

BULLETIN DE LA S. M. F.

E. GOURSAT

Sur le problème de Monge

Bulletin de la S. M. F., tome 33 (1905), p. 201-210

http://www.numdam.org/item?id=BSMF_1905__33__201_1

© Bulletin de la S. M. F., 1905, tous droits réservés.

L'accès aux archives de la revue « Bulletin de la S. M. F. » (<http://smf.emath.fr/Publications/Bulletin/Presentation.html>) implique l'accord avec les conditions générales d'utilisation (<http://www.numdam.org/conditions>). Toute utilisation commerciale ou impression systématique est constitutive d'une infraction pénale. Toute copie ou impression de ce fichier doit contenir la présente mention de copyright.

NUMDAM

Article numérisé dans le cadre du programme
Numérisation de documents anciens mathématiques

<http://www.numdam.org/>

SUR LE PROBLÈME DE MONGE (1);

Par M. E. GOURSAT.

La publication d'une Note récente de M. Zervos (*Comptes rendus*, 10 avril 1905) a ramené mon attention sur certains résultats, relatifs au problème de Monge, qui, quoique très incomplets, peuvent peut-être offrir quelque intérêt pour les mathématiciens qui s'occupent de ce genre de questions. Je les indiquerai rapidement.

1. Il est commode, pour faciliter les raisonnements et les énoncés, d'employer le langage de la Géométrie à n dimensions. Étant données $(n + 1)$ variables indépendantes x_1, x_2, \dots, x_{n+1} , nous dirons que tout système particulier de valeurs de ces variables représente les *coordonnées d'un point* dans l'espace à $(n + 1)$ dimensions. Nous continuerons à appeler *surface* toute variété à n dimensions située dans cet espace à $(n + 1)$ dimensions, et *courbe* toute variété à *une* dimension. Toute surface est représentée par une seule relation entre les coordonnées de ses points; si cette relation est linéaire, la surface sera appelée *surface plane* ou *plan*. De même, nous appellerons *droite* une variété linéaire à une dimension, c'est-à-dire l'ensemble des points dont les coordonnées X_i satisfont à n relations de la forme

$$(1) \quad \frac{X_1 - x_1}{a_1} = \frac{X_2 - x_2}{a_2} = \dots = \frac{X_{n+1} - x_{n+1}}{a_{n+1}};$$

x_1, x_2, \dots, x_n sont les coordonnées d'un point particulier de cette droite, a_1, a_2, \dots, a_{n+1} ses *paramètres directeurs*.

(1) Cette Note a été présentée à la Société Mathématique, dans la séance du 15 juin 1905. Une Note de M. Bottasso, sur le même sujet, a été présentée à l'Académie des Sciences dans la séance du 13 juin 1905.

Un plan P passant par un point de coordonnées $(x_1, x_2, \dots, x_{n+1})$

$$(2) \quad A_1(X_1 - x_1) + A_2(X_2 - x_2) + \dots + A_{n+1}(X_{n+1} - x_{n+1}) = 0$$

est, en général, déterminé, s'il doit contenir n droites passant par ce point $(x_1, x_2, \dots, x_{n+1})$; car les coefficients A_i doivent vérifier un système de n équations linéaires et homogènes.

Une droite D, passant par un point fixe M de coordonnées $(x_1, x_2, \dots, x_{n+1})$, et dont les paramètres directeurs dépendent de p variables arbitraires α_i ($p < n$), engendre une *variété conique* de sommet M. Si $p = 1$, nous dirons que cette variété conique à deux dimensions est un *cône* de sommet M. Tout cône de sommet M est, d'après cela, représenté par un système de $(n - 1)$ équations distinctes

$$(3) \quad f_i(x_1, x_2, \dots, x_{n+1}; X_1 - x_1, \dots, X_{n+1} - x_{n+1}) = 0 \\ (i = 1, 2, \dots, n - 1),$$

les f_i étant des fonctions homogènes des différences $X_i - x_i$. Si, dans les équations (1), les paramètres a_1, a_2, \dots, a_{n+1} sont fonctions d'une seule variable indépendante α , ces droites sont les *génératrices* d'un cône de sommet $M(x_1, x_2, \dots, x_{n+1})$, et à chaque valeur de α correspond une génératrice déterminée.

Étant donné un cône de sommet M, tout plan passant par M renferme un certain nombre de génératrices. Si, par exemple, les génératrices du cône sont représentées par les équations (1), a_1, a_2, \dots, a_{n+1} étant fonctions d'une variable indépendante α , les valeurs de α correspondant aux génératrices situées dans le plan (2) sont racines de l'équation

$$(4) \quad U(\alpha) = A_1 a_1 + A_2 a_2 + \dots + A_{n+1} a_{n+1} = 0.$$

On peut disposer des coefficients A_1, A_2, \dots, A_{n+1} de façon que ce plan ait en commun avec le cône n génératrices confondues avec une génératrice déterminée. Si α_0 est la valeur correspondante de la variable α , il faut et il suffit pour cela que α_0 soit une racine multiple d'ordre n de l'équation $U(\alpha) = 0$; on a ainsi n équations de condition

$$(5) \quad U(\alpha_0) = 0, \quad U'(\alpha_0) = 0, \quad \dots, \quad U^{(n-1)}(\alpha_0) = 0,$$

qui déterminent, en général, les rapports des coefficients A_i ,

A_2, \dots, A_{n+1} . Nous dirons que le plan ainsi obtenu est *osculateur* au cône (T) suivant la génératrice (α_0) . En éliminant α_0 entre les n équations (5), on arrive, en général, à $(n - 1)$ équations de condition homogènes par rapport à A_1, A_2, \dots, A_{n+1} ,

$$(6) \quad F_i(x_1, x_2, \dots, x_{n+1}; A_1, A_2, \dots, A_{n+1}) = 0 \quad (i = 1, 2, \dots, n - 1),$$

dépendant, en outre, des variables x_1, x_2, \dots, x_{n+1} , si les paramètres directeurs a_1, a_2, \dots, a_{n+1} dépendent non seulement de α , mais des coordonnées x_1, x_2, \dots, x_{n+1} du sommet. Nous dirons, pour abrégé, que les relations (6) sont les *équations tangentielles* du cône considéré de sommet $(x_1, x_2, \dots, x_{n+1})$.

Lorsque le cône est représenté par un système de $n - 1$ équations de la forme (3), les n équations (2) et (3) déterminent les génératrices du cône situées dans le plan P. On obtiendra encore les équations tangentielles du cône en exprimant que n de ces génératrices sont confondues. Par exemple, en éliminant $n - 1$ des rapports $\frac{X_2 - x_2}{X_1 - x_1}, \dots, \frac{X_{n+1} - x_{n+1}}{X_1 - x_1}$ entre les n relations (2) et (3), on arrive à une équation pour déterminer le dernier rapport, et cette équation devra avoir une racine multiple d'ordre n .

2. Réciproquement, tout système de $n - 1$ équations de la forme (6), homogènes par rapport à A_1, A_2, \dots, A_{n+1} , peut être considéré comme représentant les équations tangentielles d'un cône de sommet $(x_1, x_2, \dots, x_{n+1})$.

En effet, imaginons que des $(n - 1)$ équations (6) on ait tiré les valeurs de $(n - 1)$ des rapports $\frac{A_2}{A_1}, \dots, \frac{A_{n+1}}{A_1}$, en fonction de l'un d'eux α . Le plan P représenté par l'équation (2)

$$U(\alpha) = A_1(X_1 - x_1) + \dots + A_{n+1}(X_{n+1} - x_{n+1}) = 0$$

ne dépend plus que d'un paramètre variable α . Les n équations

$$(7) \quad U(\alpha) = 0, \quad U'(\alpha) = 0, \quad \dots, \quad U^{(n-1)}(\alpha) = 0$$

représentent, quand on donne à α une valeur particulière, une droite D passant par le point M $(x_1, x_2, \dots, x_{n+1})$. Lorsque α varie, cette droite D engendre un cône de sommet M, et, d'après la façon même dont on l'a obtenue, il est clair que le plan P a n génératrices communes avec ce cône qui sont confondues avec la

génératrice (α). En éliminant α entre les $(n - 1)$ équations (7), on aura donc les équations d'un cône de sommet M dont les équations (6) sont les équations tangentielles.

3. Considérons maintenant un système de k équations de Monge ($k \leq n - 1$),

$$(8) \quad f_i(x_1, x_2, \dots, x_{n+1}; dx_1, dx_2, \dots, dx_{n+1}) = 0, \quad (i = 1, 2, \dots, k).$$

les f_i étant des fonctions homogènes par rapport à dx_1, dx_2, \dots, dx_n . Le problème de l'intégration de ce système consiste à exprimer x_1, x_2, \dots, x_{n+1} explicitement en fonction d'une variable auxiliaire t , de $n - k$ fonctions arbitraires de ce paramètre et de leurs dérivées successives jusqu'à un ordre déterminé. Ce problème a été résolu par Monge dans le cas particulier où l'on a $n = 2$, $k = 1$. Nous allons examiner le cas où l'on a, n étant quelconque, $k = n - 1$.

Si, dans les $(n - 1)$ équations (8), on remplace dx_i par $X_i - x_i$, on a les équations d'un cône de sommet $(x_1, x_2, \dots, x_{n+1})$. A chaque point de l'espace à $(n + 1)$ dimensions les équations proposées font correspondre un cône (T) ayant son sommet en ce point, et le problème de Monge peut encore être formulé en ces termes :

Déterminer les courbes de l'espace à $n + 1$ dimensions qui sont tangentes en chacun de leurs points à l'une des génératrices du cône (T) ayant ce point pour sommet.

Écrivons l'équation d'un plan passant par le point $(x_1, x_2, \dots, x_{n+1})$ sous la forme

$$(9) \quad X_{n+1} - x_{n+1} = p_1(X_1 - x_1) + \dots + p_n(X_n - x_n);$$

les équations tangentielles du cône (T) de sommet $(x_1, x_2, \dots, x_{n+1})$ sont alors de la forme

$$(10) \quad F_i(x_1, x_2, \dots, x_{n+1}; p_1, p_2, \dots, p_n) = 0, \quad (i = 1, 2, \dots, n - 1).$$

Si l'on considère x_1, x_2, \dots, x_n comme n variables indépendantes, x_{n+1} comme une fonction de ces n variables, et p_1, p_2, \dots, p_n comme les dérivées partielles de x_{n+1} ($p_i = \frac{\partial x_{n+1}}{\partial x_i}$), les rela-

tions (10) forment un système de $(n - 1)$ équations aux dérivées partielles du premier ordre à une seule fonction inconnue. A tout système de $(n - 1)$ équations de Monge

$$(9') \quad f_i(x_1, x_2, \dots, x_{n+1}; dx_1, dx_2, \dots, dx_{n+1}) \quad (i = 1, 2, \dots, n - 1)$$

correspond ainsi un système (10) de $(n - 1)$ équations aux dérivées partielles simultanées du premier ordre, que nous appellerons le *système associé* du premier système (9).

4. Cela posé, il est facile de montrer que la méthode de Monge s'étend sans peine au cas où le système associé d'équations aux dérivées partielles (10) est *en involution*.

Soit, en effet,

$$(11) \quad V(x_1, x_2, \dots, x_{n+1}; a, b) = 0$$

une intégrale complète de ce système. Le plan tangent à l'une des surfaces intégrales S passant en un point donné $(x_1, x_2, \dots, x_{n+1})$ a pour équation

$$(12) \quad \frac{\partial V}{\partial x_1}(X_1 - x_1) + \dots + \frac{\partial V}{\partial x_{n+1}}(X_{n+1} - x_{n+1}) = 0,$$

les deux paramètres a et b étant liés par la relation (11). Ce plan ne dépend donc, en réalité, que d'un seul paramètre variable, et, d'après la façon dont on a déduit le système adjoint (10) du système (9'), le plan représenté par l'équation (12) reste osculateur au cône (T) de sommet $(x_1, x_2, \dots, x_{n+1})$ représenté par les équations

$$(13) \quad \begin{cases} f_i(x_1, \dots, x_{n+1}; X_1 - x_1, X_2 - x_2, \dots, X_{n+1} - x_{n+1}) = 0, \\ i = 1, 2, \dots, n - 1. \end{cases}$$

Pour déduire les équations (13) de l'intégrale complète (11), on pourrait donc procéder comme il suit. Regardons, pour fixer les idées, a comme un paramètre variable et b comme une fonction de ce paramètre définie par la relation (11). Les dérivées successives

$$b' = \frac{db}{da}, \quad b'' = \frac{d^2b}{da^2}, \quad \dots, \quad b^{(n-1)} = \frac{d^{n-1}b}{da^{n-1}}, \quad b^{(n)} = \frac{d^n b}{da^n}$$

Si $k = 1$, le système associé est de la forme

$$(20) \quad F_i(p_1, p_2, \dots, p_n) = 0, \quad i = 1, 2, \dots, n-1,$$

et par conséquent est en involution. Si k est > 1 , il suffira d'ajouter aux équations (19) $k-1$ équations de même forme, par exemple

$$\frac{dx_3}{dx_1} = \psi_1\left(\frac{dx_2}{dx_1}\right), \quad \dots, \quad \frac{dx_{k+1}}{dx_1} = \psi_{k-1}\left(\frac{dx_2}{dx_1}\right),$$

les fonctions $\psi_1, \psi_2, \dots, \psi_{k-1}$ étant arbitraires, pour être ramené au premier cas.

Les systèmes (19) ont été considérés par M. Darboux (*Journal de Mathématiques pures et appliquées*, 1887). La méthode précédente montre comment on peut rattacher l'intégration de ces systèmes à une théorie générale, tout à fait analogue à la théorie de Monge pour l'équation à trois variables.

6. Appliquons, par exemple, cette méthode à l'équation de Serret

$$(21) \quad dx_1^2 + dx_2^2 + dx_3^2 = dx_4^2.$$

Joignons à cette équation une relation de forme arbitraire

$$(22) \quad \frac{dx_3}{dx_1} = \varphi\left(\frac{dx_2}{dx_1}\right).$$

Les équations (21) et (22) forment un système de Monge, et les équations du cône (T) correspondant de sommet (x_1, x_2, x_3, x_4) sont

$$(23) \quad \begin{cases} (X_4 - x_4)^2 = (X_1 - x_1)^2 + (X_2 - x_2)^2 + (X_3 - x_3)^2, \\ \frac{X_3 - x_3}{X_1 - x_1} = \varphi\left(\frac{X_2 - x_2}{X_1 - x_1}\right). \end{cases}$$

Pour obtenir le système associé correspondant, formons l'équation qui donne les génératrices communes au cône (T) et au plan

$$X_4 - x_4 = p_1(X_1 - x_1) + p_2(X_2 - x_2) + p_3(X_3 - x_3);$$

on peut poser

$$\frac{X_2 - x_2}{X_1 - x_1} = \alpha, \quad \frac{X_3 - x_3}{X_1 - x_1} = \varphi(\alpha).$$

ce qui donne

$$\frac{X_4 - x_4}{X_1 - x_1} = p_1 + p_2 \alpha + p_3 \varphi(\alpha).$$

L'équation en α est alors

$$[p_1 + p_2 \alpha + p_3 \varphi(\alpha)]^2 = 1 + \alpha^2 + \varphi^2(\alpha),$$

ou

$$(24) \quad p_1 + p_2 \alpha + p_3 \varphi(\alpha) = \sqrt{1 + \alpha^2 + \varphi^2(\alpha)} = U(\alpha).$$

D'après la théorie générale, on aurait les équations du système associé d'équations aux dérivées partielles en éliminant α entre la relation (24) et les relations (25)

$$(25) \quad \begin{cases} p_2 + p_3 \varphi'(\alpha) = U'(\alpha), \\ p_3 \varphi''(\alpha) = U''(\alpha). \end{cases}$$

Il est inutile d'effectuer cette élimination, car on aura une intégrale complète de ce système en prenant le plan

$$X_4 = p_1 X_1 + p_2 X_2 + p_3 X_3 + b,$$

p_1, p_2, p_3 étant remplacées par leurs expressions tirées des formules (24) et (25), α et b étant des constantes arbitraires.

Remplaçons maintenant b par une seconde fonction arbitraire $\psi(\alpha)$; d'après le théorème général, les fonctions x_1, x_2, x_3, x_4 du paramètre α définies par les quatre équations

$$(26) \quad \begin{cases} x_4 = p_1 x_1 + p_2 x_2 + p_3 x_3 + \psi(\alpha), \\ 0 = p'_1 x_1 + p'_2 x_2 + p'_3 x_3 + \psi'(\alpha), \\ 0 = p''_1 x_1 + p''_2 x_2 + p''_3 x_3 + \psi''(\alpha), \\ 0 = p'''_1 x_1 + p'''_2 x_2 + p'''_3 x_3 + \psi'''(\alpha), \end{cases}$$

p'_i, p''_i, p'''_i étant les dérivées de p_i par rapport à α , doivent satisfaire à la relation proposée (21).

Il est facile de le vérifier. On déduit en effet des relations (24) et (25) que l'on a

$$(27) \quad \begin{cases} p_1 + p_2 \alpha + p_3 \varphi(\alpha) = U(\alpha), \\ p'_1 + p'_2 \alpha + p'_3 \varphi(\alpha) = 0, \\ p''_1 + p''_2 \alpha + p''_3 \varphi(\alpha) = 0. \end{cases}$$

D'un autre côté, en différentiant les relations (26), il vient

$$(28) \quad \begin{cases} dx_4 = p_1 dx_1 + p_2 dx_2 + p_3 dx_3, \\ 0 = p'_1 dx_1 + p'_2 dx_2 + p'_3 dx_3, \\ 0 = p''_1 dx_1 + p''_2 dx_2 + p''_3 dx_3. \end{cases}$$

Les relations (27) et (28) prouvent que l'on doit avoir

$$\frac{dx_1}{1} = \frac{dx_2}{\alpha} = \frac{dx_3}{\varphi(\alpha)} = \frac{dx_4}{U(\alpha)},$$

et comme l'on a

$$U^2(\alpha) = 1 + \alpha^2 + \varphi^2(\alpha),$$

il s'ensuit que l'on a aussi

$$dx_4^2 = dx_1^2 + dx_2^2 + dx_3^2.$$
