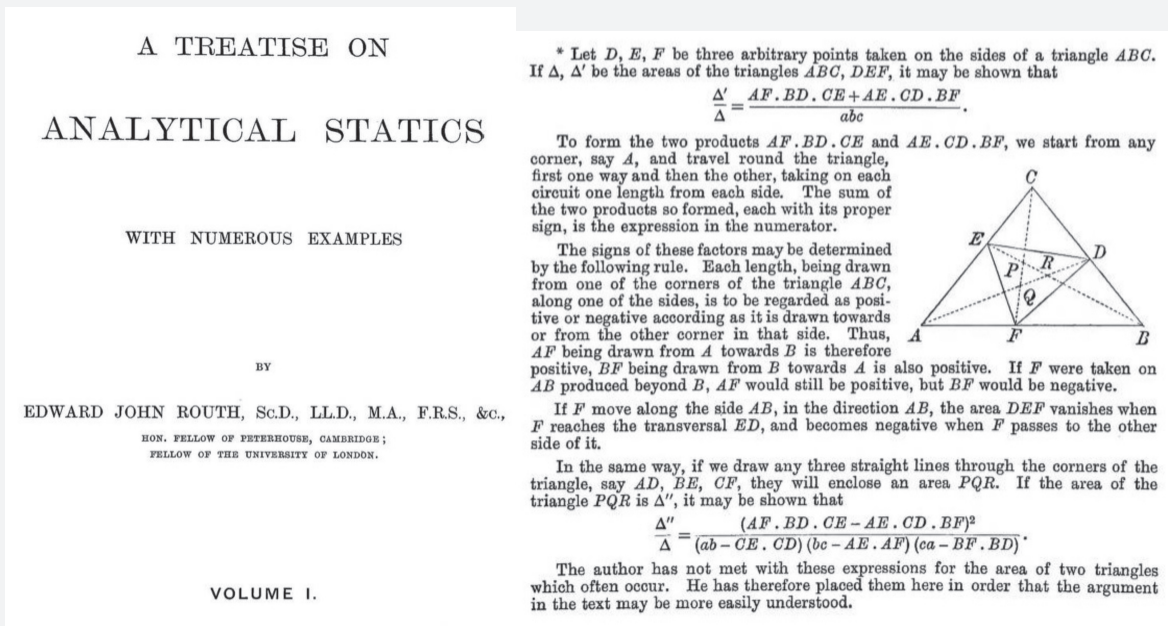


Figure 8. La couverture du livre de Routh et la page 102 qui nous intéresse.

Alors si on pose

$$x = \frac{BD}{DC}, \quad y = \frac{CE}{EA}, \quad z = \frac{AF}{FB}$$

on a

$$\mathcal{A}(PQR) = \frac{(xyz - 1)^2}{(xy + x + 1)(yz + y + 1)(zx + z + 1)} \mathcal{A}(ABC).$$

### Démonstration

Comme on l'a déjà observé page 2, il suffit de traiter le cas où le triangle  $ABC$  est équilatéral ou rectangle, ce qui ne pose pas de réelles difficultés mais manque d'originalité. Il est plus intéressant de proposer une autre approche, par exemple celle de Klamkin et Liu [5].



Oublions un instant la céviene  $[CC']$  et traçons le segment  $[CI]$ .

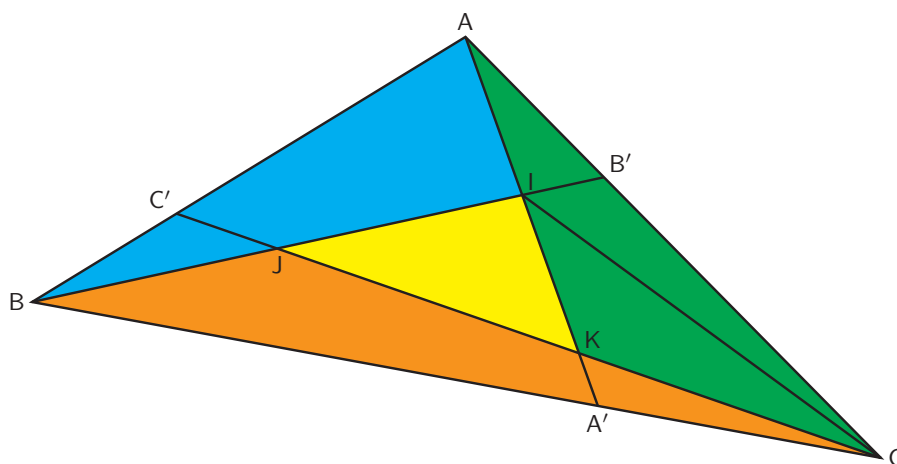


Figure 9.  $\mathcal{A}(ABI) = \frac{x}{1+x+xy} \mathcal{A}(ABC)$ .

Comme  $xA'C = BA'$ ,  $yB'A = CB'$  et  $zC'B = AC'$ , la formule classique « la base fois la hauteur sur 2 » pour l'aire d'un triangle appliquée à tour de bras nous donne

$$\begin{aligned} \mathcal{A}(ABI) &= \mathcal{A}(ABA') - \mathcal{A}(BIA') = x(\mathcal{A}(AA'C) - \mathcal{A}(CIA')) \\ &= x\mathcal{A}(AIC) = x(\mathcal{A}(AIB') + \mathcal{A}(CB'I)) \\ &= x(\mathcal{A}(AIB') + y\mathcal{A}(AIB')) = x(1+y)\mathcal{A}(AIB'). \end{aligned}$$

On a aussi

$$\begin{aligned} \mathcal{A}(ABC) &= (1+y)\mathcal{A}(BB'A) = (1+y)(\mathcal{A}(ABI) + \mathcal{A}(AIB')) \\ &= (1+y) \left( \mathcal{A}(ABI) + \frac{\mathcal{A}(ABI)}{x(1+y)} \right) \\ &= \frac{xy+x+1}{x} \mathcal{A}(ABI), \end{aligned}$$

et finalement

$$\mathcal{A}(ABI) = \frac{x}{1+x+xy} \mathcal{A}(ABC).$$

Par symétrie on a aussi

$$\mathcal{A}(BJC) = \frac{y}{1+y+yz} \mathcal{A}(ABC) \quad \text{et} \quad \mathcal{A}(CKA) = \frac{z}{1+z+xz} \mathcal{A}(ABC).$$

Si bien que

$$\begin{aligned} \mathcal{A}(IJK) &= \mathcal{A}(ABC) - \mathcal{A}(ABI) - \mathcal{A}(BJC) - \mathcal{A}(CKA) \\ &= \left( 1 - \frac{x}{1+x+xy} - \frac{y}{1+y+yz} - \frac{z}{1+z+xz} \right) \mathcal{A}(ABC) \\ &= \frac{(xyz-1)^2}{(xy+x+1)(yz+y+1)(zx+z+1)} \mathcal{A}(ABC). \end{aligned}$$



## Remarques

- On trouve déjà le théorème de Routh dans l'exercice 474-3 du bulletin de l'APMEP (Vol. 474 (2008) pages 390-391) [▶](#).
- On retrouve bien entendu le cas du triangle de Feynman lorsque  $x = y = z = 2$  car

$$\frac{(xyz - 1)^2}{(xy + x + 1)(yz + y + 1)(zx + z + 1)} = \frac{7^2}{7^3} = \frac{1}{7}.$$

- On a aussi l'aire du triangle EFD de la figure du livre de Routh :

$$\mathcal{A}(\text{EFD}) = \frac{xyz + 1}{(x + 1)(y + 1)(z + 1)} \mathcal{A}(\text{ABC}).$$

- Plus intéressant, on en déduit le théorème de Ceva (un même argument conduit aussi à celui de Ménélaüs). Supposons par exemple que trois céviennes issues des sommets A, B et C rencontrent les cotés opposés en D, E et F. En posant comme plus haut :  $x = \frac{BD}{DC}$ ,  $y = \frac{CE}{EA}$  et  $z = \frac{AF}{FB}$ , les céviennes seront concourantes si et seulement si  $\mathcal{A}(\text{PQR}) = 0$  soit encore, vu le théorème de Routh, si et seulement si  $\frac{(xyz - 1)^2}{(xy + x + 1)(yz + y + 1)(zx + z + 1)} = 0$  qui équivaut à  $xyz = 1$ . Écrit autrement :

$$\frac{BD}{DC} \cdot \frac{CE}{EA} \cdot \frac{AF}{FB} = 1.$$

- Lorsque  $x = y = z = n \in \mathbb{N}$  on a

$$\mathcal{A}(\text{PQR}) = \frac{(n^3 - 1)^2}{(n^2 + n + 1)^3} \mathcal{A}(\text{ABC}) = \frac{n^2 - 2n + 1}{n^2 + n + 1} \mathcal{A}(\text{ABC}).$$

La suite  $\left( \frac{n^2 - 2n + 1}{n^2 + n + 1} \right)_n$  est référencée sous OEIS A046162 et A046163 par la On-line encyclopedia of integer sequences [▶](#).

## Généralisations et variantes

### On rajoute des céviennes

Dans [6], Morgan propose la construction géométrique suivante : on trace les trisectrices d'un triangle ABC et on considère l'hexagone  $\mathcal{H}_3$  dont les sommets sont les points d'intersection de chaque trisectrice avec celles issues des sommets opposés. Alors

$$\mathcal{A}(\mathcal{H}_3) = \frac{\mathcal{A}(\text{ABC})}{10}.$$

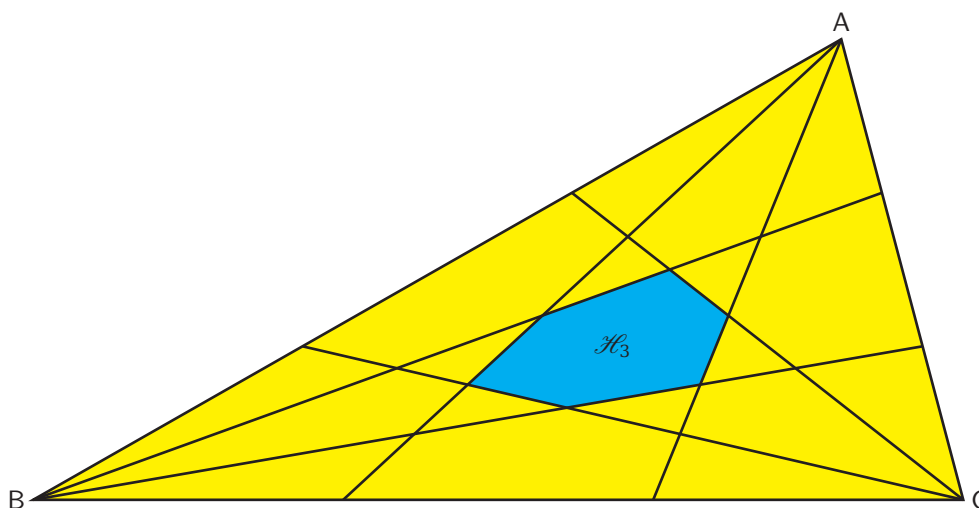


Figure 10. La construction pour  $n = 3$ , l'aire de  $\mathcal{H}_3$  vaut  $\frac{\mathcal{A}(ABC)}{10}$ .

Plus généralement, si on découpe chaque face du triangle ABC en  $n$  intervalles de même longueur,  $n$  étant un **entier impair**, alors l'aire de l'hexagone  $\mathcal{H}_n$  déduit comme pour  $n = 3$  vérifie :

$$\mathcal{A}(\mathcal{H}_n) = \frac{8\mathcal{A}(ABC)}{(3n-1)(3n+1)}.$$

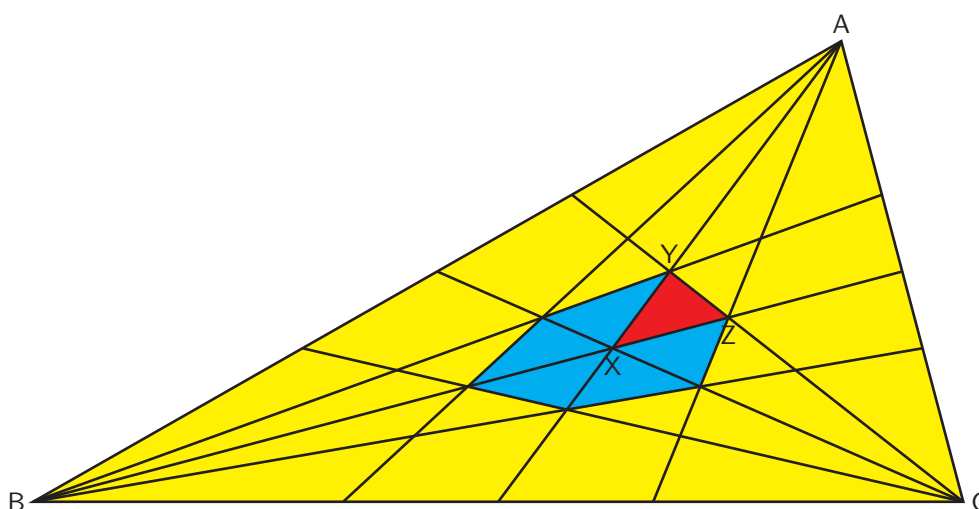


Figure 11. L'aire du triangle rouge vaut  $\frac{\mathcal{A}(ABC)}{60}$ .

L'idée de la démonstration est la suivante : pour tout entier impair  $n \geq 3$ , on rajoute les trois médianes ce qui nous donne une partition de l'hexagone (défini par les  $n$ -ième et  $(n+1)$ -ième céviennes issues de chaque sommet)  $\mathcal{H}_n$  en six triangles qui ont en fait même aire et, bien entendu, pour le vérifier, on utilise le théorème de Routh. Ainsi, si on pose

$$x = \frac{BD}{DC} = 1, \quad y = \frac{CE}{EA} = 1, \quad z = \frac{AF}{FB} = \frac{n-1}{n+1}$$



si bien que

$$\begin{aligned}\mathcal{A}(XYZ) &= \frac{(xyz - 1)^2}{(xy + x + 1)(yz + y + 1)(zx + z + 1)} \mathcal{A}(ABC) \\ &= \frac{4}{3(3n+1)(3n-1)} \mathcal{A}(ABC).\end{aligned}$$

Cet argument donnera le même résultat pour chacun des six triangles : ils ont donc bien la même aire. Par conséquent :

$$\mathcal{A}(\mathcal{H}_n) = 6\mathcal{A}(XYZ) = \frac{8\mathcal{A}(ABC)}{(3n-1)(3n+1)}.$$

CQFD. ■

### Remerciements

Nous remercions Pierre-Jean Laurent (Grenoble) et Beñat Mirabel (Biarritz) pour les échanges fructueux sur le sujet, lesquels ont laissé des traces dans la présente note.

### Références

- [1] R. J. Cook et G. V. Wood. « Feynman's Triangle ». In : *The Mathematical Gazette* Vol. 88 (2004). p. 299-302.
- [2] H. Steinhaus. *Mathematical Snapshots*. New York : Oxford University Press, 1960.
- [3] J. S. Kline et D. Velleman. « Yet another proof of Routh's theorem ». In : *Crux Mathematicorum* Vol. 21. N° 2 (1995). p. 37-40.
- [4] E. J. Routh. *A Treatise on Analytical Statics with numerous examples*. T. Vol. 1. Cambridge University Press, 1891.
- [5] M. S. Klamkin et Liu A. « Three more proofs of Routh's theorem ». In : *Crux Mathematicorum* Vol. 7. N° 7 (août 1981). p. 199-203.
- [6] R. Morgan. « No Restriction Needed ». In : *The Mathematics Teacher* Vol. 87. N° 9 (1994). p. 726, 743.
- [7] E. Abboud. « Routh's Theorem, Morgan's Story, and New Patterns of Area Ratios ». In : *Mathematics Magazine* Vol. 95. N° 4 (2022). p. 294-301.
- [8] Árpád Bényi et Branko Ćurgus. « A Generalization of Routh's Triangle Theorem ». In : *The American Mathematical Monthly* Vol. 120. N° 9 (2013). p. 841-846.
- [9] I. Niven. « A new proof of Routh's theorem ». In : *Mathematics Magazine* Vol. 49. N° 1 (1976). p. 25-27.



Jean-Baptiste Hiriart-Urruty (alias JBHU) est professeur émérite à l'Université Paul Sabatier de Toulouse. Son domaine de recherche est l'optimisation. Il a aussi publié de nombreux ouvrages mathématiques (de recherche ou pour l'enseignement). Il est également impliqué dans la diffusion des sciences et des mathématiques en particulier au travers de l'association Fermat Science.

Patrice Lassère est professeur agrégé (PRAG) à l'Université Paul Sabatier de Toulouse. Son domaine de recherche est l'analyse complexe.

[jbhu@math.univ-toulouse.fr](mailto:jbhu@math.univ-toulouse.fr)

[patrice.lassere@math.univ-toulouse.fr](mailto:patrice.lassere@math.univ-toulouse.fr)

© APMEP Décembre 2023