

PROJET D'UNE TOUR EN FER

DE

300 MÈTRES DE HAUTEUR

DESTINÉE A L'EXPOSITION DE 1889

PAR **G. EIFFEL**

Depuis que mes collaborateurs MM. Nougier, Kœchlin et Sauvestre, ainsi que moi-même, nous avons saisi l'opinion publique d'un projet de tour en fer de 300 mètres de hauteur, destinée à l'Exposition de 1889, l'idée a fait son chemin.

Une grande partie de la presse française et étrangère, scientifique ou politique, s'en est occupé, et il y a peu de personnes qui ne connaissent aujourd'hui ce projet dans ses lignes principales.

Il nous a attiré à l'origine des critiques assez vives, surtout au point de vue de l'utilité d'une pareille construction, mais nous avons aussi recueilli des adhésions et des encouragements, venant d'hommes considérables, qui nous permettent d'avoir maintenant confiance dans la mise à exécution de ce projet.

Actuellement la question se trouve bien posée; les différentes objections qui pouvaient se produire se sont manifestées, comme aussi l'indication des applications réellement possibles; et le moment est venu d'exposer à la Société, pour la première fois sous une forme technique, le projet qu'elle connaît dans son ensemble et que nous avons étudié dans ses détails.

L'idée en elle-même n'est pas nouvelle : sans qu'il soit besoin de remonter à la tour de Babel, nous rappellerons qu'une tour de mille

pieds avait été proposée en 1874, pour l'Exposition de Philadelphie; nous ne savons pour quelles raisons elle n'a pas été exécutée.

En 1881, M. Sébillot proposa d'éclairer Paris par un foyer électrique placé à 300 mètres de hauteur. Cette idée, sur l'utilité pratique de laquelle nous n'avons pas à nous expliquer ici, n'a eu aucune suite jusqu'à présent.

Cependant, après les études que nous eûmes l'occasion de faire sur de hautes piles métalliques supportant les viaducs de chemin de fer, comme celui de Garabit, nous fûmes conduits à penser que l'on pouvait donner à celles-ci, sans difficultés très considérables, des hauteurs bien plus grandes que celles qui avaient été réalisées jusqu'ici.

§ 1^{er}. — **Considérations générales sur l'exécution des hautes piles métalliques.**

La principale difficulté que l'on rencontre pour l'établissement de ces hautes piles métalliques est celle-ci :

Dans le mode habituel de construction, on dispose dans le plan des grandes faces normales à l'axe du viaduc un système de treillis très énergique destiné à résister à l'action du vent; la base des piles venant naturellement à s'élargir en raison de l'augmentation de la hauteur, ces barres de treillis, par suite de leur grande longueur, deviennent d'une efficacité à peu près illusoire.

On peut bien leur donner la forme de caissons, ainsi que nous en avons les premiers fait l'application, de manière à ce que chacune d'elles soit susceptible de travailler aussi bien à la traction qu'à la compression; mais néanmoins elles restent un grand sujet de difficulté, si l'écartement des pieds de la pile atteint 25 ou 30 mètres. Il y a donc grand avantage à se débarrasser complètement de ces pièces accessoires, dont le poids devient relativement très élevé et à donner à la pile une forme telle que tous les efforts tranchants viennent se concentrer dans ses arêtes, et ce, en la réduisant à quatre grands montants dégagés de tout treillis de contreventement, et réunis simplement par quelques ceintures horizontales très espacées.

S'il s'agit d'une pile supportant un tablier métallique et si l'on ne tient compte que de l'effet du vent sur le tablier lui-même, lequel est toujours très considérable par rapport à celui exercé sur la pile, il suffira, pour

pouvoir supprimer les barres de contreventement des faces verticales, de faire passer les deux axes des arbalétriers par un point unique placé sur le sommet de cette pile.

Il est évident, dans ce cas, que l'effort horizontal du vent pourra se décomposer directement suivant les axes de ces arbalétriers et que ceux-ci ne seront soumis à aucun effort tranchant.

Si, au contraire, il s'agit d'une très grande pile, telle que notre tour actuelle, dans laquelle il n'y a plus au sommet la réaction horizontale du vent sur le tablier, mais simplement l'action du vent sur la pile elle-même, les choses se passent différemment et il suffit, pour supprimer l'emploi des barres de treillis, de donner aux montants une courbure telle que les tangentes à ces montants, menées en des points situés à la même hauteur, viennent toujours se rencontrer au point de passage de la résultante des actions que le vent exerce sur la partie de la pile qui se trouve au-dessus des points considérés.

Enfin, dans le cas où l'on veut tenir compte, à la fois de l'action du vent sur le tablier supérieur du viaduc, et de celle exercée sur la pile elle-même, la courbe extérieure de la pile se rapproche sensiblement de la ligne droite.

Une haute pile de viaduc, telle que nous la concevons, serait donc ainsi simplement constituée par quatre montants d'angle, en forme de caissons. Les parois en seraient évidées afin de diminuer la surface offerte au vent. — La base, dont le rapport avec la hauteur serait aussi grand qu'on le désirerait, permettrait de donner à la construction toute la stabilité désirable.

Nous avons étudié dans cet ordre d'idées une grande pile de viaduc de 120 mètres de hauteur et de 40 mètres de base, aux avantages pratiques de laquelle nous croyons fermement et que nous espérons bien avoir un jour l'occasion d'appliquer à un grand ouvrage.

§ 2. — Description sommaire des dispositions de la tour en fer de 300 mètres.

C'est l'ensemble de ces recherches qui nous a conduits à étudier une tour ou pylône, atteignant la hauteur tout à fait inusitée de 300 mètres.

Voici sommairement la description de cette tour :

L'ossature se compose essentiellement de quatre montants formant

les arêtes d'une pyramide à faces courbes; chaque montant offre une section carrée décroissant de la base au sommet et forme un caisson courbe à grands treillis ayant 15 mètres de côté à la base et 5 mètres au sommet.

L'écartement des pieds des montants est de 100 mètres d'axe en axe; ces montants reposent sur de solides massifs de fondations dans lesquels, pour donner un excès de stabilité, ils viennent s'ancrer.

Au premier étage, c'est-à-dire à 70 mètres environ au-dessus du sol, les montants sont réunis par une galerie vitrée de 15 mètres de largeur faisant le tour de la construction.

Cette galerie, d'une surface de 4200 mètres carrés y compris les balcons, servirait de lieu de réunions, soit pour des restaurants, soit pour différents services dont nous parlerons plus loin.

Au deuxième étage est une salle carrée, également vitrée, de 30 mètres de côté.

Au sommet est installée une coupole vitrée avec balcon extérieur de 250 mètres carrés, d'où l'on découvrira le magnifique panorama de 120 kilomètres d'étendue qui se développera sous les yeux des spectateurs; on pourra procéder sur cette terrasse à des observations et à des expériences scientifiques, ou y installer un foyer électrique destiné à l'éclairage de l'Exposition.

A la partie inférieure de la tour et dans chacune des faces est une arche grandiose de 80 mètres d'ouverture et de 50 mètres de hauteur qui, par son bandeau largement ajouré et par ses tympan portant des ornements de colorations diverses, forme le principal élément de la décoration.

La circulation des visiteurs s'établirait par des ascenseurs disposés dans l'intérieur des montants.

§ 3. — Conditions de résistance et de stabilité de la tour; effets du vent; fondations; flèche au sommet.

J'arrive maintenant aux conditions de résistance :

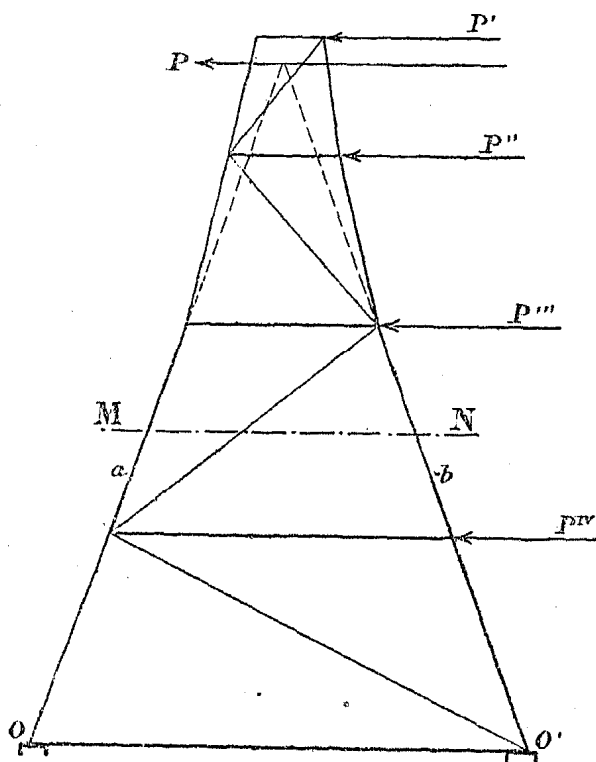
La décomposition des efforts dus au vent s'établit d'après les principes que nous avons posés précédemment.

Supposons, pour un instant, que nous ayons disposé dans les faces

un treillis simple formant une paroi résistant aux efforts tranchants du vent dont les composantes horizontales sont :

$$P', P'', P''', P''''.$$

On sait que pour calculer les efforts agissant dans les trois pièces coupées par un plan MN, il suffit de déterminer la résultante P de toutes les forces extérieures agissant au-dessus de la section, et de décomposer cette résultante en trois forces passant par les pièces coupées.



Si la forme du système est telle que, pour chaque coupe horizontale MN, les deux arbalétriers prolongés se coupent sur la force extérieure P, les efforts dans la barre de treillis seront nuls et l'on pourra supprimer cette barre.

C'est l'application de ce principe qui constitue une des particularités de notre système, et que nous croyons intéressant de signaler à l'attention de la Société.

On arrive de cette façon à ce que la direction de chacun des éléments des montants s'infléchit suivant une courbe tracée sur l'épure (fig. 1, pl. 91), et en réalité la courbe extérieure de la tour reproduit, à une échelle déterminée, la courbe même des moments fléchissants dus au vent.

L'incertitude qui existe sur les effets du vent et sur les données à adopter, tant pour l'intensité même que pour la valeur des surfaces frappées, nous a conduit à nous mettre dans des conditions de prudence particulières.

En ce qui concerne l'intensité, nous avons admis deux hypothèses : l'une qui suppose que le vent a sur toute la hauteur de la tour une force constante de 300 kilogrammes par mètre carré ; l'autre que cette intensité va en augmentant de la base, où elle est de 200 kilogrammes, jusqu'au sommet, où elle atteint 400 kilogrammes.

Quant aux surfaces frappées, nous n'avons pas hésité, malgré son apparente exagération, à admettre l'hypothèse que, sur la moitié supérieure de la tour, tous les treillis du caisson étaient remplacés par des parois pleines ; que sur la partie intermédiaire, où les vides prennent plus d'importance, chaque face antérieure était comptée à quatre fois la surface réelle des fers ; au-dessous (galerie du premier étage et parties supérieures des arcs), nous comptons la surface antérieure comme pleine ; enfin, à la base de la tour, nous comptons les montants comme pleins et frappés deux fois par le vent.

Ces hypothèses sont plus défavorables que celles qui sont généralement adoptées pour les viaducs.

Avec ces surfaces, nous avons fait les calculs dans l'une et l'autre hypothèse de répartition de l'intensité du vent, et on peut voir, d'après l'épure, que les deux polygones funiculaires auxquels on arrive sont à peu de chose près identiques.

Dans l'hypothèse d'un vent uniforme de 300 kilogrammes sur toute la hauteur, l'effort horizontal total sur la construction est de 3 284 tonnes, et le centre d'action est situé à 92^m,30 au-dessus de l'appui. Le moment de renversement est donc de :

$$M_r = 3\,284 \times 92^{\text{m}},30 = 303\,113 \text{ tonnes mètres.}$$

Quant au moment de stabilité, le poids total de la construction est le suivant :

Métal.	4 800 tonnes.
Planchers hourdés 5 500 ^m ² à 300 ^k	1 650 —
Divers.	50 —
	<hr/>
Total.	6 500 tonnes.

La base de la tour étant de 100 mètres, le moment de stabilité sera de :

$M_s = 6\,500' \times \frac{100}{2} = 325\,000$ tonnes mètres, qui est supérieur au moment de renversement.

Dans la deuxième hypothèse, celle d'un vent variant de 200 à 400 kilogrammes, l'effort horizontal total n'est plus que de 2 874 tonnes, mais le centre d'action s'élève à 107 mètres au-dessus de l'appui, le moment de renversement est donc de :

$$M_r = 2\,874 \times 107 = 307\,518 \text{ tonnes mètres.}$$

Ce chiffre est presque identique à celui de la première hypothèse et reste inférieur au moment de stabilité.

Mais nous pouvons augmenter encore notablement le degré de sécurité en amarrant chacune des quatre membrures des montants au massif du soubassement au moyen de trois tirants de 0^m,41 de diamètre qui intéresseront un cube de maçonnerie suffisant pour doubler le coefficient de sécurité.

Relativement aux fondations, il suffit de donner quelques chiffres pour montrer qu'elles seront très faciles à exécuter.

Elles sont ainsi constituées :

Chacune des membrures d'angle s'appuie sur un massif carré en maçonnerie ordinaire de 6 mètres de hauteur et de 8 mètres de côté, reposant sur une base en béton de 4 mètres d'épaisseur et de 9 mètres de côté.

Ces massifs qui sont traversés par des amarrages d'une longueur de 8 mètres, sont reliés les uns aux autres par un mur de 1 mètre d'épaisseur, et il reste entre eux une grande salle vitrée d'environ 250 mètres carrés, qui sera utilisée pour les accès aux ascenseurs et l'installation des machines.

Dans ces conditions, la charge sur le sol de fondation, dans le cas du vent de 300 kilogrammes, sera la suivante :

1° Charge due au montant métallique :

Pour la charge propre.	$\frac{6\,500}{4} = 1\,625$	tonnes.	}	3 162 tonnes.
Pour l'effet du vent..	$\frac{307\,518}{2 \times 100} = 1\,537$	—		

2° Charge due aux maçonneries. 5 400 —

Ensemble. 8 562 tonnes.

qui se répartissent sur une surface de 324 mètres carrés, soit par centimètre carré :

$$\frac{8\ 562\ 000}{3\ 240\ 000} = 2^k,6 \text{ en moyenne}$$

et 4^k,50 sur l'arête la plus comprimée.

Enfin, quant au travail maximum du fer, nous ferons observer qu'il doit être établi en vue d'un vent de 300 kilogrammes, lequel est tellement exceptionnel qu'il n'y en a pas encore d'exemple à Paris, et nous fixerons ce coefficient de travail à 10 kilogrammes, ce qui, dans les circonstances ordinaires des vents à Paris, correspondra à un travail effectif de 6 à 7 kilogrammes.

Du reste, ce coefficient de 10 kilogrammes est usuel en Allemagne et en Autriche pour les grandes charpentes métalliques qui ne sont pas soumises, comme les ponts, aux trépidations dues aux trains.

Nous l'avons appliqué nous-même, et d'une manière générale, à la gare de Buda-Pest, et, en France, les compagnies de chemins de fer l'appliquent aussi pour les grandes charpentes.

La part du coefficient total, due aux charges propres, est dans notre tour, de 5 kilogrammes, et la part due au vent de 300 kilogrammes est de 5 kilogrammes également, laquelle se réduira à 1 ou 2 kilogrammes pour les vents violents ordinaires à Paris.

Je dois parler aussi de la flèche que peut prendre une tour de cette nature sous l'influence du vent : la question a de l'intérêt, non pas au point de vue de la flèche qui peut se produire dans les limites extrêmes des vents de 300 et 400 kilogrammes, dont on n'a pas à s'inquiéter, puisque le sommet de la tour n'est plus alors abordable, mais il est bon de s'en rendre compte pour le cas des vents violents ordinaires, afin de savoir si les personnes qui seraient sur la plate-forme supérieure, pourraient s'en trouver incommodées.

Si l'on prend les classifications des vents indiqués dans l'ouvrage de Claudel, et si l'on calcule les flèches qui correspondent aux pressions indiquées, on reconnaît que ces flèches sont les suivantes :

TABLEAU des flèches sous différents vents.

DÉSIGNATION DES VENTS	VITESSE par seconde	PRESSION par mètre carré	FLÈCHES prises par la tour
	mètres	kil.	mètres
Très forte brise.	10.00	13.54	0.038
Brise faisant serrer les hautes voiles	12.00	19.50	0.055
Vent très fort	15.00	30.47	0.086
Vent impétueux.....	20.00	54.16	0.153
Tempête.....	24.00	78.00	0.221

Ces chiffres sont tout à fait rassurants, et comme les oscillations seront d'une extrême lenteur, en raison de la grande longueur de la partie fléchissante, il est certain que l'effet en sera tout à fait insensible, et qu'il sera beaucoup moindre que dans les phares en maçonnerie, où l'élasticité des mortiers est la cause la plus déterminante des flèches observées.

§ 4. — **Ascenseurs.**

Quant au système des ascenseurs à installer dans la tour et qui seront de dimensions inaccoutumées, nous nous sommes adressés à M. Heurtebise qui proposerait le moyen suivant, lequel nous paraît tout à fait acceptable et de nature à assurer d'une façon complète la sécurité.

Le système bien connu d'ascenseur hydraulique à compensateur de ce constructeur actionnerait deux tiges articulées régnant sur toute la hauteur de la tour et placées dans l'intérieur d'un des quatre montants dont elles suivraient la courbure.

Chacune de ces tiges recevrait de 30 mètres en 30 mètres (course des pistons hydrauliques) des cabines qui viendraient, grâce à un mouvement

alternatif donné aux tiges, se mettre l'une en face de l'autre à chaque fin de course; à ce moment se produirait un arrêt d'une durée d'une demi-minute environ, pendant laquelle la cabine inférieure se remplirait; chaque cabine intermédiaire céderait ses voyageurs à la cabine d'en face, et la cabine supérieure laisserait ses voyageurs sur la plate-forme de la tour.

Un second ascenseur semblable servirait à la descente.

Ce système présenterait une sécurité absolue et permettrait l'ascension simultanée d'un grand nombre de personnes, avec des départs continus.

Pour ne pas donner aux cabines une vitesse trop grande dont le sentiment est très désagréable à la plupart des personnes, on ne dépasserait pas 50 centimètres par seconde; de sorte que l'ascension des 30 mètres formant en quelque sorte l'étage, se ferait en une minute; en comptant une demi-minute pour l'arrêt, on arrive à une minute et demie par chaque 30 mètres de hauteur, soit 15 minutes pour l'ascension complète.

Chaque cabine pouvant contenir 10 personnes, et les départs ayant lieu toutes les *minutes et demie*, on peut ainsi monter par heure 400 personnes.

La dépense totale de cet appareil peut s'élever à 200 000 francs, non compris les machines-motrices, et à 250 000 francs y compris celles-ci.

§ 5. — Application de la tour à l'éclairage électrique de l'Exposition.

La tour, au moins pendant l'Exposition, pourra porter à son sommet un foyer électrique destiné à éclairer l'Exposition, et à répandre dans le parc et les jardins une lumière générale d'un aspect agréable.

En prenant comme surface à éclairer un cercle de 1 000 mètres de diamètre, et en se posant la condition que l'éclairage soit tel que l'on puisse y voir suffisamment pour lire un imprimé, MM. Sautter et Lemonnier, les constructeurs bien connus de phares électriques, tout en trouvant que ce n'est pas le meilleur moyen d'utiliser la lumière, estiment que le foyer placé au sommet de la tour devrait être de 3 000 ampères. Ils se fondent, pour cette évaluation, sur l'expérience de l'éclairage des quais de Rouen, pour lesquels un foyer placé à 13 mètres de hauteur, d'une intensité de 24 ampères, éclairait convenablement un cercle de 130 mètres de diamètre.

Dans notre cas, la distance du foyer au centre de figure étant environ

10 fois plus grande qu'à Rouen, il faudrait un foyer 100 fois plus puissant; mais comme il faut tenir compte de l'absorption par l'atmosphère, la source lumineuse devra être de 125×24 , soit 3 000 ampères, laquelle exigera, pour sa production, une force de 400 à 500 chevaux.

Or, un foyer de 90 ampères est, jusqu'à présent, le maximum pratique que l'on puisse obtenir avec une seule lampe.

Il faudrait, au maximum, 33 lampes; mais il est préférable d'en supposer 48 d'inégales intensités, qu'on disposerait autour de la lanterne supérieure, suivant trois étages et éclairant trois zones concentriques.

Avec des foyers à courants continus on n'a pas à se préoccuper outre mesure de rabattre la lumière vers le sol, puisque l'expérience a démontré que presque tous les rayons sont naturellement projetés de bas en haut dans un cône dont les génératrices sont inclinées d'environ 45 degrés avec la verticale; mais il faut concentrer la lumière de chaque lampe de manière à ce qu'elle produise son maximum d'intensité dans la fraction de zone qu'elle doit éclairer, et, à cet effet, le meilleur moyen à employer est de munir chaque foyer d'un appareil optique spécial orienté d'une façon différente pour chacun d'eux.

§ 6. — Prix de l'ouvrage.

Relativement au prix de notre tour, les mètres donnent un poids de métal de. 4 810 tonnes réparti comme suit :

Montants, avec leurs entretoisements.	3 500	—
Galerie du 1 ^{er} étage = $70^m \times 15^m \times 4$	= 4 200 ^{m²} .	
Salle du 2 ^e étage = $30^m \times 30^m$	= 900 ^{m²} .	
	<hr/>	
	5 110 ^{m²} .	
A 100 kilogrammes.	510	—
Salle supérieure et plate-forme de 100 ^{m²}	100	—
Amarrages	100	—
Quatre arcs doubles à la base.	600	—
	<hr/>	
Total.	4 810	tonnes

qui, à 50 centimes par kilogramme mis en place, donnent. 2 405 000 fr.

Le détail estimatif des fondations et des maçonneries
du massif s'élève à. 400 000

Les divers travaux complémentaires de vitrerie, couver-
tures des salles, etc., sont estimés à. 100 000

Le total de la construction proprement dite est donc de. 2 905 000 fr.
auquel il faudra ajouter le prix des ascenseurs, qui, d'après l'estimation
faite par M. Heurtebise, s'élève à 250 000 francs, y compris les machines
nécessaires.

Le total de la dépense est donc de 3 155 000 francs¹.

Tel serait le prix réel d'une pareille construction, dont les estimations
publiées en dehors de nous ont été très exagérées.

Il est évident d'ailleurs qu'il n'y a pas lieu d'y faire entrer le prix du
terrain, attendu que s'il s'agit d'établir cet édifice au Champ de Mars,
sur l'Esplanade des Invalides, ou sur tout autre point de l'Exposition, il
n'y aura pas à payer le terrain occupé.

Nous remarquerons, du reste, qu'il n'y a réellement que la surface
occupée par les quatre massifs de soubassement, qui aliène d'une ma-
nière effective le terrain sur lequel l'édifice reposera. Dans tout le reste
de la surface, on pourra établir soit des constructions, soit des squares
à l'usage du public.

Je ne crois pas qu'après les détails que je viens de donner sur la con-
stitution du projet, il puisse se présenter quelques doutes sur la facilité
avec laquelle se feraient le montage et la mise en place.

Je retrouverais là l'occasion d'appliquer à nouveau, — en les approp-
riant aux circonstances et en profitant des amarrages inférieurs des
montants, — les procédés de montage en porte à faux que j'ai souvent

1. Nous avons cherché ce que deviendrait la dépense dans le cas d'une réduction dans
la hauteur et nous avons étudié deux autres tours, l'une de 250 mètres, l'autre de 200
mètres. Cette dernière resterait encore le plus haut monument connu.

Les mêmes éléments du devis, appliqués à ces deux projets, donneraient les prix suivants,
qui comprennent les fondations et les ascenseurs :

Tour de 250 mètres de hauteur et 85 mètres de base.....	2 000 000 fr.
Tour de 200 mètres de hauteur et 70 mètres de base.....	1 400 000 fr.

Dans le cas où l'une de ces tours serait, après la durée de l'Exposition, transférée en un
point plus élevé de Paris, les dépenses relatives à ce déplacement seraient de :

Pour la tour de 250 mètres.....	500 000 fr.
Et pour celle de 200 mètres.....	375 000 fr.

employés déjà, notamment aux ponts du Douro, de Garabit et de Cubzac, etc.

L'expérience de ces travaux me permet d'affirmer que ce montage n'exigerait pas plus d'une année.

§ 7. — **Choix de la matière : fer ou acier ?**

Avant d'aller plus loin et d'indiquer les services que pourrait rendre une pareille construction, il y a quelques mots à dire sur l'emploi de la matière que nous avons choisie.

L'emploi du fer ou de l'acier semble tout indiqué par la grande résistance du métal sous un faible poids, par le peu de surface qu'il permet d'exposer au vent, enfin par son élasticité qui solidarise toutes les pièces et permet d'en faire un ensemble dont toutes les parties sont susceptibles de travailler à l'extension ou à la compression et, qui étant toutes calculables, donnent une sécurité complète.

Quant à la préférence que nous avons, dans notre projet, donnée au fer sur l'acier, nous avons longtemps hésité ; cependant, comme dans le cas actuel il est peu important d'avoir une légèreté particulière, laquelle au point de vue de la résistance au vent est plutôt nuisible qu'utile, comme avec ces grandes dimensions la résistance au flambage est pour la plupart des pièces un élément prédominant, et enfin comme avec l'acier travaillant à un coefficient plus élevé que le fer on aurait des flèches et des vibrations plus grandes sous l'effet du vent, nous nous sommes décidés à donner la préférence au fer. Mais cependant ce n'est que l'étude détaillée et définitive qui, en tenant compte de la question de la dépense, et des cours comparatifs des deux métaux, fixera sur l'emploi soit du fer soit de l'acier, et nous réservons notre choix jusqu'à ce moment.

Enfin le métal présente un avantage particulier : c'est que la construction est *amovible* et qu'il permet, sans frais excessifs, le déplacement de la tour dans le cas où, pour une cause quelconque, on jugerait utile de la transporter en un point de Paris autre que l'Exposition. Nous évaluons la dépense de ce déplacement de 6 à 700 000 francs.

§ 8. — **Emploi de la maçonnerie.**

En dehors du métal, nous avons voulu nous rendre compte de ce que donnerait l'emploi des maçonneries, et nous avons étudié deux solutions, l'une dans laquelle on combinerait la maçonnerie avec le fer, l'autre qui comporterait un emploi exclusif de la maçonnerie. Nous dirons de suite que ces deux solutions nous ont paru, après examen, très inférieures à celle qui emploie le métal seul, sinon même tout à fait irréalisables.

En essayant de combiner l'emploi du fer avec la maçonnerie on rencontre tous les inconvénients d'une solution mixte dans laquelle entrent des éléments tout à fait hétérogènes comme élasticité, résistance ou dilatation, et sans insister davantage, il nous suffira de dire que nous nous sommes heurtés à des difficultés telles qu'elles ne nous ont pas permis d'arriver à un projet possible.

Par l'emploi de la maçonnerie seule, nous ne croyons pas non plus qu'on arrive à une possibilité d'exécution, à moins qu'on ne veuille mettre de côté toute question de prix.

Voici quelques développements très sommaires à ce sujet.

La première chose dont il y ait lieu de se préoccuper est le coefficient de résistance par centimètre carré à adopter.

En effet, ce ne sont pas les considérations du renversement par l'effet du vent qui doivent être prédominantes dans l'étude d'un grand ouvrage en maçonnerie, mais surtout celles qui sont relatives à la résistance même.

En outre il faut faire entrer dans cette recherche une considération capitale, sans laquelle on serait tout à fait en erreur, si on calculait la hauteur possible d'un édifice d'après la seule résistance de la pierre employée à sa construction, comme s'il était un monolithe, et si l'on supposait qu'avec du porphyre ou du granit on pourrait établir pratiquement une tour plus haute qu'avec une bonne pierre calcaire.

En effet, si l'on ne veut pas faire de simples conceptions mathématiques, et si l'on veut rester dans la réalité des faits, laquelle consiste dans l'édification d'un *grand ouvrage* dans lequel les matériaux travaillent à une *très forte charge*, il ne faut pas oublier que ces matériaux ne seront pas simplement superposés les uns aux autres par des surfaces plus ou moins bien dressées. Ils seront inévitablement séparés par des

lits de mortiers destinés à assurer la répartition convenable des pressions.

La stabilité de l'ouvrage exige donc que ce mortier ne s'écrase pas; aussi ce qu'il faut faire entrer en ligne de compte pour l'exécution d'une telle maçonnerie, c'est la limite de l'écrasement du mortier, bien plutôt que celle de la pierre, laquelle, considérée seule, conduirait à des apparences de possibilité d'exécution tout à fait trompeuses, et a fait croire comme limite *pratique* à des hauteurs tout à fait fantastiques.

La condition nécessaire est que les matériaux employés soient plus résistants que le mortier, leur excédent de résistance ne servant qu'à donner un excédent de sécurité qui échappe à l'évaluation.

Or, les ouvrages classiques indiquent pour les mortiers en ciment des résistances maxima de 150 à 200 kilogrammes par centimètre carré.

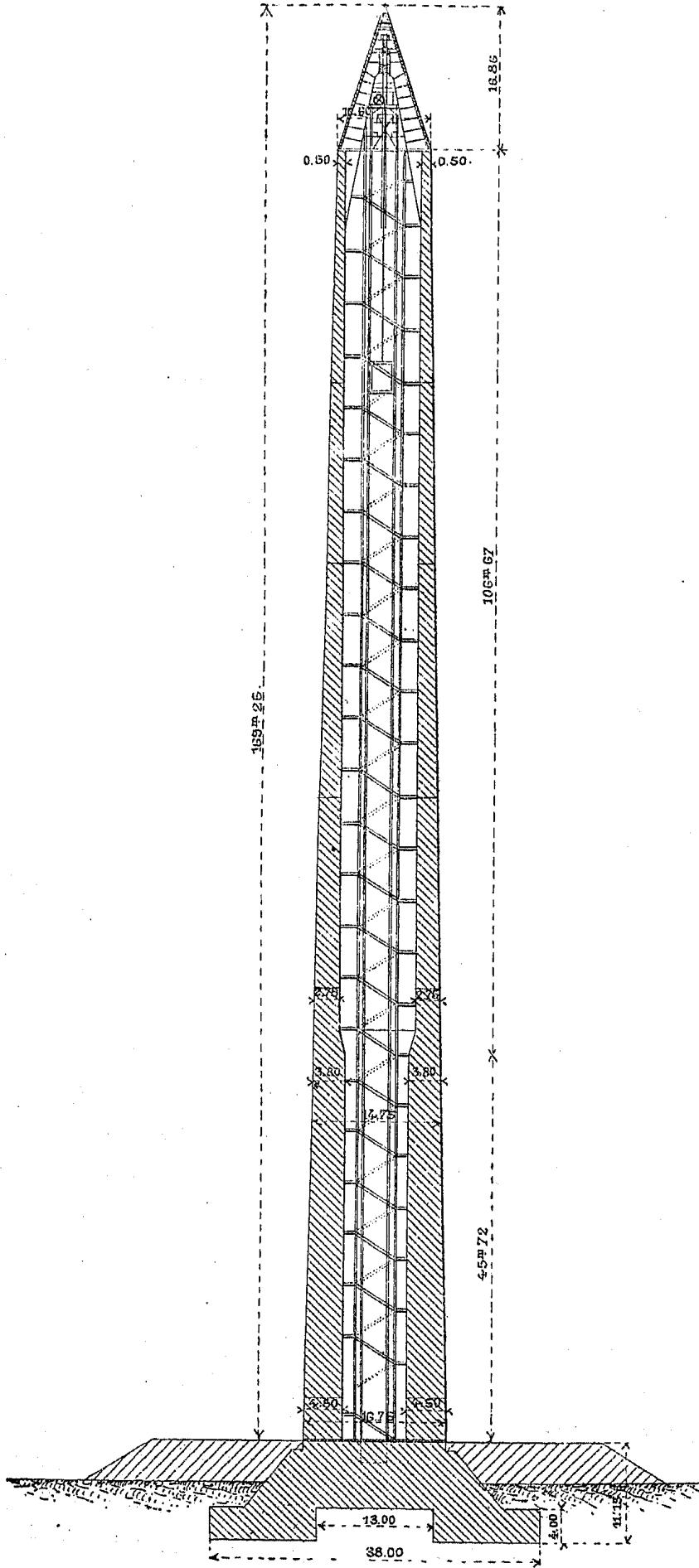
En adoptant comme limite pratique le $\frac{1}{10}$ de cette résistance, ainsi qu'il est admis habituellement, une maçonnerie en pierre de taille ne devrait pas supporter une charge de plus de 15 à 20 kilogrammes par centimètre carré. Tout à fait exceptionnellement, et en allant au delà de la limite de sécurité habituelle, en entrant en quelque sorte dans la zone dangereuse, on pourrait aller jusqu'à 25 kilogrammes. La limite de 30 kilogrammes est difficilement acceptable pour l'ensemble d'un grand ouvrage; en tout cas c'est une limite tout à fait extrême.

Navier cite les édifices dans lesquels la charge est la plus considérable; ce sont les suivants :

Piliers du dôme des Invalides, à Paris	14 ^{kg} ,76
Id. de Saint-Pierre de Rome	16 ,36
Id. de Saint-Paul de Londres.	19 ,36
Colonnes Saint-Paul-hors-les-murs, à Rome	19 ,76
Piliers de la tour de l'Église Saint-Merri, à Paris	29 ,40
Id. du dôme du Panthéon, à Paris.	29 ,44

Il ajoute bien un chiffre de 45 kilogrammes pour l'Église de la Toussaint à Angers, mais cet exemple ne semble guère probant puisque cette église est en ruines.

Il résulte de ce tableau que la limite de la résistance des constructions jugées les plus hardies est, comme nous le disions, de 15 à 20 kilogrammes par centimètre carré, et s'élève dans deux d'entre eux à 30 kilogrammes.



§ 9. — **Monument de Washington.**

Mais il existe un exemple plus frappant dans une construction qui vient d'être inaugurée, et au sujet de laquelle il me sera permis de donner quelques détails intéressants en raison de leur actualité.

Je veux parler du grand obélisque en pierre connu sous le nom de Monument de Washington, et qui est en ce moment le plus haut monument du monde. (Voir la figure ci-contre.)

Cet ouvrage, construit entièrement en granit avec revêtement en marbre, a une hauteur de 169^m,25. Il est carré du haut en bas ; sa base au niveau des fondations a 16^m,75 de côté ; au-dessous du pyramidion qui le surmonte, il a 10^m,50 de côté. Le pyramidion lui-même a 16^m,86 de hauteur. Cet obélisque est évidé à l'intérieur par un espace rectangulaire tel que l'épaisseur des murs au sommet est de 0^m,50 et à la base de 4^m,50. Son fruit extérieur est de 3^m,15 sur une hauteur de 152^m,40, soit 0^m,0206 par mètre. Le vide intérieur reçoit un ascenseur à vapeur, qui a servi à l'élévation des matériaux et sert maintenant à celle des visiteurs.

Le poids de la construction au-dessus des fondations est de 45 000 tonnes qui, réparties sur une base de 223 mètres carrés, donnent un coefficient à la compression de 20 kilogrammes par centimètre carré.

Si on se rend compte de l'effet d'un vent de 300 kilogrammes, le coefficient de travail dû à ce vent est de 6^{kg},5 par centimètre carré, ce qui donne un travail total de 26^{kg},5 par centimètre carré.

Telle est la limite que, même avec des matériaux de choix et une exécution particulièrement soignée, les ingénieurs américains, qui ne passent pas pour manquer de hardiesse, n'ont pas osé dépasser, et ils ont eu pour cela de bonnes raisons.

Nous nous permettrons d'ouvrir une parenthèse au sujet de ce monument, et de dire que son exemple n'est pas encourageant pour la construction d'une tour en pierre.

En effet, le premier projet dont l'exécution avait été commencée en 1848, comportait une pyramide de 600 pieds, soit 183 mètres de hauteur, entourée d'un Panthéon avec une colonnade formant péristyle ; mais, quand en 1854 la pyramide fut arrivée à la hauteur de 46 mètres, on s'aperçut qu'elle s'inclinait d'une façon tellement inquiétante qu'on suspendit les travaux. Ils ne furent repris qu'en 1877 ; on réduisit de

100 pieds la hauteur que l'on avait assignée d'abord au monument, et on la fixa définitivement à 160 mètres, puis on reprit toute la fondation en sous-œuvre. On élargit considérablement la base en établissant au pourtour de nouveaux massifs de béton, descendus plus profondément de manière à donner un empattement total de 38 mètres, qui portait la surface des fondations de 600 mètres carrés à 1 500 mètres carrés. La pression maxima sur le lit inférieur de la fondation atteint 6 kilogrammes ; néanmoins il continua à se produire quelques tassements plus ou moins égaux sur chacune des faces, et qui, depuis l'origine, sont d'environ 10 centimètres.

C'est seulement en 1880, qu'après de grandes difficultés vaincues, on reprit les travaux de la partie supérieure. Ils marchèrent depuis très régulièrement à raison de 30 mètres environ d'élévation par année, et l'ouvrage fut inauguré le 24 février dernier.

La dépense totale est, à ce jour, de 6 225 000 francs, et on estime que les travaux complémentaires exigeront encore une dépense de 870 000 francs, soit un total de 7 095 000 francs. Quant au Panthéon qui devait décorer l'édifice, il a été tout à fait ajourné, en raison de la dépense considérable qu'il devait entraîner.

Voilà un exemple de prix à retenir, en n'oubliant pas que cet édifice est d'une simplicité vraiment excessive, et qu'il se réduit à la construction d'une sorte de grande cheminée qui n'a, somme toute, que 170 mètres de hauteur.

Que deviendrait ce prix pour une pyramide de 300 mètres ?

Nous avons essayé de nous en rendre compte et, en établissant une pile d'égale résistance pour un coefficient de 30 kilogrammes, nous sommes arrivé à un cube qui n'est pas moindre de 70 000 mètres, non compris les fondations. Si l'on compte seulement le mètre cube à 200 francs, on arrive à une dépense de 14 millions. — Quant à la fondation, son diamètre supérieur serait d'environ 30 mètres, son diamètre inférieur 70, et sa hauteur 20 mètres environ, ce qui donne un cube de 38 000 mètres, — qui, à 50 francs le mètre cube, donne une dépense de 2 millions, — soit en tout 16 millions environ.

Si on voulait orner cette pyramide par un Panthéon et par des décorations spéciales, ce chiffre devrait encore être augmenté dans une très grande proportion, et nous renonçons à en établir un prix même approximatif.

En résumé, la difficulté des fondations, les conséquences dangereuses

qui pourraient résulter, soit des tassements inégaux du sol (tassements qui, dans le cas d'une tour en fer, n'ont aucun inconvénient sérieux), soit des tassements inégaux des mortiers et de leur prise insuffisante au sein de ces gros massifs, les difficultés et les lenteurs de construction qu'entraînerait la mise en œuvre du cube énorme de maçonneries nécessaires, ainsi que le prix considérable de l'ouvrage, — toutes ces considérations nous ont donné la conviction qu'une tour en maçonnerie, très difficile à projeter théoriquement, présenterait en pratique des dangers et des inconvénients considérables, dont le moindre est celui d'une dépense tout à fait disproportionnée avec le but à atteindre.

§ 10. — **Conclusion en faveur du métal.**

Le fer ou l'acier nous semble donc la seule matière capable de mener à la solution du problème. Du reste, l'antiquité, le moyen âge et la renaissance ont poussé l'emploi de la pierre à ses extrêmes limites de hardiesse, et il ne semble guère possible d'aller beaucoup plus loin que nos devanciers avec les mêmes matériaux, — d'autant plus que l'art de la construction n'a pas fait de bien notables progrès dans ce sens depuis bien longtemps déjà.

L'édifice — tel que nous le projetons avec sa hauteur inusitée — exige donc rationnellement une matière sinon nouvelle, mais au moins que l'industrie n'avait pas mise à la portée des ingénieurs et des architectes qui nous ont précédés. Cette matière, c'est le fer ou l'acier, par l'emploi desquels les plus difficiles problèmes de construction se résolvent si simplement, avec lesquels nous construisons couramment soit des charpentes, soit des ponts d'une portée qui aurait paru autrefois tout à fait irréalisable.

Reste la forme de l'édifice.

Celle que nous soumettons pour notre tour pourrait peut-être recevoir certaines modifications avantageuses que l'étude indiquerait; mais, dès à présent, il nous paraît qu'elle présente une saisissante expression de force et de grandeur, en même temps que d'appropriation au but poursuivi.

Les montants, avant de se réunir à ce sommet si élevé, semblent jaillir du sol, et s'être en quelque sorte moulés sous l'action même du vent.

Évidemment toute forme est discutable, celle-ci comme toute autre,

mais cependant nous sommes heureux de pouvoir affirmer que nous avons eu le suffrage d'artistes et d'architectes éminents.

§ 11. — Utilité de la tour métallique de 300 mètres de hauteur.

L'une des plus fréquentes objections qui ont été faites dans le public, à la construction de cette tour, était son manque d'utilité.

Nous sommes maintenant tout à fait assuré, et nous en donnerons les preuves tout à l'heure, que cette utilité est réelle, et pour cela nous allons examiner successivement quelques-unes de ses applications.

Tout d'abord, il n'y a pas de doute, après le succès des précédentes ascensions dans les ballons captifs Giffard et celui des ascenseurs du Trocadéro, que le public ait grand plaisir à visiter les différents étages de notre tour, qui lui présentera sans aucun danger et sans fatigue, un spectacle tout à fait extraordinaire : celui d'un panorama de 120 à 130 kilomètres d'étendue, observé à vol d'oiseau et comme en ballon sans que les premiers plans viennent, comme dans les ascensions de montagnes, nuire au sentiment de la distance et de la hauteur. La vue de Paris, la nuit, avec son éclairage si brillant, présenterait un aspect merveilleux que les aéronautes seuls connaissent jusqu'à présent.

Il n'est donc pas douteux que cette tour ne soit un des grands éléments d'attraction pour l'Exposition, et que, celle-ci terminée, le public continue à y affluer, soit pendant le jour, soit pendant la soirée.

Mais, en dehors de ce but, d'un caractère tout particulier, la science y trouverait un vaste champ d'observations.

§ 12. — Opinion de M. Hervé-Mangon.

En ce qui concerne la météorologie, nous ne pouvons faire mieux que de faire connaître quelques extraits d'une communication faite le 3 mars, à la Société météorologique de France, par M. Hervé Mangon.

Je cite textuellement ces extraits :

« L'attention de la Société météorologique de France a été souvent appelée sur l'utilité de la construction d'une tour métallique à claire-

voie d'une grande hauteur, destinée à recevoir certains instruments scientifiques et à organiser des expériences et des observations à diverses distances de la surface du sol.

« Il existe, dans plusieurs observatoires, des tours en maçonnerie, mais *elles présentent, pour l'installation des instruments météorologiques, plus d'inconvénients que d'avantages.*

« Au soleil, la masse de la construction s'échauffe, les surfaces murales produisent des remous qui rendent difficiles les observations sur la pluie, la brume, la neige et la rosée, faites dans un rayon même étendu; toutes les indications hygrométriques ou thermométriques deviennent inexactes ou illusoire.

« Le projet de la tour en fer de 300 mètres de hauteur, dressé par M. Eiffel et par MM. Nougier et Koechlin, ingénieurs, et M. Sauvestre, architecte, présente donc pour les météorologistes un intérêt des plus considérables.

« Elle permettrait d'organiser un grand nombre d'observations et d'expériences météorologiques du plus haut intérêt, parmi lesquelles nous citerons au hasard les suivantes :

« La loi de décroissance de la température avec la hauteur serait facilement observée, et les variations dues aux vents, aux nuages, etc., fourniraient certainement de nombreux renseignements, qui nous font jusqu'à présent complètement défaut.

« La quantité de pluie qui tombe à différentes hauteurs sur une même verticale a été très diversement estimée. Cette question si intéressante pour la théorie de la formation de la pluie serait résolue par quelques années d'observations faites au moyen d'une quinzaine de pluviomètres régulièrement espacés sur la hauteur de la tour.

« La brume, le brouillard, la rosée forment souvent à la surface du sol des couches de moins de 300 mètres de hauteur; on pourrait donc observer ces météores sur toute leur épaisseur, faire des prises d'air à diverses hauteurs, mesurer le volume d'eau à l'état globulaire tenu en suspension dans chaque couche. Ce volume liquide est beaucoup plus considérable que celui qui répond à la vapeur d'eau, et sa connaissance expliquerait comment des nuages d'un faible volume versent quelquefois sur le sol des quantités d'eau si considérables.

« L'état hygrométrique de l'air varie avec la hauteur. Rien ne serait plus facile que d'étudier ces changements, si l'on pouvait observer au même instant des instruments placés à d'assez grandes distances les uns

au-dessus des autres. L'évaporation donnerait également lieu à de très utiles expériences.

« L'électricité atmosphérique, sur laquelle on ne possède encore que des notions si imparfaites, devrait faire à l'observatoire de la tour l'objet des recherches les plus actives. La différence de tension électrique entre deux points situés à 300 mètres de distance verticale est probablement très considérable et donnerait lieu à des phénomènes du plus grand intérêt.

« La vitesse du vent croît en général avec rapidité en s'écartant de la surface du sol ; la tour permettrait de déterminer la loi d'augmentation de cette vitesse jusqu'à 300 mètres et probablement un peu plus haut. Cette détermination, indépendamment de son intérêt théorique, fournirait à l'aérostation d'utiles renseignements.

« La transparence de l'air pourrait être observée, avec la tour, dans des conditions exceptionnellement favorables, soit suivant la verticale, soit suivant des lignes d'une inclinaison donnée.

« Indépendamment des observations météorologiques que je viens de citer et dont je dois exclusivement m'occuper ici, la tour de 300 mètres permettrait encore de réaliser un grand nombre d'expériences impossibles à tenter aujourd'hui. Elle permettrait, par exemple, d'établir des manomètres allant jusqu'à 400 atmosphères, pouvant servir à graduer expérimentalement les manomètres des presses hydrauliques, et d'établir des pendules dont chaque oscillation durerait plus d'un quart de minute, etc., etc.

« Sans développer davantage, faute de temps, le programme des études que permettrait d'entreprendre une tour de 300 mètres de hauteur, je suis persuadé que la Société s'associera aux vœux que je forme pour la mise à exécution du magnifique édifice projeté par M. Eiffel pour l'Exposition de 1889, *et dont l'utilité, comme instrument de recherches scientifiques, ne saurait être mise en doute.* »

§ 43. — **Opinion de M. l'amiral Mouchez.**

M. l'amiral Mouchez, directeur de l'Observatoire, nous a écrit une lettre dont nous extrayons ce qui suit :

« Je m'empresse de vous faire savoir que j'ai vu avec le plus grand intérêt votre projet de tour de 300 mètres.

« J'en désire bien vivement la réalisation parce que je crois, qu'outre l'intérêt général que présentera un tel monument, il sera d'une très grande utilité pour diverses questions scientifiques et particulièrement pour l'étude des couches inférieures de l'atmosphère, qui ont une certaine influence sur la précision des observations astronomiques ; une hauteur de 300 mètres permettra d'observer régulièrement ces fréquentes inversions de la loi de décroissance de la température avec la hauteur, et dans de meilleures conditions que sur une montagne.

« On pourra également étudier les variations de l'humidité et de l'électricité atmosphériques, les variations du vent en force et en direction.

« Quatre collections d'instruments enregistreurs semblables placés au ras du sol, à 100, 200, et 300 mètres, donneraient certainement, par leur comparaison, des résultats d'un grand intérêt. Quant aux observations astronomiques, je ne crois pas qu'il y ait une égale utilité à en tirer.

« Il est cependant certain qu'au milieu de la ville de Paris, on aurait une atmosphère beaucoup plus pure à cette hauteur que dans nos salles d'observations ; on y laisserait au-dessous de soi la plus grande partie des fumées et des poussières de la ville.

« Au point de vue des observations météorologiques et de l'étude de l'atmosphère dont je parlais, la tour *en maçonnerie enlèverait une très grande partie de l'exactitude et de l'intérêt des observations que donnerait la tour en fer* ; avec celle-ci les instruments sont *entièrement isolés dans l'atmosphère* ; avec la tour en maçonnerie, ils s'échauffent et se refroidissent avec elle, sont alternativement à l'ombre et au soleil, etc., les conditions sont toute différentes.

« La tour en fer aurait une très grande et incontestable supériorité pour les observations météorologiques.

« Vous ne m'avez pas dit le prix approximatif de cette tour ; quel qu'il soit, *je fais les vœux les plus vifs pour que votre projet se réalise.*

§ 14. — **Opinion de M. Pierre Puiseux.**

Au point de vue plus spécialement astronomique, M. Pierre Puiseux, astronome attaché à l'Observatoire de Paris, a bien voulu nous donner les indications suivantes :

« Il est hors de doute que la tour projetée pourra recevoir des applications utiles aux études astronomiques. La mobilité de la plate-forme sous l'influence du vent exclut sans doute les observations qui ont pour but de fixer la position précise des astres, mais elle laisse le champ libre à la plupart des recherches d'astronomie physique. Des spectroscopes destinés à analyser la lumière du soleil et des étoiles, à constater les mouvements propres des astres par le déplacement des raies, fonctionneraient mieux à 300 mètres de hauteur qu'au niveau du sol. L'élimination des poussières et des brumes locales permettrait de suivre le soleil plus près de l'horizon. De là un sérieux avantage pour l'étude des raies telluriques dues à l'absorption de la lumière solaire par l'atmosphère.

« Un appareil à photographie lunaire ou solaire serait aussi d'un bon usage ; son emploi serait surtout indiqué dans le cas de passages de Mercure ou d'éclipses s'effectuant près de l'horizon. Les photographies d'étoiles ou de nébuleuses exigeant une pose appréciable seraient plus exposées à être contrariées par le vent et devraient être réservées pour les nuits calmes. Il faut faire attention cependant qu'une translation latérale de l'instrument n'a pas d'influence nuisible ; l'essentiel est que l'axe optique reste parallèle à lui-même. Il semble difficile de décider, avant l'expérience, si les mouvements causés par le vent seront bien de cette nature. En tout cas, les aspects physiques de la lune, des planètes, des nébuleuses, pourront être étudiés et dessinés dans des conditions favorables.

« Un chercheur ou un télescope de grande ouverture, installé au sommet de la tour, permettra de suivre les astres qui n'atteindraient qu'une faible hauteur sur l'horizon de Paris. Ces observations ne sauraient rivaliser d'exactitude avec celles des observatoires fixes, mais elles pourraient être effectuées dans des cas où celles-ci deviennent impossibles. Or, on sait que pour les astres nouvellement découverts, il est important d'obtenir le plus tôt possible des mesures mêmes approchées.

« Une étude également intéressante pour la météorologie et l'astronomie, sera celle de la variation de la température avec l'altitude. Toutes les théories de la réfraction données jusqu'à présent reposent sur des hypothèses gratuites et souvent démenties par l'expérience. »

§ 15. — **Opinion de M. le colonel Perrier.**

Enfin, M. le colonel Perrier, que nous avons consulté au point de vue des applications à la télégraphie optique, nous a confirmé qu'une pareille tour rendrait de grands services et permettrait des communications qui n'existent pas encore, mais sur lesquelles il a demandé à rester dans une réserve, qui se comprend, quant à l'indication des localités.

Il a bien voulu également nous résumer brièvement les questions que la construction de la tour en fer pourrait aider à éclairer :

« *Astronomie* : Loi des réfractions, spectroscopie, raies telluriques.

« *Chimie végétale* : La végétation à 300 mètres, composition de l'air, acide carbonique.

« *Météorologie* : Vents, température, hygrométrie, état électrique, foudre, courants supérieurs.

« *Physique* : Déviation d'un corps qui tombe. Électricité atmosphérique.

Expérience de Foucault pour démontrer la rotation de la terre.

« *Guerre* : Télégraphie optique.

« Le champ des expériences qu'on pourra faire est fort étendu, et s'étendra tous les jours davantage avec les progrès de la science.

« Je crois que vous ferez une œuvre utile en construisant cette tour gigantesque. »

En m'appuyant sur l'autorité des hommes très considérables que je viens de citer, je crois donc pouvoir affirmer que l'utilité scientifique de la tour projetée est démontrée, et que nous aurons avec nous tout le monde savant pour appuyer notre projet.

§ 16. — **Résumé et conclusion.**

En résumé :

1° La possibilité de l'exécution du projet que j'ai l'honneur de présenter ne peut pas faire l'objet d'un doute sérieux; la nature de la matière que nous avons choisie, le degré de certitude avec lequel nous pouvons y adapter les résultats de nos calculs, degré bien plus grand que celui comporté par l'emploi de la maçonnerie, l'expérience acquise

par les ingénieurs actuels dans la construction des grands travaux métalliques, tout nous assure que nous pouvons, sans crainte, donner cette affirmation et qu'il n'y a aucun alea à redouter.

2° Le prix de cet ouvrage, que j'ai estimé à 3 150 000 francs, est basé sur des études de détail déjà très avancées, et a été suffisamment examiné pour n'être pas susceptible de grandes variations si on passe à la période d'exécution.

3° L'utilisation de cette tour sera considérable au point de vue scientifique, et très importante au point de vue militaire.

4° Non seulement elle serait une des grandes attractions de l'Exposition, mais après celle-ci, elle resterait comme un des monuments les plus intéressants de Paris, et certainement l'un des plus visités.

Enfin, qu'il me soit permis d'ajouter que cette si haute tour, qui dépasse de beaucoup tout ce que l'on a fait jusqu'à présent, peut sembler digne de personnifier, non seulement l'art de l'Ingénieur moderne, mais aussi le siècle d'Industrie et de Science dans lequel nous vivons, et dont les voies ont été préparées par le grand mouvement scientifique de la fin du dix-huitième siècle et par la Révolution de 1789, à laquelle ce monument serait élevé comme un témoignage de la reconnaissance de la France.
