

Nouveaux développements en hyperstatique des systèmes articulés spatiaux

Autor(en): **Ansermet, Auguste**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Bulletin technique de la Suisse romande**

Band (Jahr): **96 (1970)**

Heft 10

PDF erstellt am: **22.07.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-70850>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Nouveaux développements en hyperstatique des systèmes articulés spatiaux

par Auguste ANSERMET, ing.-professeur

Généralités

L'hyperstatique des systèmes articulés a pris, au cours de ces dernières années, un tel développement qu'il a paru opportun de grouper les résultats obtenus à ce jour. Le présent texte tient compte dans une large mesure des recherches faites, à Lausanne par le professeur Mayor, et à Zurich par le professeur Stüssi ; il convient aussi de faire mention d'importantes publications ayant paru dans les *Mémoires de l'Association internationale des Ponts et charpentes*, sans revenir sur certaines controverses touchant à des droits de priorité.

La question des coupures

Quelques lignes seront consacrées à la question importante de la coupure de barres ; les deux éminents staticiens susmentionnés font l'un des coupures et l'autre pas. Les inconnues, il est vrai, ne sont pas les mêmes. Or, à l'époque, la Chaire de statique de Lausanne aurait pu faire des coupures ; elle préféra la solution remarquable qui fut reprise quarante ans plus tard dans la publication n° 104 de l'EPUL. Les inconnues sont les variations de coordonnées des nœuds, solution moderne. Mais l'auteur de la publication n° 104 eut la surprise de constater que le calcul par l'inversion des matrices de rigidité ne se prêtait pas bien pour déterminer les inconnues (Remarques, chiffre 3). Cela, les praticiens le savaient ; le but poursuivi par l'inversion est de déterminer les coefficients de poids des inconnues dont le rôle est connu. La publication n° 104 fut présentée à un groupe d'ingénieurs des Ponts et charpentes ; le conférencier a admis, semble-t-il, que la notion d'ellipse de déformation des nœuds était connue.

Il convient de remarquer que la notion fondamentale d'ellipsoïde de déformation est aussi appliquée aux systèmes statiquement *déterminés* en ayant recours à la théorie dite de l'équivalence (publication EPUL n° 80).

Solutions avec coupures

Tout en reconnaissant les avantages du calcul sans coupures de la chaire de Lausanne 1926, il faut admettre, si le problème doit être poussé à fond, que la solution avec coupures présente de l'intérêt. On le constata lors du calcul de la coupole du Reichstag sous forme généralisée, le texte ayant été traduit et les calculs vérifiés à Zurich. Pour certains nœuds, il y avait des ellipsoïdes de déformation et pour d'autres des ellipses.

En général, on se borne à faire un tel calcul pour les nœuds présentant le plus d'intérêt.

Le mieux, pour le calcul de certaines structures, est de confronter les résultats obtenus *avec* ou *sans* coupures. Ce contrôle est précieux et ne donne lieu qu'à une légère augmentation des frais.

Avant de poursuivre, il convient d'énumérer les notations utilisées, en laissant les indices de côté.

¹ Ce texte, qui fait suite à celui paru le 13 décembre 1969 dans le *Bulletin technique* n° 25, a reçu le patronage de l'Ecole polytechnique fédérale de Lausanne et bénéficie de l'appui du *Fonds national de la recherche scientifique*.

l, S	Longueurs et sections transversales des barres
E	Coefficients d'élasticité
Dx, Dy, Dz	Variations coordonnées des nœuds (Mayor)
dx, dy, dz	Variations coordonnées des nœuds après coupures
$a, b, c \dots$	Coefficients de ces variations inconnues
f	Termes absolus équations aux déformations (Mayor, $f = 0$)
p	Poids des barres à priori (proportionnels à $ES : l$)
P	Poids des barres à posteriori
v	Variations longueurs des barres (somme $p v =$ minimum)
m	Modules des barres (Mayor), inversement proportionnels aux p
T	Efforts axiaux dans les barres ($v = mT$)
M_r, M_i	Matrice rigidité du système et son inverse
M_o	Déformation quadratique moyenne relative à l'unité de poids
	$M_o^2 \cong \frac{\text{Somme } p v v}{\text{nombre barres surabondantes}}$

On sait que cette formule ne peut pas être démontrée rigoureusement. Pour les systèmes statiquement déterminés on a bien entendu $p = P$. Admettons $p = 1$ pour toutes les barres et, comme structure, un pylône à un sommet libre. Pour 3, 4, 5, 6 ... barres on a $P = 1, \frac{4}{3}, \frac{5}{3}, 2 \dots$. L'ellipsoïde au sommet est sphérique si la matrice de rigidité se réduit à trois éléments diagonaux égaux (voir *Bulletin technique* 13.12.1969).

Moyens de contrôle

On sait que les entreprises de constructions métalliques souhaitent un tel contrôle eu égard à leurs responsabilités. Un cas concret traité ci-après fait application d'un théorème connu en mathématiques appliquées.

La somme des quotients des poids p à priori par les poids P à posteriori est égale au nombre des inconnues (12 dans l'exemple ci-après).

Le calcul des poids à posteriori P présente de l'intérêt pour le staticien. Ces P sont les poids des binômes ($-f + v$) ; voir cas concret ci-après.

Ce mode de contrôle n'est pas le seul.

Cas de mauvaise détermination

Certains auteurs ont fait judicieusement remarquer que le déterminant principal des équations d'élasticité pouvait souvent atteindre des valeurs dangereusement petites ; l'influence des éléments diagonaux du déterminant n'est pas assez prépondérante.

Quand on choisit comme inconnues les variations de coordonnées des nœuds, il y a plus d'une manière de tourner la difficulté ; en effet, dans la publication EPUL n° 80 est développé un mode de calcul connu, dont le mérite revient au mathématicien Jacobi. Au dénominateur, lors du calcul des inconnues, on a une somme de termes ; chacun de ceux-ci est un déterminant au carré, ce qui exclut le cas de mauvaise détermination dans une large mesure.

Choix des poids et d'un mode de calcul

On sait que les staticiens ont de la chance : la détermination des poids p des barres ne donne pas lieu à des controverses ; en outre, lors de la formation des matrices

de rigidité, on constate si certains poids ne furent pas judicieusement choisis. Il est loisible de les modifier.

Le choix d'une solution est un problème complexe ; on peut :

1. Faire application de la représentation plane (Mayor).
2. Appliquer la théorie de l'équivalence dans certains cas.
3. Assimiler le problème à un calcul d'extrémum lié (peu fréquent).
4. Appliquer la solution avec coupures de F. Stüssi.
5. Appliquer la solution magistrale de Mayor.
6. Faire des coupures (voir cas concret ci-après), avec variations des coordonnées des nœuds.

Les statiens sont donc comblés, ce qui présente des avantages mais aussi des inconvénients. Cette dernière solution donne lieu à un nombre d'équations plus élevé que celui des inconnues ; on sait que c'est, mathématiquement, un problème-fleuve. Certains praticiens cherchent à éviter cette éventualité. Mayor tourna la difficulté avec habileté.

L'emploi de calculatrices électroniques

Ici les statiens ont moins d'avantages ; si l'on fait abstraction de l'inversion des matrices de rigidité, on ne peut pas dire que le calcul électronique soit particulièrement efficace. Sur les diverses solutions énumérées, il y en a une surtout qui se prête au calcul électronique, et encore partiellement. Le travail de programmation est parfois considérable. Le calcul des termes absolus des équations aux déformations est en général très laborieux, et là l'électronique n'est pas d'un grand secours ; il en est de même pour la détermination d'autres éléments essentiels (ellipsoïdes de déformation, poids à posteriori, etc.).

Mais surtout des statiens peuvent se trouver dans des régions éloignées sans calculatrice ; ils doivent se tirer d'affaire. Une solution générale comporte des conditions liant les inconnues, par exemple si certains nœuds doivent se déplacer sur des surfaces données (équations $4-V$ de Mayor) ; ce cas fut traité dans le *Bulletin technique* du 14 juin 1969. L'électronique joue peu de rôle ; il en est de même pour le calcul de M_o , élément dont l'importance sera reconnue toujours davantage.

Cas concret

Le choix a porté sur une coupole simple à 22 barres, dont 10 surabondantes ; il y a donc 12 inconnues. La solution de Mayor étant très connue, il a paru opportun de faire des coupures.

Nœuds libres	x	y	z
1	+ 1	0	1
2	0	- 1	1
3	- 1	0	1
4	0	+ 1	1

Nœuds fixes	x	y	z
5	+ 2	0	0
6	0	- 2	0
7	- 2	0	0
8	0	+ 2	0

Unité de mesure arbitraire.

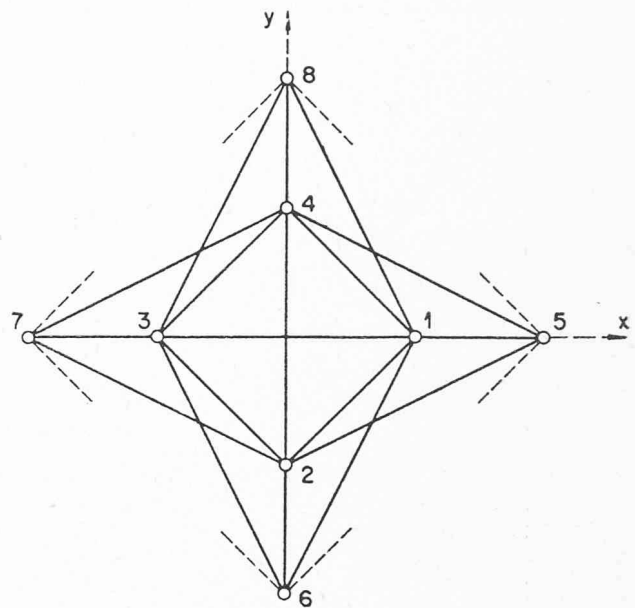


Fig. 1.

Inconnues :
 dx_1, dy_1, dz_1
 \dots
 dx_4, dy_4, dz_4

Longueurs des barres :
 1-5 = 1,414
 1-6 = 2,450
 1-7 = 3,162
 1-8 = 2,450
 etc.

En éliminant les 12 inconnues dans les 22 équations, on obtient 10 équations en $v_1, v_2, v_3 \dots$. Le problème prend le caractère d'un extrémum lié. On peut procéder autrement, surtout si le nombre de barres surabondantes est petit. L'électronique n'intervient guère.

On coupera par exemple les 4 contre-diagonales et 6 autres barres.

Poids p_i des barres ($i = 1, 2 \dots 22$)

Nœuds	1	2	3	4	5	6	7	8
1		0,80	0,70		1,27	1,00	1,00	1,00
2			0,80	0,70	1,00	1,27	1,00	1,00
3				0,80	1,00	1,00	1,27	1,00
4	0,80				1,00	1,00	1,00	1,27

Equation pour la barre $(x, y, z) - (x', y', z')$:

$$v = a(dx - dx') + b(dy - dy') + c(dz - dz') + f$$

(poids p) $a^2 + b^2 + c^2 = 1$.

Equations normales (dérivées de l'énergie) :

$$[pav] = 0, [pbv] = 0, [pcv] = 0 \dots$$

La matrice inverse fournit les coefficients de poids des inconnues.

Matrice de rigidité

$$\begin{bmatrix} [paa] & [pab] & [pac] & \dots & \dots & \dots \\ & [pbb] & [pbc] & [pbd] & \dots & \dots \\ & & [pcc] & [pcd] & [pce] & \dots \\ & & & [pdd] & [pde] & \dots \\ & & & & \dots & \dots \end{bmatrix}$$

Les termes absolus f sont fournis par le calcul du système fondamental (Grundsystem), lequel est arbitraire.

0,339	0	0	+ 0,079	+ 0,025	0	+ 0,083	0	0	+ 0,079	- 0,025	0
	0,535	0	+ 0,102	+ 0,079	0	0	- 0,008	0	- 0,102	+ 0,079	0
		0,935	0	0	0	0	0	0	0	0	0
			0,535	0	0	+ 0,079	- 0,102	0	- 0,008	0	0
				0,339	0	- 0,025	+ 0,079	0	0	+ 0,08	0
					0,935	0	0	0	0	0	0
						0,339	0	0	+ 0,079	+ 0,025	0
							0,535	0	+ 0,102	+ 0,079	0
								0,935	0	0	0
									0,535	0	0
										0	0
										0,339	0
											0,935

Symétrique

4 groupes de 3 éléments diagonaux
par nœud

Fig. 2.

Matrice inverse

Q_{xx}	Q_{xy}	Q_{xz}	...
	Q_{yy}	Q_{yz}	...
		Q_{zz}	...
			Q'_{xx}
			Q'_{xy}
			Q'_{xz}
			...
			Q'_{yy}
			Q'_{yz}
			...

Les Q_{xy} , Q_{xz} , Q_{yz} sont les non-quadratiques.

Tableau des coefficients a , b , c ... et poids p

Barres	a	b	c	p
1-5	- 0,707	0,00	+ 0,707	1,27
1-6	+ 0,408	+ 0,815	+ 0,408	1,00
1-7	+ 0,949	0,00	+ 0,316	1,00
1-8	+ 0,408	- 0,815	+ 0,408	1,00
	etc.		etc.	

} calcul
semi-
graphique

Les équations aux coefficients de poids comprennent 12 groupes de 12 équations avec les termes absolus. Il n'a pas paru nécessaire de donner les éléments de la matrice de rigidité.

termes
absolus

1 0 0 0 ...
0 1 0 0 ...
0 0 1 0 ...
.....

Pour la matrice inverse, le Centre de calcul électronique EPUL obtint les chiffres de la figure 2.

Les poids p furent calculés pour rendre nuls ou à peu près les coefficients non quadratiques Q_{xy} , Q_{xz} , Q_{yz} ...

On a maintenant tous les éléments pour calculer les ellipsoïdes de déformation (à Zurich : Formänderungsell^d, outre-Rhin : Verschiebungsell^d) ; il faudrait encore M_0 . Les staticiens doivent se familiariser avec cette notion.

Par la méthode aux forces il y aurait 10 inconnues seulement ; grâce aux calculatrices modernes cet élément d'appréciation joue peu de rôle.

Quant aux poids à posteriori P , dont le calcul est parfois laborieux, ils donnent lieu au contrôle final ci-après :

	p	$p : P$
Arêtes supérieures (1-2, 2-3, 3-4, 4-1)	0,8	$0,472 \times 4 = 1,89$
Diagonales face supérieure (1-3, 2-4)	0,7	$0,358 \times 2 = 0,716$
Arêtes (1-5, 2-6, 3-7, 4-8)	1,27	$0,810 \times 4 = 3,24$
Diagonales faces latérales (1-6, 2-5, . . .)	1,0	$0,572 \times 8 = 4,576$
Barres (1-7, 2-8, 3-5, 4-6)	1,0	$0,398 \times 4 = 1,59$

Somme $p : P = 12,01$

(calcul fait à la règle) (12 inconnues)

Les P sont les poids des $(-f + v)$.

Une fois de plus, les poids faibles sont amplifiés dans une plus forte mesure que les autres ; mais il y a des exceptions.

Quant aux longueurs des axes principaux des ellipsoïdes de déformation, elles sont proportionnelles à :

$$\sqrt{0,339} = 0,58 \quad \sqrt{0,535} = 0,73 \quad \sqrt{0,935} = 0,97$$

On évitera les ellipsoïdes de forme très défavorable.

En conclusion, on peut dire que la méthode dite aux forces, quoique simpliste, est parfois applicable ; on forme la matrice dite conjuguée (F. Stüssi).

La méthode B. Mayor, par la variation des coordonnées des nœuds, devient prépondérante ; mais sa variante, comportant des coupures de barres, traitée ci-dessus, présente aussi certains avantages. L'élément fondamental est la matrice de rigidité (Steifigkeitsmatrix). Et il ne faut pas sous-estimer les avantages résultant d'un double calcul : avec puis sans coupures des barres surabondantes. Le problème est alors poussé à fond tandis que des erreurs éventuelles de calcul sont évitées. Le surcroît de travail est justifié.

BIBLIOGRAPHIE

MAYOR, B. : *Statique graphique spatiale* (Payot, Lausanne, 1926).
 DUPUIS, G. : Publication EPUL n° 104.
 STÜSSI, F. : *Baustatik II* (Birkhäuser, Bâle).
 ANSERMET, A. : *Berechnung von Fachwerkkuppeln* (traduction chaire de statique, Zurich).
Mémoires Association internationale des Ponts et charpentes.
 Publications de MM. NARUOKA et LI (1962).

Adresse de l'auteur :
 Auguste Ansermet, Case postale 106, 1814 La Tour-de-Peilz.