

OEUVRES
MATHÉMATIQUES



Ce portrait d'Évariste Galois, publié par le *Magasin pittoresque* en 1848, a été fait de mémoire par son frère Alfred

Évariste GALOIS

ŒUVRES
MATHÉMATIQUES
publiées en 1846 dans le *Journal de Liouville*



ÉDITIONS
JACQUES GABAY

Les *Œuvres Mathématiques* d'Évariste Galois ont été publiées dans le *Journal de Liouville*, Tome XI, année 1846, pp. 381-444.
L'étude de Sophus Lie, *Influence de Galois*, a été publiée dans l'ouvrage *Le Centenaire de l'École Normale 1795-1895*, Hachette 1895.

© 1989, Éditions Jacques Gabay
25, rue du Dr Roux 92330 Sceaux

Tous droits réservés. Aucun extrait de ce livre ne peut-être reproduit, sous quelque forme ou quelque procédé que ce soit, sans le consentement préalable de l'Éditeur

ISBN 2-87647-052-7

OEUVRES MATHÉMATIQUES

D'ÉVARISTE GALOIS.

AVERTISSEMENT.

Le géomètre ingénieux et profond, dont nous donnons ici les œuvres, est mort ayant vingt ans à peine ; et encore a-t-il dépensé stérilement, dans les agitations de la politique, au milieu des clubs ou sous les verrous de Sainte-Pélagie, la plus grande partie des deux dernières années d'une vie si courte. Il était né le 26 octobre 1811 ; et au mois de mai 1832 un fatal duel, venu sans doute à la suite de quelque querelle frivole, l'enleva aux sciences mathématiques, qu'il aurait cultivées avec tant d'éclat !

Le principal travail d'Évariste Galois a pour objet les conditions de résolubilité des équations par radicaux. L'auteur y pose les bases d'une théorie générale qu'il applique en détail aux équations dont le degré est un nombre premier. Dès l'âge de seize ans, et sur les bancs du collège Louis-le-Grand, où ses heureuses dispositions furent encouragées par un excellent professeur, par un excellent homme, M. Richard [*], Galois s'était occupé de ce sujet difficile. Il présenta successivement à l'Académie plusieurs Mémoires contenant les résultats de ses méditations ; mais, à part quelques fragments, quelques notes, il ne nous reste

[*] M. Le Verrier, M. Hermite, et d'autres savants distingués, ont suivi la classe de M. Richard. Les bons élèves font la gloire du maître.

aujourd'hui que celui qu'il remit en dernier lieu, le 17 janvier 1831. Les Commissaires [*], dans leur Rapport, reprochèrent au jeune analyste une rédaction obscure, et ce reproche qu'on avait adressé déjà (Galois lui-même nous l'apprend) à ses précédentes communications, était fondé, il faut l'avouer. Un désir exagéré de concision fut la cause de ce défaut que l'on doit surtout tâcher d'éviter en traitant les matières abstraites et mystérieuses de l'Algèbre pure. La clarté est, en effet, d'autant plus nécessaire, qu'on a dessein d'entraîner le lecteur plus loin des routes battues et dans des contrées plus arides. « Quand » il s'agit de questions transcendentes, soyez, disait Descartes, transcendentalelement clairs. » Galois a trop souvent négligé ce précepte; et nous comprenons que d'illustres géomètres aient jugé convenable d'essayer de ramener au droit chemin, par la sévérité de leurs sages conseils, un débutant plein de génie, mais inexpérimenté. L'auteur qu'ils censuraient était devant eux, ardent, actif, il pouvait profiter de leurs avis.

Mais à présent tout est changé. Galois n'est plus! Gardons-nous bien de le poursuivre d'inutiles critiques; laissons là les défauts, voyons les qualités.

Lorsque, cédant au vœu des amis d'Évariste, je me suis livré, pour ainsi dire sous les yeux de son frère [**], à l'étude attentive de toutes les pièces imprimées ou manuscrites qu'il a laissées, j'ai donc cru devoir me proposer comme but unique de rechercher, de démêler, pour le faire ensuite ressortir de mon mieux, ce qu'il y a de neuf

[*] MM. Lacroix et Poisson rapporteur. On peut voir quelles étaient les conclusions (un peu sèches) du Rapport par la manière dont M. Lacroix s'exprime dans la sixième édition de ses *Compléments des Éléments d'Algèbre*, page 345 : « En 1831, un jeune » Français, Évariste Galois, mort l'année suivante, avait annoncé, dans un Mémoire » présenté à l'Académie des Sciences, que, *pour qu'une équation irréductible de degré » premier soit soluble par radicaux, il faut et il suffit que deux quelconques des racines » étant connues, les autres s'en déduisent rationnellement*; mais ce Mémoire parut à » peu près inintelligible aux Commissaires chargés de l'examiner. »

[**] M. Alfred Galois.

dans ces productions. Mon zèle a été bientôt récompensé, et j'ai joui d'un vif plaisir au moment où, après avoir comblé de légères lacunes, j'ai reconnu l'exactitude entière de la méthode par laquelle Galois prouve, en particulier, ce beau théorème : *Pour qu'une équation irréductible de degré premier soit soluble par radicaux, il faut et il suffit que toutes les racines soient des fonctions rationnelles de deux quelconques d'entre elles.* Cette méthode, vraiment digne de l'attention des géomètres, suffirait seule pour assurer à notre compatriote un rang dans le petit nombre des savants qui ont mérité le titre d'inventeurs.

Nous reproduirons d'abord les divers articles publiés par Galois, de 1828 à 1830, dans les *Annales* de M. Gergonne et dans le *Bulletin des Sciences* de M. Férussac. Puis viendront les pièces inédites, et enfin un commentaire où nous nous proposons de compléter certains passages et d'éclaircir quelques points délicats.

La veille de sa mort, et dans la prévision du sort funeste qui l'attendait, Galois traça rapidement le résumé des grandes idées dont il était occupé, et adressa, sous forme de lettre, à son meilleur ami, M. Auguste Chevalier, ce dernier écrit, sorte de testament scientifique, que nous placerons comme préface des œuvres posthumes, et qu'on ne lira pas sans émotion en songeant dans quelle circonstance il fut composé. Cette Lettre a été insérée, en 1832, dans la *Revue encyclopédique*, numéro de septembre, page 568. Une Notice nécrologique sur Galois, par M. Auguste Chevalier, a paru dans le même numéro, page 744. Nous n'avons pas cru à propos de la faire entrer dans notre collection. Elle renferme des détails intéressants, mais, pour la plupart, étrangers à la science. Et certaines assertions, certains jugements trop absolus concernant les personnes et les choses, appelleraient peut-être des contradicteurs. Il est vrai qu'aux yeux mêmes de ceux qui s'éloigneraient le plus de ses opinions, l'auteur de cette Notice a d'avance trouvé son excuse dans la tendre amitié qui l'unissait à Galois. Quant à nous, qui n'avons ni connu, ni même jamais vu ce malheureux jeune homme, nous nous renfermerons dans notre rôle de géomètre, et les observations que nous pourrions nous permettre,

en publiant ses œuvres sous l'inspiration de sa famille, ne porteront que sur les mathématiques.

Toul, le 30 octobre 1846

J. LIOUVILLE.

Nota. Les exigences de nos publications ordinaires et l'étendue des œuvres de Galois nous empêchant de réunir ces œuvres en un seul faisceau, nous les donnerons en deux fois, partie dans ce volume et partie dans le suivant.

*Articles publiés par Galois dans les Annales de Mathématiques
de M. Gergonne.*

Démonstration d'un théorème sur les fractions continues périodiques[].*

On sait que si, par la méthode de Lagrange, on développe en fraction continue une des racines d'une équation du second degré, cette fraction continue sera périodique, et qu'il en sera encore de même de l'une des racines d'une équation de degré quelconque, si cette racine est racine d'un facteur rationnel du second degré du premier membre de la proposée, auquel cas cette équation aura, tout au moins, une autre racine qui sera également périodique. Dans l'un et dans l'autre cas, la fraction continue pourra d'ailleurs être immédiatement périodique ou ne l'être pas immédiatement; mais, lorsque cette dernière circonstance aura lieu, il y aura du moins une des transformées dont une des racines sera immédiatement périodique.

Or, lorsqu'une équation a deux racines périodiques, répondant à un même facteur rationnel du second degré, et que l'une d'elles est immédiatement périodique, il existe entre ces deux racines une relation assez singulière qui paraît n'avoir pas encore été remarquée, et qui peut être exprimée par le théorème suivant :

THÉORÈME. *Si une des racines d'une équation de degré quelconque est une fraction continue immédiatement périodique, cette équation aura nécessairement une autre racine également périodique que l'on obtiendra en divisant l'unité négative par cette même fraction continue périodique, écrite dans un ordre inverse.*

Démonstration. Pour fixer les idées, ne prenons que des périodes de quatre termes; car la marche uniforme du calcul prouve qu'il en serait de même si nous en admettions un plus grand nombre. Soit une

[*] Tome XIX des *Annales*, page 294 (1828-1829). Galois était alors élève au Collège Louis-le-Grand. (J. L.)

des racines d'une équation de degré quelconque exprimée comme il suit :

$$x = a + \frac{1}{b + \frac{1}{c + \frac{1}{d + \frac{1}{a + \frac{1}{b + \frac{1}{c + \frac{1}{d + \dots}}}}}}};$$

l'équation du second degré, à laquelle appartiendra cette racine, et qui contiendra conséquemment sa corrélatrice, sera

$$x = a + \frac{1}{b + \frac{1}{c + \frac{1}{d + \frac{1}{x}}}};$$

or, on tire de là successivement

$$a - x = -\frac{1}{b + \frac{1}{c + \frac{1}{d + \frac{1}{x}}}}, \quad \frac{1}{a - x} = -\left(b + \frac{1}{c + \frac{1}{d + \frac{1}{x}}}\right),$$

$$b + \frac{1}{a - x} = -\frac{1}{c + \frac{1}{d + \frac{1}{x}}}, \quad \frac{1}{b + \frac{1}{a - x}} = -\left(c + \frac{1}{d + \frac{1}{x}}\right),$$

$$c + \frac{1}{b + \frac{1}{a - x}} = -\frac{1}{d + \frac{1}{x}}, \quad \frac{1}{c + \frac{1}{b + \frac{1}{a - x}}} = -\left(d + \frac{1}{x}\right),$$

$$d + \frac{1}{c + \frac{1}{b + \frac{1}{a - x}}} = -\frac{1}{x}, \quad \frac{1}{d + \frac{1}{c + \frac{1}{b + \frac{1}{a - x}}}} = -x,$$

c'est-à-dire

$$x = -\frac{1}{d + \frac{1}{c + \frac{1}{b + \frac{1}{a - x}}}};$$

c'est donc toujours là l'équation du second degré qui donne les deux racines dont il s'agit; mais, en mettant continuellement pour x , dans son second membre, ce même second membre qui en est, en effet, la valeur, elle donne

$$x = -\frac{1}{d + \frac{1}{c + \frac{1}{b + \frac{1}{a + \frac{1}{d + \frac{1}{c + \frac{1}{b + \frac{1}{a + \dots}}}}}}}}};$$

c'est donc là l'autre valeur de x , donnée par cette équation, valeur qui, comme l'on voit, est égale à -1 divisé par la première.

Dans ce qui précède, nous avons supposé que la racine proposée était plus grande que l'unité; mais, si l'on avait

$$x = \frac{1}{a + \frac{1}{b + \frac{1}{c + \frac{1}{d + \frac{1}{a + \frac{1}{b + \frac{1}{c + \frac{1}{d + \dots}}}}}}}},$$

on en conclurait, pour une des valeurs de $\frac{1}{x}$,

$$\frac{1}{x} = a + \frac{1}{b + \frac{1}{c + \frac{1}{d + \frac{1}{a + \frac{1}{b + \frac{1}{c + \frac{1}{d + \dots}}}}}}};$$

l'autre valeur de $\frac{1}{x}$ serait donc, par ce qui précède,

$$\frac{1}{x} = - \frac{1}{d + \frac{1}{c + \frac{1}{b + \frac{1}{a + \frac{1}{d + \frac{1}{c + \frac{1}{b + \frac{1}{a + \dots}}}}}}}}$$

d'où l'on conclurait, pour l'autre valeur de x ,

$$x = - \left(d + \frac{1}{c + \frac{1}{b + \frac{1}{a + \frac{1}{d + \frac{1}{c + \frac{1}{b + \frac{1}{a + \dots}}}}}}} \right)$$

ou

$$x = -1 : \frac{1}{d + \frac{1}{c + \frac{1}{b + \frac{1}{a + \frac{1}{d + \frac{1}{c + \frac{1}{b + \frac{1}{a + \dots}}}}}}} ;$$

ce qui rentre exactement dans notre théorème.

Soit A une fraction continue immédiatement périodique quelconque, et soit B la fraction continue qu'on en déduit en renversant la période ; on voit que, si l'une des racines d'une équation est $x = A$, elle aura nécessairement une autre racine $x = -\frac{1}{B}$; or, si A est un nombre positif plus grand que l'unité, $-\frac{1}{B}$ sera négatif et compris entre 0 et -1 ; et, à l'inverse, si A est un nombre négatif compris entre 0 et -1 ,

$-\frac{1}{B}$ sera un nombre positif plus grand que l'unité. Ainsi, lorsque l'une des racines d'une équation du second degré est une fraction continue immédiatement périodique, plus grande que l'unité, l'autre est nécessairement comprise entre 0 et -1 ; et réciproquement, si l'une d'elles est comprise entre 0 et -1 , l'autre sera nécessairement positive et plus grande que l'unité.

On peut prouver que, réciproquement, si l'une des deux racines d'une équation du second degré est positive, et plus grande que l'unité, et que l'autre soit comprise entre 0 et -1 , ces racines seront exprimables en fractions continues immédiatement périodiques. En effet, soit toujours A une fraction continue immédiatement périodique quelconque, positive et plus grande que l'unité, et B la fraction continue immédiatement périodique qu'on en déduit, en renversant la période, laquelle sera aussi, comme elle, positive et plus grande que l'unité. La première des racines de la proposée ne pourra être de la forme

$$x = p + \frac{1}{A},$$

car alors, en vertu de notre théorème, la seconde devrait être

$$x = a + \frac{1}{-\frac{1}{B}} = a - B;$$

or $a - B$ ne saurait être compris entre 0 et 1 qu'autant que la partie entière de B serait égale à p , auquel cas la première valeur serait immédiatement périodique. On ne pourrait avoir davantage pour la première valeur de x , $x = p + \frac{1}{q + \frac{1}{A}}$, car alors l'autre serait

$$x = p + \frac{1}{q - B} \quad \text{ou} \quad x = p - \frac{1}{B - q};$$

or, pour que cette valeur fût comprise entre 0 et -1 , il faudrait d'abord que $\frac{1}{B - q}$ fût égal à p , plus une fraction. Il faudrait donc que $B - q$ fût plus petit que l'unité, ce qui exigerait que B fût égal à q , plus une fraction; d'où l'on voit que q et p devraient être respectivement égaux aux deux premiers termes de la période qui répond à B, ou aux

deux derniers de la période qui répond à A ; de sorte que, contrairement à l'hypothèse, la valeur $x = p + \frac{1}{q + \frac{1}{A}}$ serait immédiatement

périodique. On prouverait, par un raisonnement analogue, que les périodes ne sauraient être précédées d'un plus grand nombre de termes n'en faisant pas partie.

Lors donc que l'on traitera une équation numérique par la méthode de Lagrange, on sera sûr qu'il n'y a point de racines périodiques à espérer tant qu'on ne rencontrera pas une transformée ayant au moins une racine positive plus grande que l'unité, et une autre comprise entre 0 et -1 ; et si, en effet, la racine que l'on poursuit doit être périodique, ce sera tout au plus à cette transformée que les périodes commenceront.

Si l'une des racines d'une équation du second degré est non-seulement immédiatement périodique, mais encore symétrique, c'est-à-dire si les termes de la période sont égaux à égale distance des extrêmes, on aura $B=A$; de sorte que ces deux racines seront A et $-\frac{1}{A}$; l'équation sera donc

$$Ax^2 - (A^2 - 1)x - A = 0.$$

Réciproquement, toute équation du second degré de la forme

$$ax^2 - bx - a = 0$$

aura ses racines à la fois immédiatement périodiques et symétriques. En effet, en mettant tour à tour pour x l'infini et -1 , on obtient des résultats positifs, tandis qu'en faisant $x=1$ et $x=0$, on obtient des résultats négatifs; d'où l'on voit d'abord que cette équation a une racine positive plus grande que l'unité et une racine négative comprise entre 0 et -1 , et qu'ainsi ces racines sont immédiatement périodiques: de plus, cette équation ne change pas en y changeant x en $-\frac{1}{x}$; d'où il suit que, si A est une de ses racines, l'autre sera $-\frac{1}{A}$, et qu'ainsi, dans ce cas, $B=A$.

Appliquons ces généralités à l'équation du second degré

$$3x^2 - 16x + 18 = 0;$$

on lui trouve d'abord une racine positive comprise entre 3 et 4, en posant

$$x = 3 + \frac{1}{y};$$

on obtient la transformée

$$3y^2 - 2y - 3 = 0,$$

dont la forme nous apprend que les valeurs de y sont à la fois immédiatement périodiques et symétriques; en effet, en posant tour à tour

$$y = 1 + \frac{1}{z}, \quad z = 2 + \frac{1}{t}, \quad t = 1 + \frac{1}{u},$$

on obtient les transformées

$$2z^2 - 4z - 3 = 0, \quad 3t^2 - 4t - 2 = 0, \quad 3u^2 - 2u - 3 = 0.$$

L'identité entre les équations en u et en y prouve que la valeur positive de y est

$$y = 1 + \frac{1}{2 + \frac{1}{1 + \frac{1}{1 + \frac{1}{2 + \frac{1}{1 + \dots}}}}}$$

sa valeur négative sera donc

$$y = -\frac{1}{1 + \frac{1}{2 + \frac{1}{1 + \frac{1}{1 + \frac{1}{2 + \frac{1}{1 + \dots}}}}}}$$

les deux valeurs de x seront donc

$$x = 3 + \frac{1}{1 + \frac{1}{2 + \frac{1}{1 + \frac{1}{1 + \frac{1}{2 + \frac{1}{1 + \dots}}}}}}, \quad x = 3 - \frac{1}{1 + \frac{1}{2 + \frac{1}{1 + \frac{1}{1 + \frac{1}{2 + \frac{1}{1 + \dots}}}}}}$$

dont la dernière, en vertu de la formule connue

$$p - \frac{1}{q} = p - 1 + \frac{1}{1 + \frac{1}{q-1}},$$

devient

$$x = 1 + \frac{1}{1 + \frac{1}{1 + \frac{1}{1 + \frac{1}{1 + \frac{1}{2 + \frac{1}{1 + \frac{1}{1 + \frac{1}{2 + \frac{1}{1 + \dots}}}}}}}}}$$

Notes sur quelques points d'Analyse [*].

§ I. — Démonstration d'un théorème d'analyse.

THÉORÈME. « Soient Fx et fx deux fonctions quelconques données;
» on aura, quels que soient x et h ,

$$\frac{F(x+h) - Fx}{f(x+h) - fx} = \varphi(k),$$

» φ étant une fonction déterminée, et k une quantité intermédiaire
» entre x et $x+h$. »

Démonstration. Posons, en effet,

$$\frac{F(x+h) - Fx}{f(x+h) - fx} = P;$$

on en déduira

$$F(x+h) - Pf(x+h) = Fx - Pfx;$$

[*] *Annales*, tome XXI, page 182 (1830-1831). C'est par suite d'une faute d'impression qu'on y lit: *Galais*, élève à l'École normale, au lieu de *Galois*. (J. L.)

d'où l'on voit que la fonction $Fx - Pf x$ ne change pas quand on y change x en $x + h$; d'où il suit qu'à moins qu'elle ne reste constante entre ces limites, ce qui ne pourrait avoir lieu que dans des cas particuliers, cette fonction aura, entre x et $x + h$, un ou plusieurs maxima et minima. Soit k la valeur de x répondant à l'un d'eux; on aura évidemment

$$k = \psi(P),$$

ψ étant une fonction déterminée; donc on doit avoir aussi

$$P = \varphi(k),$$

φ étant une autre fonction également déterminée; ce qui démontre le théorème.

De là on peut conclure, comme corollaire, que la quantité

$$\lim. \frac{F(x+h) - Fx}{f(x+h) - fx} = \varphi(x),$$

pour $h = 0$, est nécessairement une fonction de x , ce qui démontre, à priori, l'existence des fonctions dérivées.

§ II. — Rayon de courbure des courbes dans l'espace.

Le rayon de courbure d'une courbe en l'un quelconque de ses points M est la perpendiculaire abaissée de ce point sur l'intersection du plan normal au point M avec le plan normal consécutif, comme il est aisé de s'en assurer par des considérations géométriques.

Cela posé, soit (x, y, z) un point de la courbe; on sait que le plan normal en ce point aura pour équation

$$(N) \quad (X - x) \frac{dx}{ds} + (Y - y) \frac{dy}{ds} + (Z - z) \frac{dz}{ds} = 0,$$

X, Y, Z étant les symboles des coordonnées courantes. L'intersection de ce plan normal avec le plan normal consécutif sera donnée par le système de cette équation et de la suivante

$$(I) \quad (X - x) \frac{d\left(\frac{dx}{ds}\right)}{ds} + (Y - y) \frac{d\left(\frac{dy}{ds}\right)}{ds} + (Z - z) \frac{d\left(\frac{dz}{ds}\right)}{ds} = 1,$$

attendu que

$$\left(\frac{dx}{ds}\right)^2 + \left(\frac{dy}{ds}\right)^2 + \left(\frac{dz}{ds}\right)^2 = 1.$$

Or il est aisé de voir que le plan (I) est perpendiculaire au plan (N), car on a

$$\frac{dx}{ds} d.\left(\frac{dx}{ds}\right) + \frac{dy}{ds} d.\left(\frac{dy}{ds}\right) + \frac{dz}{ds} d.\left(\frac{dz}{ds}\right) = 0;$$

donc la perpendiculaire abaissée du point (x, y, z) sur l'intersection des deux plans (N) et (I) n'est autre chose que la perpendiculaire abaissée du même point sur le plan (I). Le rayon de courbure est donc la perpendiculaire abaissée du point (x, y, z) sur le plan (I). Cette considération donne, très-simplement, les théorèmes connus sur les rayons de courbure des courbes dans l'espace.



*Articles publiés par Galois dans le Bulletin des Sciences
mathématiques de M. Férussac.*

Analyse d'un Mémoire sur la résolution algébrique des équations [*].

On appelle équations non primitives les équations qui étant, par exemple, du degré mn , se décomposent en m facteurs du degré n , au moyen d'une seule équation du degré m . Ce sont les équations de M. Gauss. Les équations primitives sont celles qui ne jouissent pas d'une pareille simplification. Je suis, à l'égard des équations primitives, parvenu aux résultats suivants :

1°. Pour qu'une équation de degré premier soit résoluble par radicaux, il faut et il suffit que deux quelconques de ses racines étant connues, les autres s'en déduisent rationnellement.

2°. Pour qu'une équation primitive du degré m soit résoluble par radicaux, il faut que $m = p^v$, p étant un nombre premier.

3°. A part les cas mentionnés ci-dessous, pour qu'une équation primitive du degré p^v soit résoluble par radicaux, il faut que deux quelconques de ses racines étant connues, les autres s'en déduisent rationnellement.

A la règle précédente échappent les cas très-particuliers qui suivent :

1°. Le cas de $m = p^v = 9, = 25$;

2°. Le cas de $m = p^v = 4$, et généralement celui où, a^α étant un diviseur de $\frac{p^v - 1}{p - 1}$, on aurait a premier, et

$$\frac{p^v - 1}{a^\alpha (p - 1)} v = p \pmod{a^\alpha}.$$

Ces cas s'écartent toutefois fort peu de la règle générale.

[*] *Bulletin*, tome XIII, page 271 (année 1830, cahier d'avril).

(J. L.)

Quand $m = 9, = 25$, l'équation devra être du genre de celles qui déterminent la trisection et la quintisection des fonctions elliptiques.

Dans le second cas, il faudra toujours que deux des racines étant connues, les autres s'en déduisent, du moins au moyen d'un nombre de radicaux, du degré p , égal au nombre des diviseurs a^α de $\frac{p^p - 1}{p - 1}$ qui sont tels que

$$\frac{p^p - 1}{a^\alpha (p - 1)} v = p \pmod{a^\alpha}, \quad a \text{ premier.}$$

Toutes ces propositions ont été déduites de la théorie des permutations.

Voici d'autres résultats qui découlent de ma théorie.

1°. Soient k le module d'une fonction elliptique, p un nombre premier donné > 3 ; pour que l'équation du degré $p + 1$, qui donne les divers modules des fonctions transformées relativement au nombre p , soit résoluble par radicaux, il faut de deux choses l'une: ou bien qu'une des racines soit rationnellement connue, ou bien que toutes soient des fonctions rationnelles les unes des autres. Il ne s'agit ici, bien entendu, que des valeurs particulières du module k . Il est évident que la chose n'a pas lieu en général. Cette règle n'a pas lieu pour $p = 5$.

2°. Il est remarquable que l'équation modulaire générale du sixième degré, correspondant au nombre 5, peut s'abaisser à une du cinquième degré dont elle est la réduite. Au contraire, pour des degrés supérieurs, les équations modulaires ne peuvent s'abaisser [*].

[*] Cette assertion n'est pas tout à fait exacte, comme Galois en avertit lui-même dans sa Lettre à M. Auguste Chevalier, qu'on trouve plus bas. Il dit en général au sujet de l'article que nous reproduisons ici: La condition que j'ai indiquée dans le *Bulletin de Férussac* pour la solubilité par radicaux est trop restreinte; il y a peu d'exceptions, mais il y en a. Quant aux équations modulaires en particulier, il déclare l'abaissement du degré $p + 1$ au degré p possible, non-seulement pour $p = 5$, mais encore pour $p = 7$ et $p = 11$; mais il en maintient l'impossibilité pour $p > 11$. (J. L.)

Note sur la résolution des équations numériques [*].

M. Legendre a le premier remarqué que, lorsqu'une équation algébrique était mise sous la forme

$$\varphi x = x,$$

où φx est une fonction de x qui croît constamment en même temps que x , il était facile de trouver la racine de cette équation immédiatement plus petite qu'un nombre donné a , si $\varphi a < a$, et la racine immédiatement plus grande que a , si $\varphi a > a$.

Pour le démontrer, on construit la courbe $y = \varphi x$ et la droite $y = x$. Soit prise une abscisse $= a$, et supposons, pour fixer les idées, $\varphi a > a$, je dis qu'il sera aisé d'obtenir la racine immédiatement supérieure à a . En effet, les racines de l'équation $\varphi x = x$ ne sont que les abscisses des points d'intersection de la droite et de la courbe, et il est clair que l'on s'approchera du point le plus voisin d'intersection, en substituant à l'abscisse a l'abscisse φa . On aura une valeur plus approchée encore en prenant $\varphi \varphi a$, puis $\varphi \varphi \varphi a$, et ainsi de suite.

Soit $Fx = 0$ une équation donnée du degré n , et $Fx = X - Y$, X et Y n'ayant que des termes positifs. Legendre met successivement l'équation sous ces deux formes

$$x = \varphi x = \sqrt[n]{\frac{X}{\left(\frac{Y}{x^n}\right)}}, \quad x = \psi x = \sqrt[n]{\frac{X}{\left(\frac{x^n}{Y}\right)}};$$

les deux fonctions φx et ψx sont toujours, comme on voit, l'une plus grande, l'autre plus petite que x . Ainsi, à l'aide de ces deux fonctions, on pourra avoir les deux racines de l'équation les plus approchées d'un nombre donné a , l'une en plus et l'autre en moins.

Mais cette méthode a l'inconvénient d'exiger, à chaque opération, l'extraction d'une racine $n^{\text{ième}}$. Voici deux formes plus commodes. Cherchons un nombre k tel, que la fonction

$$x + \frac{Fx}{kx^n}$$

[*] *Bulletin*, tome XIII, page 413 (année 1830, cahier de juin).

(J. L.)

croisse avec x , quand $x > 1$. (Il suffit, en effet, de savoir trouver les racines d'une équation qui sont plus grandes que l'unité.)

Nous aurons, pour la condition proposée,

$$1 + \frac{d \frac{X-Y}{kx^n}}{dx} > 0, \quad \text{ou bien} \quad 1 - \frac{nX - xX'}{kx^{n+1}} + \frac{nY - xY'}{kx^{n+1}} > 0;$$

or on a identiquement

$$nX - xX' > 0, \quad nY - xY' > 0;$$

il suffit donc de poser

$$\frac{nX - xX'}{kx^{n+1}} < 1 \quad \text{pour} \quad x > 1,$$

et il suffit pour cela de prendre pour k la valeur de la fonction $nX - xX'$ relative à $x = 1$.

On trouvera de même un nombre h tel, que la fonction

$$x - \frac{Fx}{hx^n}$$

croîtra avec x quand x sera > 1 , en changeant Y en X .

Ainsi, l'équation donnée pourra se mettre sous l'une des formes

$$x = x + \frac{Fx}{kx^n}, \quad x = x - \frac{Fx}{hx^n},$$

qui sont toutes deux rationnelles, et donnent pour la résolution une méthode facile.

Sur la théorie des nombres [].*

Quand on convient de regarder comme nulles toutes les quantités qui, dans les calculs algébriques, se trouvent multipliées par un nom-

[*] *Bulletin*, tome XIII, page 428 (année 1830, cahier de juin). Avec la Note suivante : Ce Mémoire fait partie des recherches de M. Galois sur la théorie des permutations et des équations algébriques. (J. L.)

bre premier donné p , et qu'on cherche, dans cette convention, les solutions d'une équation algébrique $Fx = 0$, ce que M. Gauss désigne par la notation $Fx \equiv 0$, on n'a coutume de considérer que les solutions entières de ces sortes de questions. Ayant été conduit par des recherches particulières à considérer les solutions incommensurables, je suis parvenu à quelques résultats que je crois nouveaux.

Soit une pareille équation ou congruence, $Fx = 0$, et p le module. Supposons d'abord, pour plus de simplicité, que la congruence en question n'admette aucun facteur commensurable, c'est-à-dire qu'on ne puisse pas trouver trois fonctions ϕx , ψx , χx telles que

$$\phi x \cdot \psi x = Fx + p\chi x.$$

Dans ce cas, la congruence n'admettra donc aucune racine entière, ni même aucune racine incommensurable de degré inférieur. Il faut donc regarder les racines de cette congruence comme des espèces de symboles imaginaires, puisqu'elles ne satisfont pas aux questions des nombres entiers, symboles dont l'emploi, dans le calcul, sera souvent aussi utile que celui de l'imaginaire $\sqrt{-1}$ dans l'analyse ordinaire.

C'est la classification de ces imaginaires, et leur réduction au plus petit nombre possible, qui va nous occuper.

Appelons i l'une des racines de la congruence $Fx = 0$, que nous supposerons du degré ν .

Considérons l'expression générale

$$(A) \quad a + a_1 i + a_2 i^2 + \dots + a_{\nu-1} i^{\nu-1},$$

où $a, a_1, a_2, \dots, a_{\nu-1}$ représentent des nombres entiers. En donnant à ces nombres toutes les valeurs, l'expression (A) en acquiert p^ν , qui jouissent, ainsi que je vais le faire voir, des mêmes propriétés que les nombres naturels dans la *théorie des résidus des puissances*.

Ne prenons des expressions (A) que les $p^\nu - 1$ valeurs où $a, a_1, a_2, \dots, a_{\nu-1}$ ne sont pas toutes nulles : soit α l'une de ces expressions.

Si l'on élève successivement α aux puissances $2^e, 3^e, \dots$, on aura une suite de quantités de même forme [parce que toute fonction de i peut se réduire au $(\nu - 1)^{ième}$ degré]. Donc on devra avoir $\alpha^n = 1$, n étant un certain nombre; soit n le plus petit nombre qui soit tel que l'on ait

$\alpha^n = 1$. On aura un ensemble de n expressions toutes différentes entre elles,

$$1, \alpha, \alpha^2, \alpha^3, \dots, \alpha^{n-1}.$$

Multiplions ces n quantités par une autre expression β de la même forme. Nous obtiendrons encore un nouveau groupe de quantités toutes différentes des premières, et différentes entre elles. Si les quantités (A) ne sont pas épuisées, on multipliera encore les puissances de α par une nouvelle expression γ , et ainsi de suite. On voit donc que le nombre n divisera nécessairement le nombre total des quantités (A). Ce nombre étant $p^v - 1$, on voit que n divise $p^v - 1$. De là suit encore que l'on aura

$$\alpha^{p^v-1} = 1, \quad \text{ou bien} \quad \alpha^{p^v} = \alpha.$$

Ensuite on prouvera, comme dans la théorie des nombres, qu'il y a des racines primitives α , pour lesquelles on ait précisément $p^v - 1 = n$, et qui reproduisent par conséquent, par l'élévation aux puissances, toute la suite des autres racines.

Et l'une quelconque de ces racines primitives ne dépendra que d'une congruence du degré v , congruence *irréductible*, sans quoi l'équation en i ne le serait pas non plus, parce que les racines de la congruence en i sont toutes des puissances de la racine primitive.

On voit ici cette conséquence remarquable, que toutes les quantités algébriques qui peuvent se présenter dans la théorie sont racines d'équations de la forme

$$x^{p^v} = x.$$

Cette proposition, énoncée algébriquement, est celle-ci : Étant donnés une fonction Fx et un nombre premier p , on peut poser

$$fx.Fx = x^{p^v} - x + p\varphi x,$$

fx et φx étant des fonctions entières, toutes les fois que la congruence $Fx \equiv 0 \pmod{p}$ sera irréductible.

Si l'on veut avoir toutes les racines d'une pareille congruence au moyen d'une seule, il suffit d'observer que l'on a généralement

$$(Fx)^{p^n} = F(x^{p^n})$$

et que, par conséquent, l'une des racines étant x , les autres seront

$$x^p, x^{p^2}, \dots, x^{p^{v-1}} \quad [*].$$

Il s'agit maintenant de faire voir que, réciproquement à ce que nous venons de dire, les racines de l'équation ou de la congruence $x^{p^v} = x$ dépendront toutes d'une seule congruence du degré v .

Soit en effet i une racine d'une congruence irréductible, et telle que toutes les racines de la congruence $x^{p^v} = x$ soient fonctions rationnelles de i . (Il est clair qu'ici, comme dans les équations ordinaires, cette propriété a lieu) [**].

Il est d'abord évident que le degré μ de la congruence en i ne saurait être plus petit que v , sans quoi la congruence

$$(\nu) \quad x^{p^{v-1}} - 1 = 0$$

[*] De ce que les racines de la congruence irréductible de degré v

$$Fx = 0$$

sont exprimées par la suite

$$x, x^p, x^{p^2}, \dots, x^{p^{v-1}},$$

on aurait tort de conclure que ces racines soient toujours des quantités exprimables par radicaux. Voici un exemple du contraire :

La congruence irréductible

$$x^2 + x + 1 = 0 \quad (\text{mod. } 2)$$

donne

$$x = \frac{-1 + \sqrt{-3}}{2},$$

qui se réduit à

$$\frac{0}{0}, \quad (\text{mod. } 2)$$

formule qui n'apprend rien.

[**] La proposition générale dont il s'agit ici peut s'énoncer ainsi: Étant donnée une équation algébrique, on pourra trouver une fonction rationnelle θ de toutes ses racines, de telle sorte que, réciproquement, chacune des racines s'exprime rationnellement en θ . Ce théorème était connu d'Abel, ainsi qu'on peut le voir par la première partie du Mémoire que ce célèbre géomètre a laissé sur les fonctions elliptiques.

aurait toutes ses racines communes avec la congruence

$$x^{p^\mu-1} - 1 = 0,$$

ce qui est absurde, puisque la congruence (ν) n'a pas de racines égales, comme on le voit en prenant la dérivée du premier membre. Je dis maintenant que μ ne peut non plus être $> \nu$.

En effet, s'il en était ainsi, toutes les racines de la congruence

$$x^{p^\mu} = x$$

devraient dépendre rationnellement de celles de la congruence

$$x^{p^\nu} = x.$$

Mais il est aisé de voir que si l'on a

$$i^{p^\nu} = i,$$

toute fonction rationnelle $h = fi$ donnera encore

$$(fi)^{p^\nu} = f(i^{p^\nu}) = fi, \text{ d'où } h^{p^\nu} = h.$$

Donc toutes les racines de la congruence $x^{p^\mu} = x$ lui seraient communes avec l'équation $x^{p^\nu} = x$. Ce qui est absurde.

Nous savons donc enfin que toutes les racines de l'équation ou congruence $x^{p^\nu} = x$ dépendent nécessairement d'une *seule* congruence *irréductible* de degré ν .

Maintenant, pour avoir cette congruence irréductible d'où dépendent les racines de la congruence $x^{p^\nu} = x$, la méthode la plus générale sera de délivrer d'abord cette congruence de tous les facteurs communs qu'elle pourrait avoir avec des congruences de degré inférieur et de la forme

$$x^{p^\mu} = x.$$

On obtiendra ainsi une congruence qui devra se partager en congruences irréductibles de degré ν . Et, comme on sait exprimer toutes les racines de chacune de ces congruences irréductibles au moyen d'une seule, il sera aisé de les obtenir toutes par la méthode de M. Gauss.

Le plus souvent, cependant, il sera aisé de trouver par le tâtonnement une congruence irréductible d'un degré donné ν , et l'on doit en déduire toutes les autres.

Soient, pour exemple. $p = 7$, $\nu = 3$. Cherchons les racines de la congruence

$$(1) \quad x^7 = x \pmod{7}.$$

J'observe que la congruence

$$(2) \quad i^3 = 2 \pmod{7}$$

étant irréductible, et du degré 3, toutes les racines de la congruence (1) dépendent rationnellement de celle de la congruence (2), en sorte que toutes les racines de (1) sont de la forme

$$(3) \quad a + a_1 i + a_2 i^2, \quad \text{ou bien} \quad a + a_1 \sqrt[3]{2} + a_2 \sqrt[3]{4}.$$

Il faut maintenant trouver une racine primitive, c'est-à-dire une forme de l'expression (3) qui, élevée à toutes les puissances, donne toutes les racines de la congruence

$$x^{7^3-1} = 1, \quad \text{savoir} \quad x^{2^1 \cdot 3^3 \cdot 4^3} = 1 \pmod{7},$$

et nous n'avons besoin pour cela que d'avoir une racine primitive de chaque congruence

$$x^2 = 1, \quad x^{3^2} = 1, \quad x^{4^3} = 1.$$

La racine primitive de la première est -1 ; celles de $x^{3^2} - 1 = 0$ sont données par les équations

$$x^3 = 2, \quad x^3 = 4,$$

en sorte que i est une racine primitive de $x^{3^2} = 1$.

Il ne reste qu'à trouver une racine de $x^{4^3} - 1 = 0$, ou plutôt de

$$\frac{x^{19} - 1}{x - 1} = 0,$$

et essayons pour cela si l'on ne peut pas satisfaire à la question en posant simplement $x = a + a_1 i$, au lieu de $a + a_1 i + a_2 i^2$; nous de-

vrons avoir

$$(a + a_1 i)^{19} = 1,$$

ce qui, en développant par la formule de Newton, et réduisant les puissances de a , de a_1 et de i , par les formules

$$a^{m(p-1)} = 1, \quad a_1^{m(p-1)} = 1, \quad i^3 = 2,$$

se réduit à

$$3[a - a^4 a_1^3 + (a^5 a_1^2 + a^2 a_1^5) i^2] = 1,$$

d'où, en séparant,

$$3a - 3a^4 a_1^3 = 1, \quad a^5 a_1^2 + a^2 a_1^5 = 0.$$

Ces deux dernières équations sont satisfaites en posant $a = -1$, $a_1 = 1$. Donc

$$-1 + i$$

est une racine primitive de $x^{19} = 1$. Nous avons trouvé plus haut, pour racines primitives de $x^2 = 1$ et de $x^3 = 1$, les valeurs -1 et i ; il ne reste plus qu'à multiplier entre elles les trois quantités

$$-1, \quad i, \quad -1 + i,$$

et le produit $i - i^2$ sera une racine primitive de la congruence

$$x^{7^3-1} = 1.$$

Donc ici l'expression $i - i^2$ jouit de la propriété, qu'en l'élevant à toutes les puissances, on obtiendra $7^3 - 1$ expressions différentes et de la forme

$$a + a_1 i + a_2 i^2.$$

Si nous voulons avoir la congruence de moindre degré d'où dépend notre racine primitive, il faut éliminer i entre les deux équations

$$i^3 = 2, \quad \alpha = i - i^2.$$

On obtient ainsi

$$\alpha^3 - \alpha + 2 = 0.$$

Il sera convenable de prendre pour base des imaginaires et de re-

présenter par i la racine de cette équation, en sorte que

$$(i) \quad i^3 - i + 2 = 0,$$

et l'on aura toutes les imaginaires de la forme

$$a + a_1 i + a_2 i^2,$$

en élevant i à toutes les puissances, et réduisant par l'équation (i).

Le principal avantage de la nouvelle théorie que nous venons d'exposer est de ramener les congruences à la propriété (si utile dans les équations ordinaires) d'admettre précisément autant de racines qu'il y a d'unités dans l'ordre de leur degré.

La méthode pour avoir toutes ces racines sera très-simple. Premièrement on pourra toujours préparer la congruence donnée $Fx = 0$, de manière à ce qu'elle n'ait plus de racines égales, ou, en d'autres termes, à ce qu'elle n'ait plus de facteur commun avec $F'x = 0$, et le moyen de le faire est évidemment le même que pour les équations ordinaires.

Ensuite, pour avoir les solutions entières, il suffira, ainsi que M. Libri paraît en avoir fait le premier la remarque, de chercher le plus grand facteur commun à $Fx = 0$ et à $x^{p-1} = 1$.

Si maintenant on veut avoir les solutions imaginaires du second degré, on cherchera le plus grand facteur commun à $Fx = 0$ et à $x^{p^2-1} = 1$, et, en général, les solutions de l'ordre ν seront données par le plus grand commun diviseur à $Fx = 0$ et à $x^{p^\nu-1} = 1$.

C'est surtout dans la théorie des permutations, où l'on a sans cesse besoin de varier la forme des indices, que la considération des racines imaginaires des congruences paraît indispensable. Elle donne un moyen simple et facile de reconnaître dans quel cas une équation primitive est soluble par radicaux, comme je vais essayer d'en donner en deux mots une idée.

Soit une équation algébrique $fx = 0$ de degré p^ν ; supposons que les p^ν racines soient désignées par x_k , en donnant à l'indice k les p^ν valeurs déterminées par la congruence $k^{p^\nu} = k \pmod{p}$.

Prenons une fonction quelconque rationnelle V des p^ν racines x_k . Transformons cette fonction en substituant partout à l'indice k l'in-

dice $(ak + b)^{p^r}$, a, b, r étant des constantes arbitraires satisfaisant aux conditions de $a^{p^r-1} = 1$, $b^{p^r} = b \pmod{p}$ et de r entier.

En donnant aux constantes a, b, r toutes les valeurs dont elles sont susceptibles, on obtiendra en tout $p^r(p^r - 1)$ manières de permuter les racines entre elles par des substitutions de la forme $[x_k, x_{(ak+b)^{p^r}}]$, et la fonction V admettra en général par ces substitutions $p^r(p^r - 1)$ formes différentes.

Admettons maintenant que l'équation proposée $fx = 0$ soit telle, que toute fonction des racines invariable par les $p^r(p^r - 1)$ permutations que nous venons de construire, ait pour cela même une valeur numérique rationnelle.

On remarque que, dans ces circonstances, l'équation $fx = 0$ sera soluble par radicaux, et, pour parvenir à cette conséquence, il suffit d'observer que la valeur substituée à k , dans chaque indice, peut se mettre sous les trois formes

$$(ak + b)^{p^r} = [a(k + b^1)]^{p^r} = a^1 k^{p^r} + b'' = a'(k + b')^{p^r}.$$

Les personnes habituées à la théorie des équations le verront sans peine.

Cette remarque aurait peu d'importance si je n'étais parvenu à démontrer que, réciproquement, une équation primitive ne saurait être soluble par radicaux, à moins de satisfaire aux conditions que je viens d'énoncer. (J'excepte les équations du neuvième et du vingt-cinquième degré.)

Ainsi, pour chaque nombre de la forme p^r , on pourra former un groupe de permutations tel, que toute fonction des racines invariable par ces permutations devra admettre une valeur rationnelle quand l'équation de degré p^r sera primitive et soluble par radicaux.

D'ailleurs, il n'y a que les équations d'un pareil degré p^r qui soient à la fois primitives et solubles par radicaux.

Le théorème général que je viens d'énoncer précise et développe les conditions que j'avais données dans le *Bulletin* du mois d'avril. Il indique le moyen de former une fonction des racines dont la valeur sera rationnelle, toutes les fois que l'équation primitive de degré p^r sera soluble par radicaux, et mène, par conséquent, aux caractères de réso-

lubilité de ces équations, par des calculs sinon praticables, du moins qui sont possibles en théorie.

Il est à remarquer que, dans le cas où $\nu = 1$, les diverses valeurs de k ne sont autre chose que la suite des nombres entiers. Les substitutions de la forme $(x_k, x_{a\dot{k}+b})$ seront au nombre de $p(p-1)$.

La fonction qui, dans le cas des équations solubles par radicaux, doit avoir une valeur rationnelle, dépendra, en général, d'une équation de degré $1.2.3\dots(p-2)$, à laquelle il faudra, par conséquent, appliquer la méthode des racines rationnelles.



Lettre de Galois à M. Auguste Chevalier [*].

(Insérée en 1832 dans la *Revue encyclopédique*, numéro de septembre, page 568.)

Mon cher ami,

J'ai fait en analyse plusieurs choses nouvelles.

Les unes concernent la théorie des équations; les autres, les fonctions intégrales.

Dans la théorie des équations, j'ai recherché dans quels cas les équations étaient résolubles par des radicaux, ce qui m'a donné occasion d'approfondir cette théorie, et de décrire toutes les transformations possibles sur une équation, lors même qu'elle n'est pas soluble par radicaux.

On pourra faire avec tout cela trois Mémoires.

Le premier est écrit, et, malgré ce qu'en a dit Poisson, je le maintiens, avec les corrections que j'y ai faites.

Le second contient des applications assez curieuses de la théorie des équations. Voici le résumé des choses les plus importantes :

1°. D'après les propositions II et III du premier Mémoire, on voit une grande différence entre adjoindre à une équation une des racines d'une équation auxiliaire ou les adjoindre toutes.

Dans les deux cas, le groupe de l'équation se partage par l'adjonction en groupes tels, que l'on passe de l'un à l'autre par une même substitution; mais la condition que ces groupes aient les mêmes substitutions n'a lieu certainement que dans le second cas. Cela s'appelle *la décomposition propre*.

En d'autres termes, quand un groupe G en contient un autre H , le groupe G peut se partager en groupes, que l'on obtient chacun en opérant sur les permutations de H une même substitution; en sorte

[*] Écrite, on se le rappelle, la veille de la mort de l'auteur.

(J. L.)

que

$$G = H + HS + HS' + \dots$$

Et aussi il peut se décomposer en groupes qui ont tous les mêmes substitutions, en sorte que

$$G = H + TH + T'H + \dots$$

Ces deux genres de décompositions ne coïncident pas ordinairement. Quand ils coïncident, la décomposition est dite *propre*.

Il est aisé de voir que, quand le groupe d'une équation n'est susceptible d'aucune décomposition propre, on aura beau transformer cette équation, les groupes des équations transformées auront toujours le même nombre de permutations.

Au contraire, quand le groupe d'une équation est susceptible d'une décomposition propre, en sorte qu'il se partage en M groupes de N permutations, on pourra résoudre l'équation donnée au moyen de deux équations : l'une aura un groupe de M permutations, l'autre un de N permutations.

Lors donc qu'on aura épuisé sur le groupe d'une équation tout ce qu'il y a de décompositions propres possibles sur ce groupe, on arrivera à des groupes qu'on pourra transformer, mais dont les permutations seront toujours en même nombre.

Si ces groupes ont chacun un nombre premier de permutations, l'équation sera soluble par radicaux; sinon, non.

Le plus petit nombre de permutations que puisse avoir un groupe indécomposable, quand ce nombre n'est pas premier, est 5.4.3.

2°. Les décompositions les plus simples sont celles qui ont lieu par la méthode de M. Gauss.

Comme ces décompositions sont évidentes, même dans la forme actuelle du groupe de l'équation, il est inutile de s'arrêter longtemps sur cet objet.

Quelles décompositions sont praticables sur une équation qui ne se simplifie pas par la méthode de M. Gauss?

J'ai appelé *primitives* les équations qui ne peuvent se simplifier par la méthode de M. Gauss; non que ces équations soient réellement indécomposables, puisqu'elles peuvent même se résoudre par radicaux.

Comme lemme à la théorie des équations primitives solubles par radicaux, j'ai mis en juin 1830, dans le *Bulletin de Férussac*, une analyse sur les imaginaires de la théorie des nombres.

On trouvera ci-jointe [*] la démonstration des théorèmes suivants :

1°. Pour qu'une équation primitive soit soluble par radicaux, elle doit être du degré p^n , p étant premier.

2°. Toutes les permutations d'une pareille équation sont de la forme

$$x_{k,l,m,\dots} | x_{ak+bl+cm+\dots+h}, a'k+b'l+c'm+\dots+h', a''k+\dots, \dots,$$

k, l, m, \dots étant ν indices, qui, prenant chacun p valeurs, indiquent toutes les racines. Les indices sont pris suivant le module p ; c'est-à-dire que la racine sera la même quand on ajoutera à l'un des indices un multiple de p .

Le groupe qu'on obtient en opérant toutes les substitutions de cette forme linéaire contient, en tout,

$$p^n (p^n - 1)(p^n - p) \dots (p^n - p^{n-1}) \text{ permutations.}$$

Il s'en faut que dans cette généralité les équations qui lui répondent soient solubles par radicaux.

La condition que j'ai indiquée dans le *Bulletin de Férussac* pour que l'équation soit soluble par radicaux est trop restreinte; il y a peu d'exceptions, mais il y en a.

La dernière application de la théorie des équations est relative aux équations modulaires des fonctions elliptiques.

On sait que le groupe de l'équation qui a pour racines les sinus de l'amplitude des $p^2 - 1$ divisions d'une période est celui-ci :

$$x_{k,l} \quad x_{ak+bl} | ck+dl;$$

par conséquent l'équation modulaire correspondante aura pour groupe

$$\frac{x_k}{l}, \quad \frac{x_{ak+bl}}{ck+dl},$$

dans laquelle $\frac{k}{l}$ peut avoir les $p + 1$ valeurs

$$\infty, 0, 1, 2, \dots, p - 1.$$

[*] Galois parle des manuscrits, jusqu'ici inédits, que nous publions. (J. L.)

Ainsi, en convenant que k peut être infini, on peut écrire simplement

$$x_k, \quad x_{\frac{ak+b}{ck+d}}.$$

En donnant à a, b, c, d toutes les valeurs, on obtient

$$(p+1)p(p-1) \text{ permutations.}$$

Or ce groupe se décompose *proprement* en deux groupes, dont les substitutions sont

$$x_k, \quad x_{\frac{ak+b}{ck+d}},$$

$ad - bc$ étant un résidu quadratique de p .

Le groupe ainsi simplifié est de

$$(p+1)p \cdot \frac{p-1}{2} \text{ permutations.}$$

Mais il est aisé de voir qu'il n'est plus décomposable proprement, à moins que $p = 2$, ou $p = 3$.

Ainsi, de quelque manière que l'on transforme l'équation, son groupe aura toujours le même nombre de permutations.

Mais il est curieux de savoir si le degré peut s'abaisser.

Et d'abord il ne peut s'abaisser plus bas que p , puisqu'une équation de degré moindre que p ne peut avoir p pour facteur dans le nombre des permutations de son groupe.

Voyons donc si l'équation de degré $p+1$, dont les racines x_k s'indiquent en donnant à k toutes les valeurs, y compris l'infini, et dont le groupe a pour substitutions

$$x_k, \quad x_{\frac{ak+b}{ck+d}},$$

$ad - bc$ étant un carré, peut s'abaisser au degré p .

Or il faut pour cela que le groupe se décompose (improprement, s'entend) en p groupes de $(p+1) \frac{p-1}{2}$ permutations chacun.

Soient o et ∞ deux lettres conjointes dans l'un de ces groupes. Les substitutions qui ne font pas changer o et ∞ de place seront de la forme

$$x_k, \quad x_{m^2 k}.$$

Donc si M est la lettre conjointe de 1 , la lettre conjointe de m^2 sera $m^2 M$. Quand M est un carré, on aura donc $M^2 = 1$. Mais cette simplification ne peut avoir lieu que pour $p = 5$.

Pour $p = 7$ on trouve un groupe de $(p + 1) \frac{p-1}{2}$ permutations, où

$$\infty \ 1 \ 2 \ 4$$

ont respectivement pour lettres conjointes

$$0 \ 3 \ 6 \ 5.$$

Ce groupe a ses substitutions de la forme

$$x_k, \quad x_{a \frac{k-b}{k-c}},$$

b étant la lettre conjointe de c , et a une lettre qui est résidu ou non résidu en même temps que c .

Pour $p = 11$, les mêmes substitutions auront lieu avec les mêmes notations,

$$\infty \ 1 \ 3 \ 4 \ 5 \ 9$$

ayant respectivement pour conjointes

$$0 \ 2 \ 6 \ 8 \ 10 \ 7.$$

Ainsi, pour les cas de $p = 5, 7, 11$, l'équation modulaire s'abaisse au degré p .

En toute rigueur, cette réduction n'est pas possible dans les cas plus élevés.

Le troisième Mémoire concerne les intégrales.

On sait qu'une somme de termes d'une même fonction elliptique se réduit toujours à un seul terme, plus des quantités algébriques ou logarithmiques.

Il n'y a pas d'autres fonctions pour lesquelles cette propriété ait lieu.

Mais des propriétés absolument semblables y suppléent dans toutes les intégrales de fonctions algébriques.

On traite à la fois toutes les intégrales dont la différentielle est une fonction de la variable et d'une même fonction irrationnelle de la variable, que cette irrationnelle soit ou ne soit pas un radical, qu'elle s'exprime ou ne s'exprime pas par des radicaux.

On trouve que le nombre des périodes distinctes de l'intégrale la plus générale relative à une irrationnelle donnée est toujours un nombre pair.

Soit $2n$ ce nombre, on aura le théorème suivant :

Une somme quelconque de termes se réduit à n termes, plus des quantités algébriques et logarithmiques.

Les fonctions de première espèce sont celles pour lesquelles la partie algébrique et logarithmique est nulle.

Il y en a n distinctes.

Les fonctions de seconde espèce sont celles pour lesquelles la partie complémentaire est purement algébrique.

Il y en a n distinctes.

On peut supposer que les différentielles des autres fonctions ne soient jamais infinies qu'une fois pour $x=a$, et, de plus, que leur partie complémentaire se réduise à un seul logarithme, $\log P$, P étant une quantité algébrique. En désignant par $\Pi(x, a)$ ces fonctions, on aura le théorème

$$\Pi(x, a) - \Pi(a, x) = \Sigma \varphi a \psi x,$$

φa et ψx étant des fonctions de première et de seconde espèce.

On en déduit, en appelant $\Pi(a)$ et ψ les périodes de $\Pi(x, a)$ et ψx relatives à une même révolution de x ,

$$\Pi(a) = \Sigma \psi \times \varphi a.$$

Ainsi les périodes des fonctions de troisième espèce s'expriment toujours en fonctions de première et de seconde espèce.

On peut en déduire aussi des théorèmes analogues au théorème de Legendre

$$FE' + EF' - FF' = \frac{\pi}{2}.$$

La réduction des fonctions de troisième espèce à des intégrales définies, qui est la plus belle découverte de M. Jacobi, n'est pas praticable, hors le cas des fonctions elliptiques.

La multiplication des fonctions intégrales par un nombre entier est toujours possible, comme l'addition, au moyen d'une équation de

degré n dont les racines sont les valeurs à substituer dans l'intégrale pour avoir les termes réduits.

L'équation qui donne la division des périodes en p parties égales est du degré $p^{2n} - 1$. Son groupe a en tout

$$(p^{2n} - 1)(p^{2n} - p) \dots (p^{2n} - p^{2n-1}) \text{ permutations.}$$

L'équation qui donne la division d'une somme de n termes en p parties égales est du degré p^{2n} . Elle est soluble par radicaux.

De la transformation. On peut d'abord, en suivant des raisonnements analogues à ceux qu'Abel a consignés dans son dernier Mémoire, démontrer que si, dans une même relation entre des intégrales, on a les deux fonctions

$$\int \Phi(x, X) dx, \quad \int \Psi(y, Y) dy,$$

la dernière intégrale ayant $2n$ périodes, il sera permis de supposer que y et Y s'expriment moyennant une seule équation de degré n en fonction de x et de X .

D'après cela on peut supposer que les transformations aient lieu constamment entre deux intégrales seulement, puisqu'on aura évidemment, en prenant une fonction quelconque rationnelle de y et de Y ,

$$\Sigma \int f(y, Y) dy = \int F(x, X) dx + \text{une quant. alg. et log.}$$

Il y aurait sur cette équation des réductions évidentes dans le cas où les intégrales de l'un et de l'autre membre n'auraient pas toutes deux le même nombre de périodes.

Ainsi nous n'avons à comparer que des intégrales qui aient toutes deux le même nombre de périodes.

On démontrera que le plus petit degré d'irrationalité de deux paires d'intégrales ne peut être plus grand pour l'une que pour l'autre.

On fera voir ensuite qu'on peut toujours transformer une intégrale donnée en une autre dans laquelle une période de la première soit divisée par le nombre premier p , et les $2n - 1$ autres restent les mêmes.

Il ne restera donc à comparer que des intégrales où les périodes seront les mêmes de part et d'autre, et telles par conséquent que n termes de l'une s'expriment sans autre équation qu'une seule du degré n , au moyen de ceux de l'autre, et réciproquement. Ici nous ne savons rien.

Tu sais, mon cher Auguste, que ces sujets ne sont pas les seuls que j'aie explorés. Mes principales méditations, depuis quelque temps, étaient dirigées sur l'application à l'analyse transcendante de la théorie de l'ambiguïté. Il s'agissait de voir à priori, dans une relation entre des quantités ou fonctions transcendantes, quels échanges on pouvait faire, quelles quantités on pouvait substituer aux quantités données, sans que la relation pût cesser d'avoir lieu. Cela fait reconnaître de suite l'impossibilité de beaucoup d'expressions que l'on pourrait chercher. Mais je n'ai pas le temps, et mes idées ne sont pas encore bien développées sur ce terrain, qui est immense.

Tu feras imprimer cette Lettre dans la *Revue encyclopédique*.

Je me suis souvent hasardé dans ma vie à avancer des propositions dont je n'étais pas sûr; mais tout ce que j'ai écrit là est depuis bientôt un an dans ma tête, et il est trop de mon intérêt de ne pas me tromper pour qu'on me soupçonne d'avoir énoncé des théorèmes dont je n'aurais pas la démonstration complète.

Tu prieras publiquement Jacobi ou Gauss de donner leur avis, non sur la vérité, mais sur l'importance des théorèmes.

Après cela, il y aura, j'espère, des gens qui trouveront leur profit à déchiffrer tout ce gâchis.

Je t'embrasse avec effusion.

E. GALOIS.

Le 29 mai 1832.

Note de M. LIOUVILLE.

En insérant dans leur Recueil la Lettre qu'on vient de lire[*], les éditeurs de la *Revue encyclopédique* annonçaient qu'ils publieraient prochainement les manuscrits laissés par Galois. Mais cette promesse

[*] Nous avons déjà dit qu'une Notice nécrologique sur Galois (par M. Auguste Chevalier) a paru dans le même numéro (page 774).

n'a pas été tenue. M. Auguste Chevalier avait cependant préparé le travail. Il nous a remis et on trouvera dans les feuilles qui vont suivre :

1°. Un Mémoire entier sur les conditions de résolubilité des équations par radicaux, avec l'application aux équations de degré premier ;

2°. Un fragment d'un second Mémoire où Galois traite de la théorie générale des équations qu'il nomme *primitives*.

Nous avons conservé la plupart des notes que M. Auguste Chevalier avait jointes aux Mémoires dont nous venons de parler. Ces notes sont toutes marquées des initiales A. Ch. Les notes non signées sont de Galois lui-même.

Nous compléterons cette publication par quelques autres morceaux extraits des papiers de Galois, et qui, sans avoir une grande importance, pourront cependant encore être lus avec intérêt par les géomètres.



MÉMOIRE

Sur les conditions de résolubilité des équations par radicaux.

Le Mémoire ci-joint [*] est extrait d'un ouvrage que j'ai eu l'honneur de présenter à l'Académie il y a un an. Cet ouvrage n'ayant pas été compris, les propositions qu'il renferme ayant été révoquées en doute, j'ai dû me contenter de donner, sous forme synthétique, les principes généraux, et une *seule* application de ma théorie. Je supplie mes juges de lire du moins avec attention ce peu de pages.

On trouvera ici une *condition* générale à laquelle *satisfait toute équation soluble par radicaux*, et qui réciproquement assure leur résolubilité. On en fait l'application seulement aux équations dont le degré est un nombre premier. Voici le théorème donné par notre analyse :

« Pour qu'une équation de degré premier, qui n'a pas de diviseurs commensurables, soit soluble par radicaux, il *faut* et il *suffit* que toutes les racines soient des fonctions rationnelles de deux quelconques d'entre elles. »

Les autres applications de la théorie sont elles-mêmes autant de théories particulières. Elles nécessitent d'ailleurs l'emploi de la théorie des nombres, et d'un algorithme particulier : nous les réservons pour une autre occasion. Elles sont en partie relatives aux équations modulaires de la théorie des fonctions elliptiques, que nous démontrons ne pouvoir se résoudre par radicaux.

Ce 16 janvier 1831.

E. GALOIS.

[*] J'ai jugé convenable de placer en tête de ce Mémoire la préface qu'on va lire, bien que je l'aie trouvée biffée dans le manuscrit.

A. CH.

PRINCIPES.

Je commencerai par établir quelques définitions et une suite de lemmes qui sont tous connus.

Définitions. Une équation est dite réductible quand elle admet des diviseurs rationnels; irréductible dans le cas contraire.

Il faut ici expliquer ce qu'on doit entendre par le mot *rationnel*, car il se représentera souvent.

Quand l'équation a *tous* ses coefficients numériques et rationnels, cela veut dire simplement que l'équation peut se décomposer en facteurs qui aient leurs coefficients numériques et rationnels.

Mais quand les coefficients d'une équation ne seront pas *tous* numériques et rationnels, alors il faudra entendre par diviseur rationnel un diviseur dont les coefficients s'exprimeraient en fonction rationnelle des coefficients de la proposée, en général par quantité rationnelle, une quantité qui s'exprime en fonction rationnelle des coefficients de la proposée.

Il y a plus : on pourra convenir de regarder comme rationnelle toute fonction rationnelle d'un certain nombre de quantités déterminées, supposées connues à priori. Par exemple, on pourra choisir une certaine racine d'un nombre entier, et regarder comme rationnelle toute fonction rationnelle de ce radical.

Lorsque nous conviendrons de regarder ainsi comme connues de certaines quantités, nous dirons que nous les *adjoignons* à l'équation qu'il s'agit de résoudre. Nous dirons que ces quantités sont *adjointes* à l'équation.

Cela posé, nous appellerons *rationnelle* toute quantité qui s'exprimera en fonction rationnelle des coefficients de l'équation et d'un certain nombre de quantités *adjointes* à l'équation et convenues arbitrairement.

Quand nous nous servirons d'équations auxiliaires, elles seront rationnelles, si leurs coefficients sont rationnels en notre sens.

On voit, au surplus, que les propriétés et les difficultés d'une équation peuvent être tout à fait différentes suivant les quantités qui lui sont adjointes. Par exemple, l'adjonction d'une quantité peut rendre réductible une équation irréductible.

Ainsi, quand on adjoint à l'équation

$$\frac{x^n - 1}{x - 1} = 0, \quad \text{où } n \text{ est premier,}$$

une racine d'une des équations auxiliaires de M. Gauss, cette équation se décompose en facteurs, et devient par conséquent réductible.

Les substitutions sont le passage d'une permutation à l'autre.

La permutation d'où l'on part pour indiquer les substitutions est toute arbitraire, quand il s'agit de fonctions; car il n'y a aucune raison pour que, dans une fonction de plusieurs lettres, une lettre occupe un rang plutôt qu'un autre.

Cependant, comme on ne peut guère se former l'idée d'une substitution sans se former celle d'une permutation, nous ferons dans le langage un emploi fréquent des permutations, et nous ne considérerons les substitutions que comme le passage d'une permutation à une autre.

Quand nous voudrions grouper des substitutions, nous les ferons toutes provenir d'une même permutation.

Comme il s'agit toujours de questions où la disposition primitive des lettres n'influe en rien dans les groupes que nous considérerons, on devra avoir les mêmes substitutions, quelle que soit la permutation d'où l'on sera parti. Donc, si dans un pareil groupe on a les substitutions S et T, on est sûr d'avoir la substitution ST.

Telles sont les définitions que nous avons cru devoir rappeler.

LEMME I. « Une équation irréductible ne peut avoir aucune racine commune avec une équation rationnelle, sans la diviser. »

Car le plus grand commun diviseur entre l'équation irréductible et l'autre équation, sera encore rationnel; donc, etc.

LEMME II. « Étant donnée une équation quelconque, qui n'a pas de racines égales, dont les racines sont a, b, c, \dots , on peut toujours former une fonction V des racines, telle qu'aucune des valeurs que l'on obtient en permutant dans cette fonction les racines de toutes manières, ne soient égales. »

Par exemple, on peut prendre

$$V = Aa + Bb + Cc + \dots,$$

A, B, C étant des nombres entiers convenablement choisis.

LEMME III. « La fonction V étant choisie comme il est indiqué » dans l'article précédent, elle jouira de cette propriété, que toutes » les racines de l'équation proposée s'exprimeront rationnellement en fonction de V . »

En effet, soit

$$V = \varphi(a, b, c, d, \dots),$$

ou bien

$$V - \varphi(a, b, c, d, \dots) = 0.$$

Multiplions entre elles toutes les équations semblables, que l'on obtient en permutant dans celles-ci toutes les lettres, la première seulement restant fixe; il viendra une expression suivante :

$$[V - \varphi(a, b, c, d, \dots)][V - \varphi(a, c, b, d, \dots)][V - \varphi(a, b, d, c, \dots)] \dots,$$

symétrique en b, c, d, \dots , laquelle pourra par conséquent s'écrire en fonction de a . Nous aurons donc une équation de la forme

$$F(V, a) = 0.$$

Or je dis que de là on peut tirer la valeur de a . Il suffit pour cela de chercher la solution commune à cette équation et à la proposée. Cette solution est la seule commune, car on ne peut avoir, par exemple,

$$F(V, b) = 0,$$

cette équation ayant un facteur commun avec l'équation semblable, sans quoi l'une des fonctions $\varphi(a, \dots)$ serait égale à l'une des fonctions $\varphi(b, \dots)$; ce qui est contre l'hypothèse.

Il suit de là que a s'exprime en fonction rationnelle de V , et il en est de même des autres racines.

Cette proposition [*] est citée sans démonstration par Abel, dans le Mémoire posthume sur les fonctions elliptiques.

LEMME IV. « Supposons que l'on ait formé l'équation en V , et

[*] Il est remarquable, que de cette proposition on peut conclure que toute équation dépend d'une équation auxiliaire telle, que toutes les racines de cette nouvelle

» que l'on ait pris l'un de ses facteurs irréductibles, en sorte que V
 » soit racine d'une équation irréductible. Soient V, V', V'', \dots les ra-
 » cines de cette équation irréductible. Si $a = f(V)$ est une des racines
 » de la proposée, $f(V')$ de même sera une racine de la proposée. »

En effet, en multipliant entre eux tous les facteurs de la forme $V - \varphi(a, b, c, \dots, d)$, où l'on aura opéré sur les lettres toutes les permutations possibles, on aura une équation rationnelle en V , laquelle se trouvera nécessairement divisible par l'équation en question; donc V' doit s'obtenir par l'échange des lettres dans la fonction V . Soit $F(V, a) = 0$ l'équation qu'on obtient en permutant dans V toutes les lettres, hors la première. On aura donc $F(V', b) = 0$, b pouvant être égal à a , mais étant certainement l'une des racines de l'équation proposée; par conséquent, de même que de la proposée et de $F(V, a) = 0$ est résulté $a = f(V)$, de même il résultera de la proposée et de $F(V', b) = 0$ combinées, la suivante $b = f(V')$.

PROPOSITION I.

THÉORÈME. « Soit une équation donnée, dont a, b, c, \dots sont les
 » m racines. Il y aura toujours un groupe de permutations des lettres
 » a, b, c, \dots qui jouira de la propriété suivante :

- » 1°. Que toute fonction des racines, invariable [*] par les substi-
 » tutions de ce groupe, soit rationnellement connue ;
- » 2°. Réciproquement, que toute fonction des racines, déterminable
 » rationnellement, soit invariable par les substitutions. »

équation soient des fonctions rationnelles les unes des autres; car l'équation auxiliaire en V est dans ce cas.

Au surplus, cette remarque est purement curieuse. En effet, une équation qui a cette propriété n'est pas, en général, plus facile à résoudre qu'une autre.

[*] Nous appelons ici invariable non-seulement une fonction dont la forme est invariable par les substitutions des racines entre elles, mais encore celle dont la valeur numérique ne varierait pas par ces substitutions. Par exemple, si $Fx = 0$ est une équation, Fx est une fonction des racines qui ne varie par aucune permutation.

Quand nous disons qu'une fonction est rationnellement connue, nous voulons dire que sa valeur numérique est exprimable en fonction rationnelle des coefficients de l'équation et des quantités adjointes.

2°. *Réciproquement.* Si une fonction F est déterminable rationnellement, et que l'on pose $F = \psi V$, on devra avoir

$$\psi V = \psi V' = \psi V'' = \dots = \psi V^{(n-1)},$$

puisque l'équation en V n'a pas de diviseur commensurable et que V satisfait à l'équation $F = \psi V$, F étant une quantité rationnelle. Donc la fonction F sera nécessairement invariable par les substitutions du groupe écrit ci-dessus.

Ainsi, ce groupe jouit de la double propriété dont il s'agit dans le théorème proposé. Le théorème est donc démontré.

Nous appellerons groupe de l'équation le groupe en question.

Scolie 1. Il est évident que dans le groupe de permutations dont il s'agit ici, la disposition des lettres n'est point à considérer, mais seulement les substitutions de lettres par lesquelles on passe d'une permutation à l'autre.

Ainsi l'on peut se donner arbitrairement une première permutation, pourvu que les autres permutations s'en déduisent toujours par les mêmes substitutions de lettres. Le nouveau groupe ainsi formé jouira évidemment des mêmes propriétés que le premier, puisque dans le théorème précédent, il ne s'agit que des substitutions que l'on peut faire dans les fonctions.

Scolie 2. Les substitutions sont indépendantes même du nombre des racines.

PROPOSITION II.

THÉOREME [*]. « Si l'on adjoint à une équation donnée la racine r

[*] Dans l'énoncé du théorème, après ces mots : « la racine r d'une équation auxiliaire irréductible, » Galois avait mis d'abord ceux-ci : « de degré p premier, » qu'il a effacés plus tard. De même, dans la démonstration, au lieu de « r, r', r'', \dots étant d'autres valeurs de r , » la rédaction primitive portait : « r, r', r'', \dots étant les diverses valeurs de r . » Enfin on trouve à la marge du manuscrit la note suivante de l'auteur :

« Il y a quelque chose à compléter dans cette démonstration. Je n'ai pas le temps. »

Cette ligne a été jetée avec une grande rapidité sur le papier ; circonstance qui, jointe aux mots : « Je n'ai pas le temps », me fait penser que Galois a relu son Mémoire pour le corriger avant d'aller sur le terrain.

A. CH.

» d'une équation auxiliaire irréductible, 1° il arrivera de deux choses
 » l'une : ou bien le groupe de l'équation ne sera pas changé, ou bien
 » il se partagera en p groupes appartenant chacun à l'équation pro-
 » posée respectivement quand on lui adjoint chacune des racines de
 » l'équation auxiliaire; 2° ces groupes jouiront de la propriété re-
 » marquable, que l'on passera de l'un à l'autre en opérant dans toutes
 » les permutations du premier une même substitution de lettres. »

1°. Si, après l'adjonction de r , l'équation en V , dont il est question plus haut, reste irréductible, il est clair que le groupe de l'équation ne sera pas changé. Si, au contraire, elle se réduit, alors l'équation en V se décomposera en p facteurs, tous de même degré et de la forme

$$f(V, r) \times f(V, r') \times f(V, r'') \times \dots,$$

r, r', r'', \dots étant d'autres valeurs de r . Ainsi le groupe de l'équation proposée se décomposera aussi en groupes chacun d'un même nombre de permutations, puisqu'à chaque valeur de V correspond une permutation. Ces groupes seront respectivement ceux de l'équation proposée, quand on lui adjoindra successivement r, r', r'', \dots

2°. Nous avons vu plus haut que toutes les valeurs de V étaient des fonctions rationnelles les unes des autres. D'après cela, supposons que V étant une racine de $f(V, r) = 0$, $F(V)$ en soit une autre; il est clair que de même si V' est une racine de $f(V, r') = 0$, $F(V')$ en sera une autre; car l'on aura

$$f[F(V), r] = \text{une fonction divisible par } f(V, r).$$

Donc (*lemme 1*)

$$f[F(V'), r'] = \text{une fonction divisible par } f(V', r').$$

Cela posé, je dis que l'on obtient le groupe relatif à r' en opérant partout dans le groupe relatif à r une même substitution de lettres.

En effet, si l'on a, par exemple,

$$\varphi_\mu F(V) = \varphi_\nu(V),$$

on aura encore (*lemme 1*)

$$\varphi_\mu F(V') = \varphi_\nu(V').$$

Donc, pour passer de la permutation $[F(V)]$ à la permutation $[F(V')]$, il faut faire la même substitution que pour passer de la permutation (V) à la permutation (V') .

Le théorème est donc démontré.

PROPOSITION III.

THÉORÈME. « Si l'on adjoint à une équation *toutes* les racines d'une
» équation auxiliaire, les groupes dont il est question dans le théo-
» rème II jouiront de plus de cette propriété, que les substitutions sont
» les mêmes dans chaque groupe. »

On trouvera la démonstration [*].

PROPOSITION IV.

THÉORÈME. « Si l'on adjoint à une équation la valeur *numérique*
» d'une certaine fonction de ses racines, le groupe de l'équation
» s'abaissera de manière à n'avoir plus d'autres permutations que
» celles par lesquelles cette fonction est invariable. »

En effet, d'après la proposition I, toute fonction connue doit être invariable par les permutations du groupe de l'équation.

[*] Dans le manuscrit, l'énoncé du théorème qu'on vient de lire se trouve en marge et en remplace un autre que Galois avait écrit avec sa démonstration sous le même titre : *Proposition III*. Voici le texte primitif : THÉORÈME. « Si l'équation en r est de la forme
» $r^p = A$, et que les racines $p^{\text{ièmes}}$ de l'unité se trouvent au nombre des quantités précé-
» demment adjointes, les p groupes dont il est question dans le théorème II jouiront
» de plus de cette propriété, que les substitutions de lettres par lesquelles on passe
» d'une permutation à une autre dans chaque groupe soient les mêmes pour tous les
» groupes. » En effet, dans ce cas, il revient au même d'adjoindre à l'équation telle ou
telle valeur de r . Par conséquent, ses propriétés doivent être les mêmes après l'adjonction de telle ou telle valeur. Ainsi son groupe doit être le même quant aux substitutions (Proposition I, scolie). Donc, etc.

Tout cela est effacé avec soin ; le nouvel énoncé porte la date 1832, et montre, par la manière dont il est écrit, que l'auteur était extrêmement pressé, ce qui confirme l'assertion que j'ai avancée dans la note précédente.

A. CH.

PROPOSITION V.

PROBLÈME. « Dans quels cas une équation est-elle soluble par de » simples radicaux? »

J'observerai d'abord que, pour résoudre une équation, il faut successivement abaisser son groupe jusqu'à ne contenir plus qu'une seule permutation. Car, quand une équation est résolue, une fonction quelconque de ses racines est connue, même quand elle n'est invariable par aucune permutation.

Cela posé, cherchons à quelle condition doit satisfaire le groupe d'une équation, pour qu'il puisse s'abaisser ainsi par l'adjonction de quantités radicales.

Suivons la marche des opérations possibles dans cette solution, en considérant comme opérations distinctes l'extraction de chaque racine de degré premier.

Adjoignons à l'équation le premier radical extrait dans la solution. Il pourra arriver deux cas : ou bien, par l'adjonction de ce radical, le groupe des permutations de l'équation sera diminué; ou bien, cette extraction de racine n'étant qu'une simple préparation, le groupe restera le même.

Toujours sera-t-il qu'après un certain nombre *fini* d'extractions de racines, le groupe devra se trouver diminué, sans quoi l'équation ne serait pas soluble.

Si, arrivé à ce point, il y avait plusieurs manières de diminuer le groupe de l'équation proposée par une simple extraction de racine, il faudrait, pour ce que nous allons dire, considérer seulement un radical du degré le moins haut possible parmi tous les simples radicaux, qui sont tels que la connaissance de chacun d'eux diminue le groupe de l'équation.

Soit donc p le nombre premier qui représente ce degré minimum, en sorte que par une extraction de racine de degré p , on diminue le groupe de l'équation.

Nous pouvons toujours supposer, du moins pour ce qui est relatif au groupe de l'équation, que parmi les quantités adjointes précédemment à l'équation se trouve une racine $p^{\text{ième}}$ de l'unité, α . Car, comme

cette expression s'obtient par des extractions de racines de degré inférieur à p , sa connaissance n'altérera en rien le groupe de l'équation.

Par conséquent, d'après les théorèmes II et III, le groupe de l'équation devra se décomposer en p groupes jouissant les uns par rapport aux autres de cette double propriété : 1° Que l'on passe de l'un à l'autre par une seule et même substitution ; 2° que tous contiennent les mêmes substitutions.

Je dis réciproquement, que si le groupe de l'équation peut se partager en p groupes qui jouissent de cette double propriété, on pourra, par une simple extraction de racine $p^{\text{ième}}$, et par l'adjonction de cette racine $p^{\text{ième}}$, réduire le groupe de l'équation à l'un de ces groupes partiels.

Prenons, en effet, une fonction des racines qui soit invariable pour toutes les substitutions de l'un des groupes partiels, et varie pour toute autre substitution. (Il suffit, pour cela, de choisir une fonction symétrique des diverses valeurs que prend, par toutes les permutations de l'un des groupes partiels, une fonction qui n'est invariable pour aucune substitution.)

Soit θ cette fonction des racines.

Opérons sur la fonction θ une des substitutions du groupe total qui ne lui sont pas communes avec les groupes partiels. Soit θ_1 le résultat. Opérons sur la fonction θ_1 la même substitution, et soit θ_2 le résultat, et ainsi de suite.

Comme p est un nombre premier, cette suite ne pourra s'arrêter qu'au terme θ_{p-1} , ensuite l'on aura $\theta_p = \theta_1$, $\theta_{p+1} = \theta_1$, et ainsi de suite.

Cela posé, il est clair que la fonction

$$(\theta + \alpha\theta_1 + \alpha^2\theta_2 + \dots + \alpha^{p-1}\theta_{p-1})^p$$

sera invariable par toutes les permutations du groupe total, et, par conséquent, sera actuellement connue.

Si l'on extrait la racine $p^{\text{ième}}$ de cette fonction, et qu'on l'adjoigne à l'équation, alors, par la proposition IV, le groupe de l'équation ne contiendra plus d'autres substitutions que celles des groupes partiels.

Ainsi, pour que le groupe d'une équation puisse s'abaisser par une simple extraction de racine, la condition ci-dessus est nécessaire et suffisante.

Adjoignons à l'équation le radical en question ; nous pourrions raisonner maintenant sur le nouveau groupe comme sur le précédent, et il faudra qu'il se décompose lui-même de la manière indiquée, et ainsi de suite, jusqu'à un certain groupe qui ne contiendra plus qu'une seule permutation.

Scolie. Il est aisé d'observer cette marche dans la résolution connue des équations générales du quatrième degré. En effet, ces équations se résolvent au moyen d'une équation du troisième degré, qui exige elle-même l'extraction d'une racine carrée. Dans la suite naturelle des idées, c'est donc par cette racine carrée qu'il faut commencer. Or, en adjoignant à l'équation du quatrième degré cette racine carrée, le groupe de l'équation, qui contenait en tout vingt-quatre substitutions, se décompose en deux qui n'en contiennent que douze. En désignant par a, b, c, d les racines, voici l'un de ces groupes :

$$\begin{array}{lll} abcd, & acdb, & adbc, \\ badc, & cabd, & dacb, \\ cdab, & dbac, & bcad, \\ dcba, & bdca, & cbda. \end{array}$$

Maintenant ce groupe se partage lui-même en trois groupes, comme il est indiqué aux théorèmes II et III. Ainsi, par l'extraction d'un seul radical du troisième degré, il reste simplement le groupe

$$\begin{array}{l} abcd, \\ badc, \\ cdab, \\ dcba; \end{array}$$

ce groupe se partage de nouveau en deux groupes :

$$\begin{array}{ll} abcd, & cdab, \\ badc, & dcba. \end{array}$$

Ainsi, après une simple extraction de racine carrée, il restera

$$\begin{array}{l} abcd, \\ badc; \end{array}$$

ce qui se résoudra enfin par une simple extraction de racine carrée.

On obtient ainsi, soit la solution de Descartes, soit celle d'Euler; car, bien qu'après la résolution de l'équation auxiliaire du troisième degré, ce dernier extraie trois racines carrées, on sait qu'il suffit de deux, puisque la troisième s'en déduit rationnellement.

Nous allons maintenant appliquer cette condition aux équations irréductibles dont le degré est premier.

Application aux équations irréductibles de degré premier.

PROPOSITION VI.

LEMME. « Une équation irréductible de degré premier ne peut devenir réductible par l'adjonction d'un radical dont l'indice serait autre que le degré même de l'équation. »

Car si r, r', r'', \dots sont les diverses valeurs du radical, et $Fx = 0$ l'équation proposée, il faudrait que Fx se partageât en facteurs

$$f(x, r) \times f(x, r') \times \dots,$$

tous de même degré, ce qui ne se peut, à moins que $f(x, r)$ ne soit du premier degré en x .

Ainsi une équation irréductible de degré premier ne peut devenir réductible, à moins que son groupe ne se réduise à une seule permutation.

PROPOSITION VII.

PROBLÈME. « Quel est le groupe d'une équation irréductible d'un degré premier n , soluble par radicaux? »

D'après la proposition précédente, le plus petit groupe possible avant celui qui n'a qu'une seule permutation, contiendra n permutations. Or un groupe de permutations d'un nombre premier n de lettres ne peut se réduire à n permutations, à moins que l'une de ces permutations ne se déduise de l'autre par une substitution circulaire de l'ordre n . (Voir le Mémoire de M. Cauchy, *Journal de l'École Polytech-*

Donc le groupe qui précède immédiatement le groupe (G) ne devra contenir que des substitutions telles que

$$x_k, \quad x_{ak+b},$$

et ne contiendra pas, par conséquent, d'autre substitution circulaire que celle du groupe (G).

On raisonnera sur ce groupe comme sur le précédent, et il s'en suivra que le premier groupe dans l'ordre des décompositions, c'est-à-dire le groupe *actuel* de l'équation, ne peut contenir que des substitutions de la forme

$$x_k, \quad x_{ak+b}.$$

Donc, « si une équation irréductible de degré premier est soluble par radicaux, le groupe de cette équation ne saurait contenir que des substitutions de la forme

$$x_k, \quad x_{ak+b},$$

a et b étant des constantes. »

Réciproquement, si cette condition a lieu, je dis que l'équation sera soluble par radicaux. Considérons, en effet, les fonctions

$$\begin{aligned} (x_0 + \alpha x_1 + \alpha^2 x_2 + \dots + \alpha^{n-1} x_{n-1})^n &= X_1, \\ (x_0 + \alpha x_a + \alpha^2 x_{2a} + \dots + \alpha^{n-1} x_{(n-1)a})^n &= X_a, \\ (x_0 + \alpha x_{a^2} + \alpha^2 x_{2a^2} + \dots + \alpha^{n-1} x_{(n-1)a^2})^n &= X_{a^2}, \\ &\dots \end{aligned}$$

α étant une racine $n^{\text{ième}}$ de l'unité, a une racine primitive de n .

Il est clair que toute fonction invariable par les substitutions circulaires des quantités X_1, X_a, X_{a^2}, \dots sera, dans ce cas, immédiatement connue. Donc on pourra trouver X_1, X_a, X_{a^2}, \dots , par la méthode de M. Gauss pour les équations binômes. Donc, etc.

Ainsi, pour qu'une équation irréductible de degré premier soit soluble par radicaux, il *faut* et il *suffit* que toute fonction invariable par les substitutions

$$x_k, \quad x_{ak+b}$$

soit rationnellement connue.

Ainsi la fonction

$$(X_1 - X)(X_a - X)X_{a^2} - X) \dots$$

devra, quel que soit X , être connue.

Il *faut* donc et il *suffit* que l'équation qui donne cette fonction des racines admette, quel que soit X , une valeur rationnelle.

Si l'équation proposée a tous ses coefficients rationnels, l'équation auxiliaire qui donne cette fonction les aura tous aussi, et il suffira de reconnaître si cette équation auxiliaire du degré $1.2.3 \dots (n - 2)$ a ou non une racine rationnelle, ce que l'on sait faire.

C'est là le moyen qu'il faudrait employer dans la pratique. Mais nous allons présenter le théorème sous une autre forme.

PROPOSITION VIII.

THÉORÈME. « Pour qu'une équation irréductible de degré premier » soit soluble par radicaux, il *faut* et il *suffit* que deux quelconques » des racines étant connues, les autres s'en déduisent rationnelle- » ment. »

Premièrement, il le faut, car la substitution

$$x_k, x_{ak+b}$$

ne laissant jamais deux lettres à la même place, il est clair qu'en adjoignant deux racines à l'équation, par la proposition IV, son groupe devra se réduire à une seule permutation.

En second lieu, cela suffit; car, dans ce cas, aucune substitution du groupe ne laissera deux lettres aux mêmes places. Par conséquent, le groupe contiendra tout au plus $n(n - 1)$ permutations. Donc il ne contiendra qu'une seule substitution circulaire (sans quoi il y aurait au moins n^2 permutations). Donc toute substitution du groupe, x_k, x_{fk} , devra satisfaire à la condition

$$f(k + c) = f^k + C,$$

Donc, etc.

Le théorème est donc démontré.

Exemple du théorème VII.

Soit $n = 5$; le groupe sera le suivant :

abcde
bcdea
cdeab
deabc
eabcd

acebd
cebda
ebdac
bdace
daceb

aedcb
edcba
dcbae
cbaed
baedc

adbec
dbeca
becad
ecadb
cadbe.

Fragment d'un second Mémoire.

Des équations primitives qui sont solubles par radicaux.

Cherchons, en général, dans quel cas une équation primitive est soluble par radicaux. Or nous pouvons de suite établir un caractère général fondé sur le degré même de ces équations. Ce caractère est celui-ci : pour qu'une équation primitive soit résoluble par radicaux, il faut que son degré soit de la forme p^n , p étant premier. Et de là suivra immédiatement que, lorsqu'on aura à résoudre par radicaux une équation irréductible dont le degré admettrait des facteurs premiers inégaux, on ne pourra le faire que par la méthode de décomposition due à M. Gauss; sinon l'équation sera insoluble.

Pour établir la propriété générale que nous venons d'énoncer relativement aux équations primitives qu'on peut résoudre par radicaux, nous pouvons supposer que l'équation que l'on veut résoudre soit primitive, mais cesse de l'être par l'adjonction d'un simple radical. En d'autres termes, nous pouvons supposer que, n étant premier, le groupe de l'équation se partage en n groupes irréductibles conjugués, mais non primitifs. Car, à moins que le degré de l'équation soit premier, un pareil groupe se présentera toujours dans la suite des décompositions.

Soit N le degré de l'équation, et supposons qu'après une extraction de racine de degré premier n , elle devienne non primitive et se partage en Q équations primitives de degré P , au moyen d'une seule équation de degré Q .

Si nous appelons G le groupe de l'équation, ce groupe devra se partager en n groupes conjugués non primitifs, dans lesquels les lettres se rangeront en systèmes composés de P lettres conjointes chacun. Voyons de combien de manières cela pourra se faire.

Soit H l'un des groupes conjugués non primitifs. Il est aisé de voir que, dans ce groupe, deux lettres quelconques prises à volonté feront partie d'un certain système de P lettres conjointes, et ne feront partie que d'un seul.

Car, en premier lieu, s'il y avait deux lettres qui ne pussent faire partie d'un même système de P lettres conjointes, le groupe G , qui est tel que l'une quelconque de ses substitutions transforme les unes dans les autres toutes les substitutions du groupe H , serait non primitif : ce qui est contre l'hypothèse.

En second lieu, si deux lettres faisaient partie de plusieurs systèmes différents, il s'ensuivrait que les groupes qui répondent aux divers systèmes de P lettres conjointes ne seraient pas primitifs : ce qui est encore contre l'hypothèse.

Cela posé, soient

$$\begin{array}{ccccccc} a_0, & a_1, & a_2, \dots, & a_{p-1}, \\ b_0, & b_1, & b_2, \dots, & b_{p-1}, \\ c_0, & c_1, & c_2, \dots, & c_{p-1}, \end{array}$$

les N lettres : supposons que chaque ligne horizontale représente un système de lettres conjointes. Soient

$$a_0, \quad a_{0.1}, \quad a_{0.2}, \dots, \quad a_{0.p-1},$$

P lettres conjointes toutes situées dans la première colonne verticale. (Il est clair que nous pouvons faire qu'il en soit ainsi, en intervertissant l'ordre des lignes horizontales.)

Soient, de même,

$$a_{1.0}, \quad a_{1.1}, \quad a_{1.2}, \quad a_{1.3}, \dots, \quad a_{1.p-1},$$

P lettres conjointes toutes situées dans la seconde colonne verticale, en sorte que

$$a_{1.0}, \quad a_{1.1}, \quad a_{1.2}, \quad a_{1.3}, \dots, \quad a_{1.p-1}$$

appartiennent respectivement aux mêmes lignes horizontales que

$$a_{0.0}, \quad a_{0.1}, \quad a_{0.2}, \quad a_{0.3}, \dots, \quad a_{0.p-1};$$

soient, de même, les systèmes de lettres conjointes

$$\begin{array}{cccccc} a_{2.0}, & a_{2.1}, & a_{2.2}, & a_{2.3}, \dots, & a_{2.P-1}, \\ a_{3.0}, & a_{3.1}, & a_{3.2}, & a_{3.3}, \dots, & a_{3.P-1}, \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \end{array}$$

nous obtiendrons ainsi, en tout, P^2 lettres. Si le nombre total des lettres n'est pas épuisé, on prendra un troisième indice, en sorte que

$$a_{m.n.0}, \quad a_{m.n.1}, \quad a_{m.n.2}, \quad a_{m.n.3}, \dots, \quad a_{m.n.P-1}$$

soit, en général, un système de lettres conjointes; et l'on parviendra ainsi à cette conclusion, que $N = P^\mu$, μ étant un certain nombre égal à celui des indices différents dont on aura besoin. La forme générale des lettres sera

$$a_{\underset{1}{k} \underset{2}{k} \underset{3}{k} \dots \underset{\mu}{k}}$$

k, k, k, \dots, k étant des indices qui peuvent prendre chacun les P valeurs

o. 1, 2, 3, ..., $P - 1$.

On voit aussi, par la manière dont nous avons procédé, que dans le groupe H, toutes les substitutions seront de la forme

$$\left[a_{\underset{1}{k} \underset{2}{k} \underset{3}{k} \dots \underset{\mu}{k}}, \quad a_{\underset{1}{\varphi(k)} \underset{2}{\psi(k)} \underset{3}{\chi(k)} \dots \underset{\mu}{\sigma(k)}} \right],$$

puisque chaque indice correspond à un système de lettres conjointes.

Si P n'est pas un nombre premier, on raisonnera sur le groupe de permutations de l'un quelconque des systèmes de lettres conjointes, comme sur le groupe G, en remplaçant chaque indice par un certain nombre de nouveaux indices, et l'on trouvera $P = R^\alpha$, et ainsi de suite; d'où enfin $N = p^\nu$, p étant un nombre premier.

Des équations primitives de degré p^2 .

Arrêtons-nous un moment pour traiter de suite les équations primitives d'un degré p^2 , p étant premier impair. (Le cas de $p = 2$ a été examiné.) Si une équation du degré p^2 est soluble par radicaux, suppo-

sons-la d'abord telle, qu'elle devienne non primitive par une extraction de radical.

Soit donc G un groupe primitif de p^2 lettres qui se partage en n groupes non primitifs conjugués à H.

Les lettres devront nécessairement, dans le groupe H, se ranger ainsi,

$$\begin{array}{ccccccccc} a_{0.0}, & a_{0.1}, & a_{0.2}, & a_{0.3}, \dots, & a_{0.p-1}, \\ a_{1.0}, & a_{1.1}, & a_{1.2}, & a_{1.3}, \dots, & a_{1.p-1}, \\ a_{2.0}, & a_{2.1}, & a_{2.2}, & a_{2.3}, \dots, & a_{2.p-1}, \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{p-1.0}, & a_{p-1.1}, & a_{p-1.2}, & a_{p-1.3}, \dots, & a_{p-1.p-1}, \end{array}$$

chaque ligne horizontale et chaque ligne verticale étant un système de lettres conjointes.

Si l'on permute entre elles les lignes horizontales, le groupe que l'on obtiendra, étant primitif et de degré premier, ne devra contenir que des substitutions de la forme

$$\left(\begin{array}{cc} a_{k.k}, & a_{mk+n.k} \\ 1 & 2 \end{array} \right),$$

les indices étant pris relativement au module p .

Il en sera de même pour les lignes verticales qui ne pourront donner que des substitutions de la forme

$$\left(\begin{array}{cc} a_{k.k}, & a_{k.qk+r} \\ 1 & 2 \end{array} \right).$$

Donc enfin toutes les substitutions du groupe H seront de la forme

$$\left(\begin{array}{cc} a_{k.k}, & a_{mk+n.mk+n} \\ 1 & 2 \end{array} \right).$$

Si un groupe G se partage en n groupes conjugués à celui que nous venons de décrire, toutes les substitutions du groupe G devront transformer les unes dans les autres les substitutions circulaires du groupe H, qui sont toutes écrites comme il suit :

$$(a) \quad \left(\begin{array}{cc} a_{k.k}, \dots, & a_{k+\alpha.k+\alpha}, \dots \\ 1 & 2 \end{array} \right)$$

Supposons donc que l'une des substitutions du groupe G se forme en remplaçant respectivement

$$\begin{array}{c} k \\ 1 \end{array} \quad \text{par} \quad \begin{array}{c} k \\ 2 \end{array} \quad \begin{array}{l} \varphi_1 \left(\begin{array}{cc} k & k \\ 1 & 2 \end{array} \right) \\ \varphi_2 \left(\begin{array}{cc} k & k \\ 1 & 2 \end{array} \right). \end{array}$$

Si, dans les fonctions φ_1, φ_2 , on substitue pour k et k les valeurs $k + \alpha, k + \alpha$, il devra venir des résultats de la forme

$$\varphi_1 + \epsilon_1, \quad \varphi_2 + \epsilon_2,$$

et de là il est aisé de conclure immédiatement que les substitutions du groupe G doivent être toutes comprises dans la formule

$$(A) \quad \left(a_{\begin{smallmatrix} k & k \\ 1 & 2 \end{smallmatrix}}, a_{\begin{smallmatrix} mk+nk+\alpha & mk+nk+\alpha \\ 11 & 12 & 121 & 21 & 2 \end{smallmatrix}} \right).$$

Or nous savons, par le n° [1], que les substitutions du groupe G ne peuvent embrasser que $p^2 - 1$ ou $p^2 - p$ lettres. Ce n'est point $p^2 - p$, puisque, dans ce cas, le groupe G serait non primitif. Si donc dans le groupe G on ne considère que les permutations où la lettre $a_{0,0}$, par exemple, conserve toujours la même place, on n'aura que des substitutions de l'ordre $p^2 - 1$ entre les $p^2 - 1$ autres lettres.

Mais rappelons-nous ici que c'est simplement pour la démonstration, que nous avons supposé que le groupe primitif G se partageât en groupes conjugués non primitifs. Comme cette condition n'est nullement nécessaire, les groupes seront souvent beaucoup plus composés.

Il s'agit donc de reconnaître dans quel cas ces groupes pourront admettre des substitutions où $p^2 - p$ lettres seulement varieraient, et cette recherche va nous retenir quelque temps.

Soit donc G un groupe qui contienne quelque substitution de l'ordre $p^2 - p$; je dis d'abord que toutes les substitutions de ce groupe seront linéaires, c'est-à-dire de la forme (A).

[1] Ce Mémoire faisant suite à un travail de Galois que je ne possède pas, il m'est impossible d'indiquer le Mémoire cité ici et plus bas.

La chose est reconnue vraie pour les substitutions de l'ordre $p^2 - 1$; il suffit donc de la démontrer pour celles de l'ordre $p^2 - p$. Ne considérons donc qu'un groupe où les substitutions seraient toutes m de l'ordre p^2 ou de l'ordre $p^2 - p$. (*Voyez l'endroit cité.*)

Alors les p lettres qui, dans une substitution de l'ordre $p^2 - p$, ne varient pas, devront être des lettres conjointes.

Supposons que ces lettres conjointes soient

$$a_{0,0}, a_{0,1}, a_{0,2}, \dots, a_{0,p-1}.$$

Nous pouvons déduire toutes les substitutions où ces p lettres ne changent pas de place, nous pouvons les déduire de substitutions de la forme

$$\begin{pmatrix} a_{k,k} & a_{k,pk} \\ 1 & 2 \end{pmatrix},$$

et de substitutions de l'ordre $p^2 - p$, dont la période serait de p termes. (*Voyez encore l'endroit cité.*)

Les premiers doivent nécessairement, pour que le groupe jouisse de la propriété voulue, se réduire à la forme

$$\begin{pmatrix} a_{k,k} & a_{k,mk} \\ 1 & 2 \end{pmatrix},$$

d'après ce qu'on a vu pour les équations de degré p .

Quant aux substitutions dont la période serait de p termes, comme elles sont conjuguées aux précédentes, nous pouvons supposer un groupe qui les contienne sans contenir celles-ci : donc elles devront transformer les substitutions circulaires (a) les unes dans les autres; donc elles seront aussi linéaires.

Nous sommes donc arrivés à cette conclusion, que le groupe primitif de permutations de p^2 lettres doit ne contenir que des substitutions de la forme (A).

Maintenant, prenons le groupe total que l'on obtient en opérant sur l'expression

$$a_{k,k} \\ 1 \ 2$$

toutes les substitutions linéaires possibles, et cherchons quels sont les

diviseurs de ce groupe qui peuvent jouir de la propriété voulue pour la résolubilité des équations.

Quel est d'abord le nombre total des substitutions linéaires? Premièrement, il est clair que toute transformation de la forme

$$k.k, \quad mk + nk + \alpha.mk + nk + \alpha$$

$\begin{smallmatrix} 1 & 2 \\ 1 & 1 \\ 1 & 2 \\ 1 & 2 & 1 \\ 2 & 2 \\ 2 \end{smallmatrix}$

ne sera pas pour cela une substitution; car il faut, dans une substitution, qu'à chaque lettre de la première permutation il ne réponde qu'une seule lettre de la seconde, et réciproquement.

Si donc on prend une lettre quelconque a_{l_1, l_2} de la seconde permutation, et que l'on remonte à la lettre correspondante dans la première, on devra trouver une lettre a_{k_1, k_2} où les indices k_1, k_2 seront parfaitement

déterminés. Il faut donc que, quels que soient l_1 et l_2 , on ait par les deux équations

$$m_1 k_1 + n k_2 + \alpha_1 = l_1, \quad m_2 k_1 + n k_2 + \alpha_2 = l_2,$$

$\begin{smallmatrix} 1 & 2 \\ 2 & 1 \\ 2 & 2 \end{smallmatrix}$

des valeurs de k_1 et k_2 finies et déterminées. Ainsi la condition pour qu'une pareille transformation soit réellement une substitution, est que $mn - mn$ ne soit ni nul ni divisible par le module p , ce qui est la même chose.

Je dis maintenant que, bien que ce groupe à substitutions linéaires n'appartienne pas toujours, comme on le verra, à des équations solubles par radicaux, il jouira toutefois de cette propriété, que si dans une quelconque de ses substitutions il y a n lettres de fixes, n divisera le nombre des lettres. Et, en effet, quel que soit le nombre des lettres qui restent fixes, on pourra exprimer cette circonstance par des équations linéaires qui donneront tous les indices de l'une des lettres fixes, au moyen d'un certain nombre d'entre eux. Donnant à chacun de ces indices, restés arbitraires, p valeurs, on aura p^m systèmes de valeurs, m étant un certain nombre. Dans le cas qui nous occupe, m est nécessairement < 2 , et se trouve par conséquent être 0 ou 1. Donc

le nombre des substitutions ne saurait être plus grand que

$$p^2 (p^2 - 1) (p^2 - p).$$

Ne considérons maintenant que les substitutions linéaires où la lettre $a_{0,0}$ ne varie pas; si, dans ce cas, nous trouvons le nombre total des permutations du groupe qui contient toutes les substitutions linéaires possibles, il nous suffira de multiplier ce nombre par p^2 .

Or, premièrement, en substituant p à l'indice k_2 , toutes les substitutions de la forme

$$\begin{pmatrix} a_{k,k}, & a_{mk,k} \\ 1 & 2 \end{pmatrix}$$

donneront en tout $p - 1$ substitutions. On en aura $p^2 - p$ en ajoutant au terme k_2 le terme mk_2 , ainsi qu'il suit :

$$(m') \quad \begin{pmatrix} k.k, & mk.mk + k \\ 1 & 2 \end{pmatrix}.$$

D'un autre côté, il est aisé de trouver un groupe linéaire de $p^2 - 1$ permutations, tel que, dans chacune de ses substitutions, toutes les lettres, à l'exception de $a_{0,0}$, varient. Car, en remplaçant le double indice k_k par l'indice simple $k_1 + ik_2$, i étant une racine primitive de

$$x^{p^2-1} - 1 = 0 \quad (\text{mod. } p),$$

il est clair que toute substitution de la forme

$$\left[\begin{matrix} a_{k+ki}, & a_{(m_1+mi)(k+ki)} \\ 1 & 2 \end{matrix} \right]$$

sera une substitution linéaire; mais, dans ces substitutions, aucune lettre ne reste à la même place, et elles sont au nombre de $p^2 - 1$.

Nous avons donc un système de $p^2 - 1$ permutations tel que, dans chacune de ses substitutions, toutes les lettres varient, à l'exception de $a_{0,0}$. Combinant ces substitutions avec les $p^2 - p$ dont il est parlé plus haut, nous aurons

$$(p^2 - 1) (p^2 - p) \text{ substitutions.}$$

Or, nous avons vu à priori que le nombre des substitutions où $a_{0,0}$

reste fixe ne pouvait être plus grand que $(p^2 - 1)(p^2 - p)$. Donc il est précisément égal à $(p^2 - 1)(p^2 - p)$, et le groupe linéaire total aura en tout

$$p^2 (p^2 - 1)(p^2 - p) \text{ permutations.}$$

Il reste à chercher les diviseurs de ce groupe, qui peuvent jouir de la propriété d'être solubles par radicaux. Pour cela, nous allons faire une transformation qui a pour but d'abaisser autant que possible les équations générales de degré p^2 dont le groupe serait linéaire.

Premièrement, comme les substitutions circulaires d'un pareil groupe sont telles, que toute autre substitution du groupe les transforme les unes dans les autres, on pourra abaisser l'équation d'un degré, et considérer une équation de degré $p^2 - 1$ dont le groupe n'aurait que des substitutions de la forme

$$\left(b_{k_1, k_2}, \quad b_{\substack{mk+n \\ 1 \ 1 \ 1 \ 2 \ 2 \ 1 \ 2 \ 2}} \right),$$

les $p^2 - 1$ lettres étant

$$\begin{array}{cccc} b_{0,1}, & b_{0,2}, & b_{0,3}, & \dots, \\ b_{1,0}, & b_{1,1}, & b_{1,2}, & b_{1,3}, \dots, \\ b_{2,0}, & b_{2,1}, & b_{2,2}, & b_{2,3}, \dots, \\ \dots & \dots & \dots & \dots \end{array}$$

J'observe maintenant que ce groupe est non primitif, en sorte que toutes les lettres où le rapport des deux indices est le même sont des lettres conjointes. Si l'on remplace par une seule lettre chaque système de lettres conjointes, on aura un groupe dont toutes les substitutions seront de la forme

$$\left(b_{\frac{k_1}{k_2}}, \quad b_{\frac{m_1 k_1 + n_1 k_2}{m_2 k_1 + n_2 k_2}} \right),$$

$\frac{k_1}{k_2}$ étant les nouveaux indices. En remplaçant ce rapport par un seul indice k , on voit que les $p + 1$ lettres seront

$$b_0, \quad b_1, \quad b_2, \quad b_3, \dots, \quad b_{p-1}, \quad b_{\frac{1}{0}},$$

et les substitutions seront de la forme

$$\left(k, \frac{mk+n}{rk+s}\right).$$

Cherchons combien de lettres, dans chacune de ces substitutions, restent à la même place; il faut pour cela résoudre l'équation

$$(rk+s)k - m(mk+n) = 0,$$

qui aura deux, ou une, ou aucune racine, suivant que $(m-s)^2 + 4nr$ sera résidu quadratique, nul ou non résidu quadratique. Suivant ces trois cas, la substitution sera de l'ordre $p-1$, ou p , ou $p+1$.

On peut prendre pour type des deux premiers cas les substitutions de la forme

$$(k, mk+n),$$

où la seule lettre $b_{\frac{1}{0}}$ ne varie pas, et de là on voit que le nombre total des substitutions du groupe réduit est

$$(p+1)p(p-1).$$

C'est après avoir ainsi réduit ce groupe, que nous allons le traiter généralement. Nous chercherons d'abord dans quel cas un diviseur de ce groupe, qui contiendrait des substitutions de l'ordre p , pourrait appartenir à une équation soluble par radicaux.

Dans ce cas, l'équation serait primitive et elle ne pourrait être soluble par radicaux, à moins que l'on n'eût $p+1=2^n$, n étant un certain nombre.

Nous pouvons supposer que le groupe ne contienne que des substitutions de l'ordre p et de l'ordre $p+1$. Toutes les substitutions de l'ordre $p+1$ seront par conséquent semblables, et leur période sera de deux termes.

Prenons donc l'expression

$$\left(k, \frac{mk+n}{rk+s}\right),$$

et voyons dans quel cas cette substitution peut avoir une période de deux termes. Il faut pour cela que la substitution inverse se confonde

avec elle. La substitution inverse est

$$\left(k, \frac{-sk+n}{rk-m}\right).$$

Donc on doit avoir $m = -s$, et toutes les substitutions en question seront

$$\left(k, \frac{mk+n}{k-m}\right),$$

ou encore

$$k, \quad m + \frac{N}{k-m},$$

N étant un certain nombre qui est le même pour toutes les substitutions, puisque ces substitutions doivent être transformées les unes dans les autres par toutes les substitutions de l'ordre p , $(k, k+m)$; or ces substitutions doivent, de plus, être conjuguées les unes des autres. Si donc

$$\left(k, m + \frac{N}{k-m}\right), \quad \left(k, n + \frac{N}{k-n}\right)$$

sont deux pareilles substitutions, il faut que l'on ait

$$n + \frac{N}{\frac{N}{k-m} + m - n} = m + \frac{N}{\frac{N}{k-n} + n - m},$$

savoir,

$$(m-n)^2 = 2N.$$

Donc la différence entre deux valeurs de m ne peut acquérir que deux valeurs différentes; donc m ne peut avoir plus de trois valeurs; donc enfin $p = 3$. Ainsi, c'est seulement dans ce cas que le groupe réduit pourra contenir des substitutions de l'ordre p .

Et, en effet, la réduite sera alors du quatrième degré, et par conséquent soluble par radicaux.

Nous savons par là qu'en général, parmi les substitutions de notre groupe réduit, il ne devra pas se trouver de substitutions de l'ordre p . Peut-il y en avoir de l'ordre $p-1$? C'est ce que je vais rechercher [*].

.....

[*] J'ai cherché inutilement dans les papiers de Galois la continuation de ce qu'on vient de lire.

Sophus LIE

INFLUENCE DE GALOIS

SUR

**LE DÉVELOPPEMENT
DES MATHÉMATIQUES**



**ÉDITIONS
JACQUES GABAY**

Sophus LIE (1842-1899)

INFLUENCE DE GALOIS
SUR LE
DÉVELOPPEMENT DES MATHÉMATIQUES*

La direction de l'École normale supérieure a bien voulu me demander d'écrire, à l'occasion du centenaire de l'École, quelques mots sur Galois, cet immortel normalien qui a si puissamment contribué à la gloire des mathématiques françaises ; je dois sans doute cet honneur, que ne n'ai pas cru pouvoir refuser, à ce que, depuis vingt-cinq ans, je me suis tout particulièrement efforcé d'étendre à d'autres domaines de la science mathématique ses idées sur les équations algébriques, si originales et si fécondes.

Je ne me suis pas dissimulé cependant combien il serait au-dessus de mes forces de faire une étude complète de l'œuvre et du génie de Galois. J'espère donc qu'on ne m'en voudra pas si je parle presque uniquement des branches des mathématiques avec lesquelles mes recherches personnelles m'ont, en quelque mesure, familiarisé. Que l'on m'excuse aussi, si je crois devoir m'abstenir, autant que possible, de nommer dans ces pages les géomètres encore vivants.

I

En mathématiques, comme en général dans toutes les sciences exactes, ce sont les idées neuves et fondamentales, ce sont les grandes découvertes qui caractérisent les époques. Et s'il est certain aussi pour toutes les sciences que les hommes qui leur ont fait faire le plus de progrès ont conçu dans leur jeunesse les plus importantes de leurs idées, il est particulièrement caractéristique en mathématiques que deux des plus profondes découvertes qui aient jamais été faites (le théorème d'Abel

* Étude publiée dans l'ouvrage, *Le centenaire de l'École Normale 1795-1895*, Hachette 1895.

et la théorie des équations algébriques de Galois) soient l'œuvre de deux géomètres dont l'un, Abel, avait à peu près vingt-deux ans, et l'autre, Galois, n'avait pas atteint vingt ans. Tous deux furent emportés par la mort sans avoir eu le temps de mettre en pleine lumière l'étendue de leurs découvertes ; tous deux durent abandonner à leurs successeurs le soin d'approfondir leurs théories et d'en développer les conséquences. Et pourtant, tant est grande en mathématiques la puissance de l'idée, on rapprochera éternellement les noms d'Abel et de Galois de ceux des premiers mathématiciens de tous les temps.

La trop brève carrière de ces deux mathématiciens se développa au moment où une ère nouvelle commençait, tant en analyse qu'en géométrie. La géométrie, qui avait atteint un si haut degré de perfection avec les anciens géomètres grecs, était demeurée étroitement liée à l'analyse depuis la création de la géométrie analytique. Aussi, l'invention du calcul infinitésimal, à la fondation duquel des considérations analytiques, géométriques et mécaniques avaient si heureusement concouru, exerça-t-elle à son tour une puissante réaction sur la géométrie.

N'avait-on pas vu, du reste, dès la fondation de la géométrie analytique, la différence entre l'analyse et la géométrie s'effacer si bien, que les progrès de la géométrie se rattachaient depuis plutôt à une application systématique de l'analyse qu'à l'introduction d'idées géométriques nouvelles. Ce n'est que dans notre siècle, entre 1820 et 1830, que la géométrie fait une nouvelle apparition, en tant que science indépendante.

C'est à Poncelet et à Gauss que nous devons ce revirement et cette impulsion nouvelle, qui n'est pas encore aujourd'hui assez universellement reconnue. Leurs œuvres fondamentales (*Traité des propriétés projectives*, 1822, et *Disquisitiones generales circa superficies curvas*, 1827), renfermant de nouveaux principes de géométrie, ont en effet imprimé aux recherches géométriques un remarquable élan. Nous reviendrons plus loin sur ces théories géométriques et nous essaierons de montrer par suite de quelles circonstances elles ont contracté une si fructueuse union avec des théories analytiques qui venaient alors de se développer. Presque simultanément en effet, l'analyse s'enrichissait d'idées nouvelles d'une portée si considérable que toute la science mathématique en était comme transformée.

A la tête des savants de cette nouvelle époque, Gauss et Cauchy, Abel et Galois doivent être mis en première ligne ; et s'il est juste de nommer, immédiatement après ces génies créateurs, Jacobi, dont le talent brillant s'est attaqué à tant de branches des mathématiques, à mon avis, pour l'originalité, la puissance et la profondeur, il ne saurait toutefois être comparé aux quatre mathématiciens cités plus

haut. Parmi les successeurs de ces maîtres, Riemann occupe une place particulièrement brillante, bien que l'exposition de ses idées, si originales, si profondes et si fécondes, manque souvent de la clarté, parfois même de la rigueur désirables.

Gauss et Cauchy ont eu le rare bonheur de pouvoir, durant les longues années d'une existence heureuse, développer leurs idées et en tirer parti ; hautement estimés de leurs contemporains, ils eurent la grande joie de voir des élèves éminents poursuivre leur œuvre. Ils exercèrent sur Abel, qui était un peu plus jeune, et aussi sur Galois (né neuf ans après Abel), une action incontestable ; quoique cependant l'influence des idées d'Abel sur le génie de Galois ait été incomparablement plus grande.

Quelle différence entre la longue et brillante existence de Gauss et de Cauchy, et la courte carrière d'Abel et de Galois, dont les travaux ont pourtant laissé dans la science des traces si profondes !

Il y a entre Abel et Galois, aussi bien dans la brièveté de leur vie que dans le genre de leur talent et l'orientation de leurs recherches, une si frappante similitude, qu'il me paraît difficile de ne pas dire d'abord quelques mots de l'œuvre scientifique d'Abel.

Niels-Henrik Abel, né en 1802, publia en 1825 ses premiers travaux, qui furent bientôt suivis de nombreux mémoires. Il mourut avant d'avoir atteint l'âge de vingt-sept ans. Ses recherches se portèrent dans plusieurs directions bien différentes, entre lesquelles existent pourtant de nombreux points de contact.

Les recherches d'Abel sur les séries de puissances, unies aux travaux de Cauchy sur le même sujet, sont les véritables fondements de la théorie moderne des fonctions analytiques, théorie qui a reçu depuis un si brillant développement. Abel introduisit le premier dans la science les fonctions elliptiques, par l'inversion de l'intégrale elliptique ; il fut aussi le premier à faire une étude systématique et détaillée de ces fonctions ; Jacobi, qui en même temps avait commencé des recherches sur la transformation des intégrales elliptiques, contribua puissamment dans la suite au perfectionnement de la théorie des fonctions elliptiques. Cette théorie, déjà si importante en elle-même, a exercé la plus heureuse influence tant sur la théorie générale des fonctions analytiques que sur celle des équations algébriques.

Les recherches profondes d'Abel sur les équations algébriques, dont Galois n'avait eu qu'en partie connaissance, sont liées de la façon la plus importante à celles de Galois. On peut en dire autant, bien que cela ait été peu observé jusqu'ici, des recherches célèbres d'Abel sur les intégrales de différentielles algébriques.

II

Évariste Galois, né en 1811, était encore élève à l'École normale lorsqu'il fut enlevé par la mort, en 1832, sans avoir eu le temps d'exposer en détail des idées qui devaient faire époque. Il s'occupa comme Abel des équations algébriques, des fonctions elliptiques et des intégrales de différentielles algébriques. Son travail le plus connu, et aussi le plus important, est sa théorie des équations algébriques.

La théorie générale des équations algébriques commence avec Vandermonde, Lagrange et Gauss. Abel reconnut que l'équation générale du 5^e degré n'est pas résoluble par radicaux ; il découvrit ensuite, par la généralisation de la théorie de Gauss, une grande classe d'équations résolubles, qu'on a plus tard appelées de son nom équations abéliennes. Enfin, dans un travail interrompu par la mort, et qui parut sept ans après la mort de Galois, Abel s'occupait de toutes les équations résolubles par radicaux, et esquissait à leur sujet une théorie qui, comme toutes ses recherches, porte l'empreinte de son puissant génie.

Galois, qui ne pouvait avoir eu connaissance de ce dernier effort, se proposa un problème encore plus difficile — *développer la théorie générale des équations algébriques qui peuvent être résolues au moyen d'équations auxiliaires de degrés moindre.* — *Galois reconnut, et c'est le point capital de son œuvre, que ce difficile problème est régi dans chaque cas particulier par un certain groupe de substitutions, dans lequel se reflètent les propriétés les plus importantes de l'équation algébrique considérée.* Cette profonde découverte, que les successeurs de Galois, et particulièrement M. Camille Jordan*, ont éclaircie, développée et appliquée, avait en elle-même une importance capitale, mais elle a acquis une bien autre portée quand on s'est aperçu que les notions introduites par Galois s'étendaient à un domaine beaucoup plus vaste. Je reviendrais bientôt sur ce point avec plus de détails.

Galois s'occupa aussi d'appliquer ses idées fondamentales à l'étude des fonctions elliptiques, et en particulier aux équations algébriques provenant de la division et de la transformation de ces fonctions ; il fit ainsi faire à la théorie de ces transcendentes les plus brillants progrès.

Je viens de parler des recherches les plus connues de Galois ; mais je dois dire aussi un mot d'autres idées profondes qu'il n'a fait qu'indiquer si rapidement qu'elles paraissent être restées inaperçues des mathématiciens.

* Camille JORDAN, *Traité des substitutions et des équations algébriques*, 1870. Réédité en 1989 par les Éditions Jacques Gabay.

Voici d'abord quelques remarques à propos des recherches de Galois sur les intégrales abéliennes. Galois connaissait la courte note où le célèbre théorème d'Abel apparut dans toute sa généralité ; il avait lu aussi le travail d'Abel où est introduit à propos des intégrales hyperelliptiques ce nombre si important, désigné dans la suite sous le nom de *genre*. Par contre, Galois ne pouvait avoir eu connaissance du grand mémoire présenté à l'Académie des sciences, où Abel s'occupait des intégrales abéliennes les plus générales et obtenait la notion du genre dans toute sa généralité. Il n'est par suite pas inutile d'observer que Galois non seulement était arrivé de son côté à cette notion, sous sa forme la plus générale, mais qu'il en avait encore donné plusieurs définitions profondes et essentiellement différentes.

Il n'est donc pas douteux qu'Abel et Galois étaient en possession de cette notion, qu'on attribue généralement à Riemann. Il est vrai que ce dernier a eu le mérite de la mettre en lumière et d'en développer les conséquences. Si incomplètes que soient les communications de Galois relativement à ses recherches dans ce domaine si élevé, elles montrent toutefois combien son génie était pénétrant, et nous font regretter plus vivement encore la perte que la science a faite par sa mort prématurée.

Elles ne sont pas moins remarquables, les indications dernières du testament scientifique de Galois, bien qu'il les ait exprimées sous une forme tellement vague que l'on peut à peine deviner sa pensée. On ne peut douter en effet que Galois ait eu l'intention de rechercher, non seulement les groupes de substitutions, mais aussi, à un point de vue tout à fait général, les groupes de transformations, et qu'il ait songé à en poursuivre les applications à l'analyse. On ne sait guère aujourd'hui s'il a pensé aux groupes continus, ou aux groupes discontinus, ou aux deux espèces à la fois ; et nous ne pouvons dire dans quelle direction il espérait en tirer parti ; mais il est certain que Galois a pressenti l'importance que pourraient acquérir dans d'autres branches les idées qui l'avaient conduit à de si éclatants succès dans la théorie des équations algébriques.

La grande portée de l'œuvre de Galois tient en somme à ce fait, que *sa théorie si originale des équations algébriques est une application systématique des deux notions fondamentales de groupe et d'invariant* ; notions qui prennent chaque jour dans les mathématiques une place plus prépondérante, et tendent à dominer tout l'ensemble de cette science. Il est vrai que, dans un certain sens, les notions de groupe et d'invariant ne sont pas nouvelles. Elles s'introduisent implicitement d'une façon plus ou moins immédiate, dans presque toutes les recherches mathématiques ; on reconnaît par exemple immédiatement que la géométrie euclidienne traite des grandeurs qui restent invariantes par le groupe de tous les mouvements. D'un autre côté, la notion d'invariant est en évidence dans les travaux de Vandermonde, Lagrange, Gauss, Ampère et Cauchy.

Au contraire c'est Galois, qui le premier, je crois, a introduit l'idée de groupe ; et dans tous cas, il est le premier mathématicien qui a approfondi les rapports existant entre les idées de groupe et d'invariant. C'est de plus à lui que l'on doit incontestablement la notion de sous-groupe invariant et, par-dessus tout, c'est lui qui a pleinement mis en lumière la puissance de ces nouvelles conceptions en traitant un exemple du plus haut intérêt, et d'une difficulté presque insurmontable.

III

Les successeurs de Galois ont reconnu que ses idées, convenablement généralisées, dominant des branches étendues de la science mathématique ; grâce à lui, on a découvert d'étroites relations entre des théories considérées jusqu'alors comme tout à fait distinctes. Les analogies ainsi constatées nous apprennent comment doivent être traités beaucoup de problèmes difficiles ; et, résultat plus important encore, elles ont conduit souvent à des généralisations inattendues de théories connues.

Tout le monde sait aujourd'hui que la notion de groupe, due à Galois, ne se rapporte pas seulement aux substitutions, mais peut au contraire être généralisée dans des directions multiples. Pourtant, si de telles généralisations étaient au premier abord immédiates, il n'est pas certain pour cela que la notion du groupe ait acquis dès à présent une forme définitive. — La définition la plus générale que l'on ait posée jusqu'ici est la suivante : *Un ensemble d'opérations forme un groupe, si le produit de deux de ces opérations est équivalent à une seule opération appartenant à l'ensemble considéré.*

Si l'on remplace dans cet énoncé le mot *opération* par le mot spécial *transformation*, et le mot *produit* par le mot *succession*, on a une définition de la notion de groupe de transformations, qui est peut-être définitive. Pratiquement, on précise dans chaque cas particulier cette définition. Par exemple, on partage les groupes en groupes continus, discontinus, et mixtes, et chacune de ces classes comporte deux divisions, les groupes finis et les groupes infinis. Parmi les groupes continus, il a paru convenable de laisser de côté ceux qui ne sont pas définis par des équations différentielles. Enfin, on n'a pas encore montré, d'une façon entièrement satisfaisante au point de vue purement théorique, s'il était nécessaire d'ajouter à la définition des groupes continus que parmi leurs transformations se trouve la transformation identique. En étendant la notion de groupe à des opérations quelconques, on n'a pas le droit de conclure que de la définition donnée plus haut résulte le partage des opérations de groupe en couples d'opérations inverses. Il arrive aussi que le principe d'associativité n'est

pas valable pour tous les groupes d'opérations. Dans ce qui suit, je m'occuperai uniquement des groupes de transformations ; il me paraît donc inutile de donner plus de détails sur ces questions, malgré leur haut intérêt.

Je vais maintenant montrer par des exemples caractéristiques quelle importance les idées de Galois ont acquise peu à peu dans les différentes branches des mathématiques.

On définit simplement aujourd'hui la géométrie euclidienne, qui opère avec les notions d'angle et de rapport de deux distances, comme la théorie des invariants du groupe de transformations composé de tous les mouvements et de toutes les transformations par similitude.

La théorie de la courbure, due à Euler et Monge, peut être envisagée de même comme la théorie des invariants différentiels du groupe des mouvements. Il y a lieu, à ce propos, de remarquer qu'Ampère déterminait déjà, en 1803, toutes les expressions différentielles à deux variables x, y qui restent invariantes pour tous les mouvements du plan des x, y .

La géométrie projective, fondée par Poncelet, traite des invariants du groupe des transformations projectives. Cette théorie, à laquelle Möbius a donné une forme analytique nouvelle, a conduit, il y a cinquante ans, à la théorie de Cayley pour les invariants des groupes linéaires et homogènes. Les rapports étroits de cette théorie avec les substitutions de Galois n'ont été, si je ne me trompe, mis en évidence que dans ces vingt dernières années.

La théorie de la déformation des surfaces, due à Gauss, ainsi que les recherches connexes sur la transformation des expressions différentielles, recherches commencées par Riemann, se ramènent à l'étude des invariants différentiels du groupe infini formé de toutes les transformations ponctuelles.

Enfin nous considérons aujourd'hui la théorie supérieure de la courbure comme la théorie des invariants d'un certain groupe de transformations de contact, que l'on peut ramener au groupe projectif général d'une façon bien remarquable, par une certaine transformation de contact imaginaire. La découverte de la similitude de ces deux derniers groupes a conduit de plus à la découverte de relations importantes entre les théories métriques et projectives.

Si les notions de groupe et d'invariant ont jeté, comme on vient de le voir, une vive lumière sur la géométrie, elles ont donné dans la théorie des équations différentielles des résultats d'une importance encore plus grande. Les méthodes d'intégration que l'on trouve exposées dans les traités classiques étaient données autrefois comme des théories séparées, entre lesquelles aucun lien n'existait ; par l'introduction de la notion de groupe on les fait sortir d'une même source. C'est ainsi que l'on a acquis, sur la

théorie des équations différentielles, des vues plus profondes, dont la fécondité s'est maintes fois manifestée. De là par exemple est née une théorie générale d'intégration pour les systèmes d'équations différentielles dont la solution la plus générale s'exprime en fonction d'une solution particulière par des formules qui définissent un groupe fini et continu ; cette théorie a une analogie frappante avec celle de Galois. Dans chaque cas particulier, en effet, la difficulté du problème d'intégration dépend uniquement de la structure du groupe continu correspondant. Par suite, la recherche de la structure de tous les groupes simples a une importance capitale. Il est très remarquable qu'on soit arrivé récemment à la solution complète de ce problème difficile dans le cas où le groupe est fini et continu, mais il n'est pas moins intéressant de constater que ces recherches, si je ne me trompe, ont conduit tout dernièrement à la découverte de deux nouveaux groupes simples discontinus.

L'extension de la méthode d'intégration dont nous venons de parler au cas où le groupe continu correspondant est infini a donné également de nombreux et remarquables résultats.

Les applications de la théorie des groupes discontinus, plus connues bien qu'elles soient à peine plus importantes, ont conduit à de grandes découvertes dans la théorie des fonctions et celle des équations différentielles. On leur doit de belles recherches sur les équations différentielles linéaires ordinaires dont les intégrales sont algébriques, et ces célèbres travaux sur les fonctions uniformes appelées souvent fonctions automorphes.

Tout particulièrement intéressantes et importantes sont les recherches récentes sur les équations différentielles linéaires ordinaires, dont l'intégration peut être ramenée à celle d'équations auxiliaires simples. On est arrivé à ce résultat très important que la théorie de chacune de ces équations dépend d'un certain groupe continu. Par suite, le problème de l'intégration d'une telle équation différentielle linéaire dépend de cette catégorie d'équations déjà citée, dont la solution générale s'exprime par une solution particulière au moyen des équations d'un groupe continu. C'est dans cette belle théorie des équations linéaires que l'on trouve avec les théories de Galois la plus grande analogie, le domaine de rationalité n'étant pas donné à l'avance.

Depuis quelque vingt ans, comme l'ont montré les exemples précédents, on a fait faire de grands progrès à un grand nombre de théories mathématiques en les rattachant à l'étude des groupes ; et il s'est trouvé, en règle générale, que, une fois les problèmes posés au point de vue de la théorie des groupes, les résultats connus conduisaient immédiatement aux plus grandes généralisations.

Nous voulons montrer la vérité de cette affirmation (bien que cela soit peut-être

superflu) par quelques exemples particulièrement instructifs. La théorie de Cayley sur les invariants, et la théorie de la déformation des surfaces, de Gauss et de Minding, envisagées au point de vue des groupes, ont conduit depuis longtemps à cette découverte capitale, que l'on peut développer pour chaque groupe continu défini par des équations différentielles une théorie d'équivalence qui opère, dans chaque cas particulier, avec un nombre limité d'invariants différentiels.

L'exemple suivant, quoique moins important, est d'un grand intérêt. Jacobi a montré que l'intégration de toute équation linéaire aux dérivées partielles $Xf = 0$, dont le multiplicateur est l'unité, était susceptible de simplification. Dans cette hypothèse, l'expression Xf représente la transformation infinitésimale la plus générale d'un groupe infini bien connu. On est dès lors conduit naturellement à se poser et à résoudre le problème général suivant : *Étant donné un groupe continu quelconque fini ou infini, on demande de ramener la transformation infinitésimale la plus générale du groupe à une forme canonique donnée, de la manière la plus simple, par une transformation du groupe.*

La théorie tout entière des équations aux dérivées partielles du premier ordre non linéaires n'est que la solution d'un cas particulier du problème précédent.

Enfin un autre exemple très intéressant est donné par les recherches récentes sur les équations différentielles à solutions fondamentales.

Il n'est pas moins intéressant de constater en terminant que les notions dues à Galois ont jeté une lumière inattendue sur la métaphysique des mathématiques, comme l'ont montré les dernières recherches sur les nombres complexes et sur les fondements de la géométrie. Des études, fondées sur la théorie des groupes, présentent sous un jour tout nouveau beaucoup de concepts fondamentaux des mathématiques, tels que ceux d'aire, de volume, de transformation projective, etc., en montrant en particulier comment ces notions sont en quelque sorte nécessaires.

Bien plus, si on se place au point de vue de la théorie des groupes, il est peut-être permis d'affirmer que les progrès et le développement de l'ensemble de la science mathématique, depuis ses origines jusqu'à ce jour, ne doivent pas être considérés, si j'ose dire, comme un pur effet du hasard.

Ayant vu combien les idées de Galois se sont peu à peu montrées fécondes dans tant de branches de l'analyse, de la géométrie et même de la mécanique, il est bien permis d'espérer que leur puissance se manifestera également en physique mathématique. Que nous représentent en effet les phénomènes naturels, si ce n'est une succession de transformations infinitésimales, dont les lois de l'univers sont les invariants ?

Sophus LIE.

Leipzig, le 17 novembre 1894.

« Dans ses recherches, Jordan utilise la géniale méthode de Galois, dont le point essentiel est l'introduction d'un certain nombre de substitutions, déjà aperçu par Lagrange, que l'on peut attacher à chaque équation algébrique et dans lequel les propriétés des équations se reflètent fidèlement. Mais pour savoir observer dans ce miroir, il faut avoir appris à distinguer les diverses qualités des groupes de substitutions et à raisonner sur elles. C'est ce qu'a fait Jordan avec une habile ténacité et un rare bonheur ; dans son *Traité des Substitutions et des Équations algébriques*, où il a réuni et coordonné ses recherches, les propriétés des équations dérivent tout de suite de celles des groupes de substitutions.

Les principales qualités des groupes qui servent à Jordan sont caractérisées par les qualificatifs transitif ou intransitif, primitif ou imprimitif, simple ou composé. Le théorème de Jordan sur la composition des groupes est le plus connu de tous ses résultats ; il entraîne cette conséquence fondamentale : il n'y a pas lieu de choisir entre les différents procédés de résolution algébrique d'une équation ; ils sont tous équivalents et conduisent aux mêmes calculs, à l'ordre près. Si les théorèmes de Jordan sur la transitivité et la primitivité sont moins connus, c'est que, jusqu'ici, les traités didactiques s'occupent seulement des propriétés générales des équations et non des problèmes d'Abel. Ils ne se proposent donc pas de préparer le lecteur à des calculs effectifs, ce qui est, au contraire, le but de Jordan. Aussi, quantité de renseignements ne peuvent-ils se trouver, aujourd'hui encore, que dans le *Traité des Substitutions* ».

Henri LEBESGUE (Ac. des Sciences, 4 juin 1923)

« C'est surtout dans la théorie des substitutions et des équations algébriques que Jordan laisse une trace profonde. Dans un Ouvrage considérable sur les *Substitutions*, il a fait une étude approfondie des idées de Galois, en y ajoutant des résultats fondamentaux sur les groupes primitifs, les groupes transitifs et les groupes composés, dont un des plus importants est relatif aux facteurs de composition d'un groupe. Ces études ont permis à Jordan de résoudre un problème posé par Abel, celui de rechercher les équations de degré donné résolubles par radicaux et de reconnaître si une équation rentre ou non dans cette classe ».

Émile PICARD (23 janvier 1922)

« Longtemps Jordan a travaillé dans une solitude presque totale. Rares étaient ceux qui pouvaient apprécier la valeur de son œuvre. Aujourd'hui ses travaux sont plus actuels que lorsqu'ils ont été écrits, on les voit dans leur vraie lumière et avec leur véritable portée. Dans cette lumière, Jordan nous apparaît, avec Galois et Sophus Lie, comme un des trois grands créateurs de la théorie générale des groupes. Cette reconnaissance de la valeur de ses méthodes et de ses résultats l'aurait certes réjoui, mais probablement pas surpris, car s'il était très modeste, il savait à coup sûr que son œuvre était solide et qu'elle porterait ses fruits dans l'avenir ».

Gaston JULIA (*Œuvres de Camille Jordan*, Préface, 1961)

« Jordan's monumental work of 667 pages *Traité des substitutions et des équations algébriques*, published in 1870 by Gauthier-Villars, is a masterpiece of mathematical architecture. The beauty of the edifice erected by Jordan is admirable ».

B.L. van der WAERDEN (*A History of Algebra*, Springer, 1985)



ÉDITIONS JACQUES GABAY
RÉIMPRESSION

TRAITÉ
DES SUBSTITUTIONS

IX

DES ÉQUATIONS ALGÈBRIQUES.

PAR M. CAMILLE JORDAN,

INGÉNIEUR DES MINES, DOCTEUR ÈS SCIENCES,
MEMBRE CORRESPONDANT DE LA SOCIÉTÉ ROYALE DES SCIENCES DE GÖTTINGUE ET DE L'INSTITUT LOMBARDE.



PARIS,

GAUTHIER-VILLARS, IMPRIMEUR-LIBRAIRE
DU BUREAU DES LONGITUDES, DE L'ÉCOLE IMPÉRIALE POLYTECHNIQUE,
SUCCESSION DE MALLET-BACHELIER,
Quai des Augustins, 55.

1870

(L'Auteur et l'Éditeur de cet Ouvrage se réservent le droit de traduction.)

Un volume br. (24 × 16) de XX-668 pages ; 1989

Cet ouvrage peut être obtenu chez votre libraire ou à la

LIBRAIRIE JACQUES GABAY

151 bis, rue Saint-Jacques — 75005 PARIS
Téléphone : (1) 43 54 64 64 — Télex : 203 521 F

ACHEVÉ D'IMPRIMER
EN JANVIER 1989
PAR L'IMPRIMERIE
DE LA MANUTENTION
A MAYENNE
N° 464-88

Dépôt légal : Janvier 1989



ÉDITIONS
JACQUES GABAY
RÉIMPRESSIONS

Paul APPELL

- *Traité de Mécanique rationnelle*
- Tome I, Statique - Dynamique du point*
- Tome II, Dynamique des systèmes*
Mécanique analytique
- Tome III, Équilibre et mouvement des milieux continus*
- Tome IV, I, Figures d'équilibre d'une masse homogène en rotation*
II, Les figures d'équilibre d'une masse hétérogène en rotation
Figures de la Terre et des planètes
- Tome V, Éléments de calcul tensoriel*
Applications géométriques et mécaniques

Ludwig BOLTZMANN

- *Leçons sur la théorie des gaz*

Emile BOREL

- *Leçons sur les séries divergentes*

Léon BRILLOUIN

- *Les tenseurs en mécanique et en élasticité*
- *La science et la théorie de l'information*

Louis de BROGLIE

- *Ondes et mouvements*

Elie CARTAN

- *Leçons sur la géométrie des espaces de Riemann*
- *Leçons sur la géométrie projective complexe*
- *Leçons sur la théorie des espaces à connexion projective*
- *La théorie des groupes finis et continus et la géométrie différentielle, traitées par la méthode du repère mobile*

Augustin-Louis CAUCHY

- *Cours d'Analyse de l'École Royale Polytechnique*
Analyse algébrique

Michel CHASLES

- *Aperçu historique sur l'origine et le développement des méthodes en géométrie*

R. DELTHEIL & D. CAIRE

- *Géométrie*
Transformations - Coniques
- *Compléments de géométrie*
Géométrie métrique - Géométrie projective
Géométrie anallagmatique

Joseph FOURIER

- *Théorie analytique de la chaleur*

Évariste GALOIS

- *Œuvres mathématiques*
Publiées en 1846 dans le « *Journal de Liouville* »

Carl Friedrich GAUSS

- *Disquisitiones Arithmeticae*
(traduction française)

Jacques HADAMARD

- *Leçons de géométrie élémentaire (2 vol.)*

Camille JORDAN

- *Cours d'Analyse de l'École Polytechnique (3 vol.)*
- *Traité des substitutions et des équations algébriques*

JOURNAL DE L'ÉCOLE POLYTECHNIQUE

- *Textes d'Ampère, Cauchy, Lagrange, Laplace, Legendre, Monge, Poisson...*

Stephen C. KLEENE

- *Logique mathématique*

Trajan LALESCO

- *La géométrie du triangle*

Henri LEBESGUE

- *Leçons sur les constructions géométriques*
- *Les Coniques*

A. LIAPOUNOFF

- *Problème général de la stabilité du mouvement*

André LICHNEROWICZ

- *Éléments de calcul tensoriel*

Ernst MACH

- *La Mécanique*
Exposé historique et critique de son développement

James Clerk MAXWELL

- *Traité d'Électricité et de Magnétisme*

John von NEUMANN

- *Les fondements mathématiques de la Mécanique quantique*

Julius PETERSEN

- *Méthodes et théories pour la résolution des problèmes de géométrie*

Henri POINCARÉ

- *Calcul des probabilités*
- *La Mécanique nouvelle*
Conférence (1909), Mémoire (1905) et Note (1905) sur la Théorie de la Relativité
- *Théorie du potentiel newtonien*
- *Théorie des tourbillons*
- *Théorie mathématique de la lumière*

Tome I,

Tome II, Nouvelles études sur la diffraction
Théorie de la dispersion de Helmholtz

- *Figures d'équilibre d'une masse fluide*
- *Électricité et Optique*

George POLYA

- *Comment poser et résoudre un problème*

Erwin SCHRÖDINGER

- *Mémoires sur la Mécanique ondulatoire*

Paul TANNERY

- *Pour l'histoire de la science hellène*
- *La géométrie grecque*

François TISSERAND

- *Traité de Mécanique céleste*
Tome I, Perturbation des planètes d'après la méthode de la variation des constantes arbitraires
- Tome II, Théorie de la figure des corps célestes et de leur mouvement de rotation*
- Tome III, Exposé d'ensemble des théories relatives au mouvement de la Lune*
- Tome IV, Théorie des satellites de Jupiter et de Saturne*
Perturbations des petites planètes
- *Leçons sur la détermination des orbites, avec une préface de H. Poincaré*

Diffusion-Distribution : JACQUES GABAY

151 bis, rue Saint-Jacques 75005 PARIS

Téléphone : (1) 43 54 64 64 - Télex : 203 521 F

ISBN 2-87647-052-7