

ŒUVRES
DE LAGRANGE,

PUBLIÉES PAR LES SOINS

DE M. J.-A. SERRET,

SOUS LES AUSPICES

DE SON EXCELLENCE

LE MINISTRE DE L'INSTRUCTION PUBLIQUE.

TOME TROISIÈME.



PARIS,

GAUTHIER-VILLARS, IMPRIMEUR-LIBRAIRE

DE L'ÉCOLE IMPÉRIALE POLYTECHNIQUE, DU BUREAU DES LONGITUDES,

SUCESSEUR DE MALLET-BACHELIER,

Quai des Augustins, 55.

M DCCC LXIX

TABLE DES MATIÈRES

DU TOME TROISIÈME.

SECTION DEUXIÈME.

(SUITE.)

MÉMOIRES EXTRAITS DES RECUEILS DE L'ACADÉMIE ROYALE DES SCIENCES
ET BELLES-LETTRES DE BERLIN.

	Pages.
VII. Nouvelle méthode pour résoudre les équations littérales par le moyen des séries.	5
VIII. Sur la force des ressorts pliés.....	77
IX. Sur le Problème de Képler.....	113
X. Sur l'élimination des inconnues dans les équations.....	141
XI. Nouvelles réflexions sur les Tautochrones.....	157
XII. Démonstration d'un Théorème d'Arithmétique.....	189
XIII. Réflexions sur la résolution algébrique des équations.....	205
XIV. Démonstration d'un Théorème nouveau concernant les nombres premiers.....	425
XV. Sur une nouvelle espèce de calcul relatif à la différentiation et à l'intégration des quantités variables.....	441
XVI. Sur la forme des racines imaginaires des équations.....	479
XVII. Sur les réfractions astronomiques.....	519
XVIII. Sur l'intégration des équations à différences partielles du premier ordre.....	549
XIX. Nouvelle solution du Problème du mouvement de rotation d'un corps de figure quelconque qui n'est animé par aucune force accélératrice.....	579
XX. Sur l'attraction des Sphéroïdes elliptiques.....	619
XXI. Solutions analytiques de quelques Problèmes sur les pyramides triangulaires...	661
XXII. Recherches d'Arithmétique.....	695

PARIS. — IMPRIMERIE DE GAUTHIER-VILLARS, SUCCESSEUR DE MALLET-BACHELIER,
Rue de Seine-Saint-Germain, 10, près l'Institut.

DÉMONSTRATION
D'UN
THÉORÈME D'ARITHMÉTIQUE.

(Nouveaux Mémoires de l'Académie royale des Sciences
et Belles-Lettres de Berlin, année 1770.)

C'est un Théorème connu depuis longtemps que *tout nombre entier non carré peut toujours se décomposer en deux, ou trois, ou quatre carrés entiers*; mais personne, que je sache, n'en a encore donné la démonstration. M. Bachet de Méziriac est le premier qui ait fait mention de ce Théorème; il paraît qu'il y a été conduit par la question 31^e du IV^e Livre de Diophante, où le Théorème dont nous parlons est en quelque sorte tacitement supposé; mais M. Bachet s'est contenté de s'assurer de la vérité de ce Théorème par induction, en examinant successivement tous les nombres entiers depuis 1 jusqu'à 325; et quant à la démonstration générale, il avoue qu'il n'avait pas encore pu y parvenir. « *Mihi sane (dit-il dans son Commentaire à la question citée) perfecta id demonstratione assequi nondum licuit, quam qui profereat maximas ei habebit gratias, praesertim cum non solum in hac quaestione sed et in nonnullis libri quinti hoc supponere videatur Diophantus.* » Je ne connais, jusqu'à présent, que deux Auteurs qui se soient appliqués à cette recherche, savoir M. Fermat et M. Euler. Dans les Notes que le premier a ajoutées au Commentaire de Bachet sur Diophante, il annonce un grand Ouvrage qu'il avait dessein de composer sur la théorie des nombres, et il promet

d'y démontrer cette proposition générale : que tout nombre est, ou triangulaire, ou composé de deux ou de trois nombres triangulaires; qu'il est, ou carré, ou composé de deux, ou de trois, ou de quatre carrés, et ainsi de suite; mais cet Ouvrage n'a jamais paru, et dans tout ce qui nous reste des écrits de ce grand Géomètre, on ne trouve absolument rien qui puisse fournir la moindre lumière pour la démonstration dont il s'agit. A l'égard de M. Euler, si son travail sur ce sujet n'a pas eu tout le succès qu'on pourrait désirer, on lui a du moins l'obligation d'avoir ouvert la route qu'il faut suivre dans ces sortes de recherches. On peut voir dans le tome V des *Nouveaux Commentaires de Pétersbourg* le résultat des tentatives ingénieuses que ce grand Géomètre a faites pour parvenir à démontrer le Théorème de M. Bachet.

M. Euler fait voir que le produit de deux, ou de plusieurs nombres, dont chacun serait composé de quatre carrés entiers, sera aussi toujours composé de quatre, ou d'un moindre nombre de carrés entiers; d'où il suit d'abord que si le Théorème proposé peut être démontré pour tous les nombres premiers, il le sera aussi pour tous les autres nombres. M. Euler démontre, de plus, qu'un nombre premier quelconque étant proposé, on peut toujours trouver deux ou trois nombres carrés dont la somme soit divisible par ce nombre sans que chacun des carrés en particulier le soit, et que ces nombres carrés peuvent toujours être supposés tels que le quotient de la division de leur somme par le nombre premier donné soit moindre que ce même nombre. De là M. Euler conclut, avec raison, que le Théorème en question serait démontré pour tous les nombres premiers si l'on pouvait seulement démontrer cette autre proposition, savoir, que lorsque le produit de deux nombres est la somme de quatre ou d'un moindre nombre de carrés, et que l'un des nombres produisants est pareillement la somme de quatre ou d'un moindre nombre de carrés, l'autre produisant le sera de même. « *Si summa quatuor quadratorum* (dit-il, page 55 du volume cité) $a^2 + b^2 + c^2 + d^2$ fuerit divisibilis per summam quatuor quadratorum $p^2 + q^2 + r^2 + s^2$, tum quotum non solum in fractis sed etiam in integris esse summam quatuor quadratorum, est Theorema elegantissimum Fermatii, cujus demonstratio cum ipso nobis

est erepta; fateor me adhuc hanc demonstrationem invenire non potuisse, etc. »

C'est donc cette dernière proposition seule qu'il s'agit de démontrer. Or pour cela nous n'aurons pas besoin de supposer que le diviseur soit aussi représenté par la somme de quatre carrés, et nous démontrerons, en général, que tout nombre premier qui est diviseur d'un nombre quelconque composé de quatre ou d'un moindre nombre de carrés, sans l'être de chacun des carrés en particulier, est nécessairement aussi composé de quatre ou d'un moindre nombre de carrés; après quoi il n'y aura plus rien à désirer pour la démonstration complète du Théorème général de Bachet, que nous nous sommes proposé de donner dans ce Mémoire.

LEMME.

Les nombres qui sont la somme de deux carrés premiers entre eux n'admettent d'autres diviseurs que ceux qui sont pareillement la somme de deux carrés.

Cette proposition, qui est de M. Fermat, a été démontrée par M. Euler dans un Mémoire imprimé dans le tome IV des *Nouveaux Commentaires de Pétersbourg*.

COROLLAIRE I. — *Si deux nombres égaux chacun à la somme de deux carrés, tels que $p^2 + q^2$ et $r^2 + s^2$, sont divisibles par un même nombre ρ , et que les quatre carrés p^2, q^2, r^2, s^2 n'aient aucun diviseur commun, je dis que les deux quotients $\frac{p^2 + q^2}{\rho}$ et $\frac{r^2 + s^2}{\rho}$ seront aussi chacun égaux à la somme de deux carrés.*

Car soit m la plus grande commune mesure de p et q , et n la plus grande commune mesure de r et s , de sorte qu'en faisant

$$p = mp', \quad q = mq', \quad r = nr', \quad s = ns'$$

les nombres p' et q' soient premiers entre eux, comme aussi les nombres r' et s' entre eux; on aura donc les deux nombres $m^2(p'^2 + q'^2)$ et $n^2(r'^2 + s'^2)$ qui seront divisibles à la fois par ρ . Or je remarque d'abord

que m et n seront premiers entre eux; autrement les quatre nombres p , q , r et s auraient une commune mesure, ce qui est contre l'hypothèse. Maintenant soit μ la plus grande commune mesure entre m^2 et ρ , en sorte que l'on ait $\rho = \mu\rho'$, et que ρ' soit premier à $\frac{m^2}{\mu}$; donc m^2 sera divisible par μ , et il faudra que $p'^2 + q'^2$ le soit par ρ' , de sorte qu'on aura

$$\frac{p^2 + q^2}{\rho} = \frac{m^2}{\mu} \frac{p'^2 + q'^2}{\rho'};$$

or p' et q' étant premiers entre eux, il suit du Lemme précédent que tant le diviseur ρ' que le quotient seront la somme de deux carrés; ainsi l'on aura

$$\frac{p'^2 + q'^2}{\rho'} = \alpha^2 + \beta^2.$$

Soit de plus ν^2 le plus grand facteur carré du nombre μ , en sorte que $\mu = \nu^2\mu'$, μ' étant un nombre qui ne soit divisible par aucun carré, et il est clair que m^2 ne pourra être divisible par μ à moins que m ne le soit par $\nu\mu'$; soit donc $m = K\nu\mu'$, et l'on aura

$$\frac{m^2}{\mu} = K^2\mu'.$$

Or $n^2(r'^2 + s'^2)$ doit être aussi divisible par $\rho = \mu\rho'$; donc μ divisera $n^2(r'^2 + s'^2)$; mais μ divise déjà m^2 ; donc, puisque m^2 et n^2 sont premiers entre eux, il s'ensuit que μ sera aussi premier à n^2 ; par conséquent il faudra que μ divise $r'^2 + s'^2$; et comme $\mu = \nu^2\mu'$, μ' sera aussi un diviseur de $r'^2 + s'^2$; donc, puisque r' et s' sont premiers entre eux, le diviseur μ' sera égal à la somme de deux carrés par le Lemme. Faisant donc $\mu' = \gamma^2 + \delta^2$, on aura

$$\frac{m^2}{\mu} = K^2(\gamma^2 + \delta^2);$$

et de là

$$\frac{p^2 + q^2}{\rho} = K^2(\gamma^2 + \delta^2)(\alpha^2 + \beta^2) = K^2(\gamma\alpha + \delta\beta)^2 + K^2(\gamma\beta - \delta\alpha)^2,$$

c'est-à-dire égal à la somme de deux carrés. On démontrera de la même manière que le quotient $\frac{r^2 + s^2}{\rho}$ sera aussi égal à la somme de deux carrés.

COROLLAIRE II. — *Si la somme de deux carrés est divisible par une autre somme de deux carrés, le quotient sera toujours égal à la somme de deux carrés.*

Car soit $a^2 + b^2$ divisible par $c^2 + d^2$, et si les nombres a, b, c, d ont une commune mesure, dénotons-la par l , en sorte que l'on ait

$$a = lp, \quad b = lq, \quad c = lr, \quad d = ls,$$

et que p, q, r, s n'aient aucun commun diviseur; donc on aura

$$\frac{a^2 + b^2}{c^2 + d^2} = \frac{p^2 + q^2}{r^2 + s^2},$$

de sorte que $p^2 + q^2$ sera divisible par $r^2 + s^2$; or, faisant $r^2 + s^2 = \rho$, on aura par le Corollaire précédent $\frac{p^2 + q^2}{\rho}$ égal à la somme de deux carrés; donc, etc.

THÉORÈME I.

Si la somme de quatre carrés est divisible par un nombre premier plus grand que la racine carrée de la même somme, ce nombre sera nécessairement égal à la somme de quatre carrés.

Car soit $p^2 + q^2 + r^2 + s^2$ divisible par A , A étant un nombre premier, en sorte que l'on ait

$$Aa = p^2 + q^2 + r^2 + s^2,$$

et comme on suppose que le diviseur A est plus grand que

$$\sqrt{p^2 + q^2 + r^2 + s^2},$$

il est clair que le quotient a sera plus petit que la même racine, de sorte qu'on aura $a < A$.

Cela posé, si les nombres p, q, r et s ont un diviseur commun d , il est clair que la somme de leurs carrés sera divisible par d^2 , et qu'ainsi il faudra que Aa le soit aussi; or d^2 étant plus petit que Aa , d sera plus petit que $\sqrt{Aa} < A$, à cause de $A < a$; donc, puisque A est premier (hypo-

thèse), il est clair que A et d seront premiers entre eux; d'où il s'ensuit que Aa ne pourra être divisible par d^2 à moins que a ne le soit; ainsi, divisant tant le nombre a que chacun des carrés p^2, q^2, \dots par d^2 , on aura une équation de la même forme que la précédente, où le coefficient a sera toujours plus petit que A et où les quatre carrés p^2, q^2, r^2, s^2 n'auront plus de commun diviseur.

Considérons donc l'équation

$$Aa = p^2 + q^2 + r^2 + s^2$$

comme déjà réduite à cet état, et si le nombre $p^2 + q^2$ n'est pas premier à a , soit ρ leur plus grande commune mesure, en sorte que l'on ait

$$a = b\rho \quad \text{et} \quad p^2 + q^2 = t\rho,$$

b et t étant premiers entre eux; on aura donc

$$Ab\rho = t\rho + r^2 + s^2,$$

d'où l'on voit que $r^2 + s^2$ doit être aussi divisible par ρ , de sorte que, nommant le quotient u , l'équation deviendra

$$Ab = t + u;$$

or, puisque ρ divise tant $p^2 + q^2$ que $r^2 + s^2$, et que p, q, r et s n'ont aucun diviseur commun, il s'ensuit du Corollaire I du Lemme précédent que les quotients $\frac{p^2 + q^2}{\rho} = t$ et $\frac{r^2 + s^2}{\rho} = u$ seront l'un et l'autre la somme de deux carrés; ainsi l'on aura

$$t = m^2 + n^2 \quad \text{et} \quad u = h^2 + l^2;$$

donc, multipliant toute l'équation par t , on aura

$$Abt = t^2 + tu,$$

ou bien, en faisant $x = mh + nl$ et $y = ml - nh$, en sorte que $tu = x^2 + y^2$, on aura cette équation-ci

$$Abt = t^2 + x^2 + y^2.$$

Maintenant, comme b et t sont premiers entre eux, on peut toujours trouver deux multiples de b et t tels que leur somme ou leur différence soit égale à un nombre quelconque donné, et de plus on peut supposer que l'un de ces multiples soit moindre que $\frac{bt}{2}$ [voyez le Lemme I du Mémoire sur les Problèmes indéterminés, qui est imprimé dans le tome XXIV des *Mémoires de l'Académie royale des Sciences et Belles-Lettres de Berlin*, pour l'année 1768 (*)]; ainsi l'on peut faire

$$x = \alpha t + \gamma b \quad \text{et} \quad y = \beta t + \delta b,$$

α , β , γ et δ étant des nombres entiers positifs ou négatifs, et l'on peut supposer en même temps que α et β , pris positivement, soient l'un et l'autre plus petits que $\frac{b}{2}$. Qu'on fasse donc cette substitution dans l'équation précédente, elle deviendra

$$Abt = t^2(1 + \alpha^2 + \beta^2) + 2\alpha\gamma tb + 2\beta\delta tb + \gamma^2 b^2 + \delta^2 b^2,$$

où l'on voit que tous les termes sont multipliés par b , à l'exception de ceux-ci

$$t^2(1 + \alpha^2 + \beta^2);$$

ainsi, pour que cette équation puisse subsister en nombres entiers comme il le faut, il est nécessaire que $t^2(1 + \alpha^2 + \beta^2)$ soit aussi divisible par b ; mais b et t sont premiers entre eux, donc il faudra que b divise $1 + \alpha^2 + \beta^2$, de sorte qu'en nommant le quotient a' on aura

$$a'b = 1 + \alpha^2 + \beta^2;$$

et comme α et β sont chacun plus petits que $\frac{b}{2}$, $1 + \alpha^2 + \beta^2$ sera plus petit que $\frac{b^2}{2} + 1$; par conséquent a' sera plus petit que $\frac{b}{2} + \frac{1}{b}$.

Or, mettant dans l'équation ci-dessus $a'b$ à la place de $1 + \alpha^2 + \beta^2$, et divisant ensuite par b , on aura

$$At = a't^2 + 2\alpha\gamma t + 2\beta\delta t + (\gamma^2 + \delta^2)b,$$

(*) *OEuvres de Lagrange*, t. II, p. 659.

où je remarque encore que tous les termes étant multipliés par t , excepté ceux-ci

$$(\gamma^2 + \delta^2) b,$$

il faudra que le nombre $(\gamma^2 + \delta^2) b$ soit divisible par t , et comme b et t sont premiers entre eux, il faudra que $\gamma^2 + \delta^2$ soit divisible par t .

Si l'on multiplie l'équation que nous venons de trouver par a' , elle pourra se mettre sous cette forme

$$Aa't = (a't + \alpha\gamma + \beta\delta)^2 + (\gamma^2 + \delta^2) a'b - (\alpha\gamma + \beta\delta)^2,$$

ou bien sous celle-ci

$$Aa't = (a't + \alpha\gamma + \beta\delta)^2 + \gamma^2(a'b - \alpha^2) + \delta^2(a'b - \beta^2) - 2\alpha\beta\gamma\delta;$$

mais on a

$$a'b = 1 + \alpha^2 + \beta^2,$$

donc l'équation précédente deviendra

$$Aa't = (a't + \alpha\gamma + \beta\delta)^2 + \gamma^2(1 + \beta^2) + \delta^2(1 + \alpha^2) - 2\alpha\beta\gamma\delta,$$

c'est-à-dire

$$Aa't = (a't + \alpha\gamma + \beta\delta)^2 + (\beta\gamma - \alpha\delta)^2 + \gamma^2 + \delta^2.$$

Or nous avons dit ci-dessus que $\gamma^2 + \delta^2$ doit être divisible par t , donc il faudra aussi que le nombre

$$(a't + \alpha\gamma + \beta\delta)^2 + (\beta\gamma - \alpha\delta)^2$$

le soit; mais on a

$$t = m^2 + n^2,$$

donc, par le Corollaire II du Lemme, chacun des deux quotients sera nécessairement la somme de deux carrés; de sorte qu'on aura

$$\gamma^2 + \delta^2 = t(p'^2 + q'^2) \quad \text{et} \quad (a't + \alpha\gamma + \beta\delta)^2 + (\beta\gamma - \alpha\delta)^2 = t(r'^2 + s'^2).$$

Donc on aura, après avoir divisé toute l'équation par t ,

$$Aa' = p'^2 + q'^2 + r'^2 + s'^2.$$