

Le fonctionnement de la méridienne d'Auguste et la naissance de l'année bissextile occidentale

- [V. Baiocchi](#)¹,
- [M. Baumgartner](#) ²,
- [M. Barbarella](#) ³,
- [M. T. D'Alessio](#) ¹,
- [S. Del Pizzo](#) ⁴,
- [F. Giannone](#) ⁵,
- [F. Radicioni](#) ⁶,
- [A. Stoppini](#) ⁶,
- [G. Tosi](#) ⁶,
- [S. Troisi](#)
- [L. Alessandri](#)

Rapports scientifiques volume 15, numéro d'article: 16463 (2025) [Citer cet article](#)

- 355 Accès
- 1 Altmétrie
- [Détails métriques](#)[details](#)

Résumé

En 12 av. J.-C., Auguste s'est chargé du calendrier, qui était progressivement tombé en conformité avec les vraies dates des solstices et des équinoxes. La réforme du calendrier d'Auguste, qui implique l'introduction d'un jour bissextile tous les quatre ans, a eu lieu en même temps que l'érection d'un grand méridien dans le Campus Martius, connu en latin sous le nom d'Horologium Augusti. Ce dispositif utilisait le bloc de Psamtik II (VI^e siècle av. J.-C.) comme gnomon qui projetait son ombre sur un plancher de dalles comportant des repères en bronze. Malgré la découverte de l'obélisque au XVIII^e siècle et l'excavation partielle du sol en 1980, la compilation de ses complexités géométriques, tant en ce qui concerne les dimensions que le positionnement, est restée un défi en raison de la complexité de la réalisation de mesures géomatiques précises dans des environnements souterrains. Par conséquent, les incertitudes persistent quant à sa mécanique opérationnelle, notamment en ce qui concerne la question de savoir si les marques notent des jours ou des degrés écliptiques. Cette étude présente des mesures précises et des analyses statistiquement rigoureuses qui permettent un repositionnement précis du méridien et une reconstruction soignée de sa géométrie. Les résultats suggèrent que les marques ont probablement désignées des jours spécifiques de l'année, comme l'a rappelé Pline l'Ancien. Cela conforte l'hypothèse selon laquelle le monument a fonctionné comme une validation empirique de la réforme calendaire d'Auguste. En outre, la grande précision obtenue dans le positionnement représente un apport fondamentale dans le scénario souhaitable pour poursuivre les fouilles du méridien.

Introduction

Depuis sa découverte initiale, le *Horologium Augusti*, tel que décrit par Pline l'Ancien au Ier siècle de notre ère CE¹ et qui a été partiellement fouillé par E. Buchner en 1980, Via di Campo Marzio 48 à Rome ^{2,3} (figure 1), a suscité des débats approfondis et complexes axés sur la reconstruction de sa signification originale, son apparence et sa chronologie ⁴⁻⁶. De nombreux auteurs ont souligné que l'inauguration du monument, qui a dû avoir lieu après 10/9 av. J.-C., s'est produite quelques années après qu'Auguste eut pris la position de Pontifex Maximus en 12 av. J.-C., et peu avant son décret (9/8 av. J.-C.) dans lequel il a corrigé une erreur calendaire qui s'était produite pendant le pontificat de Marcus Aemilius Lepidus ⁷⁻⁹. En fait, c'est pendant le mandat de Lepidus que débute la mauvaise pratique consistant à insérer des jours de saut tous les trois ans au lieu de quatre.



Fig. 1 La partie méridienne découverte lors des fouilles archéologiques organisées

1 1Sapienza University of Rome, Piazzale A.Moro, Rome 00185, Italy. 2Soprintendenza speciale archeologia, belle arti e paesaggio di Roma, Piazza dei Cinquecento 67, Rome 00185, Italy. 3University of Bologna, DICAM, Viale Risorgimento 2, Bologna 40136, Italy. 4Parthenope University of Naples, Centro Direzionale Isola C4, Naples 80183, Italy. 5Niccolò Cusano University, Via Don Carlo Gnocchi 3, Rome 00166, Italy. 6University of Perugia, Via G. Duranti 93, Perugia 06125, Italy. ✉email: Valerio.baiocchi@uniroma1.i

En ce qui concerne son apparence, certains chercheurs préconisent un véritable cadran solaire, mettant en vedette l'obélisque égyptien d'Héliopolis comme le gnomon et un pavé extraordinairement grand en marbre gravé de lignes marquant les jours et les heures [2,3,5,10,13](#). Inversement, d'autres contestent cette interprétation, suggérant à la place un simple méridien, s'alignant avec la bande de trottoir de semelle découverte par Buchner, orientée nord-sud [4,6,7,14,-18](#). Notamment, malgré de nombreux carottages et fouilles, aucune preuve (voir même l'inverse) n'est apparue pour soutenir l'existence d'une chaussée s'étendant à l'est ou à l'ouest de celui connu. En ce qui concerne sa datation, des spéculations existent de longue date selon lesquelles le monument Buchner n'a pas été le monument Auguste, mais plutôt une reconstruction de l'ère flavienne, commandée sous Domitian [2,3](#) ou Vespasien [10](#) comme son élévation le suggère également. Un carottage récent mené sous les dalles de plancher a fourni de nouvelles données, mais malheureusement celles-ci ne sont pas également concluantes [6,8](#). En résumé, les preuves ne fournissent pas de base définitive pour la datation du monument et soutenir fermement l'hypothèse de la méridienne plutôt que celle d'un cadran solaire. Néanmoins, certains aspects et détails techniques spécifiques ne sont pas suffisamment interprétés. Ceux-ci concernent le positionnement très précis du fragment de chaussée trouvé à environ 7 m de profondeur, l'emplacement de la base de l'obélisque/gnomon, sa hauteur, et enfin, la signification exacte des encoches de bronze qui indiquent potentiellement des jours ou des degrés.

Ci-dessous, nous présenterons brièvement l'état actuel des quatre points d'incertitude qui viennent d'être mentionnés, puis nous fournirons une description concise de l'approche que nous avons utilisée pour mieux les estimer.

En ce qui concerne le positionnement du fragment de chaussée, Ralf Bill [19](#) et Günter Leonhardt⁶, membres de l'équipe d'excavation, ont initialement localisé le relief par rapport à la topographie actuelle, créant indépendamment deux cartes presque identiques. Deux autres enquêtes indépendantes ont été menées par la suite. La première, dirigée par Ismini Milaressis en 2013, a utilisé une roue métrique et une boussole; la seconde, dirigée par Adalberto Ottati en 2014, utilisait une "station totale". Une comparaison entre les deux résultats a révélé une erreur dans l'un d'entre eux en raison du positionnement imprécis des toits des bâtiments dans la zone méridienne, qui avait servi de base aux mesures à la situation moderne. Après avoir identifié et corrigé cette erreur, les deux enquêtes se sont alignées, et le résultat a été publié par Frischer en 2017 ⁶. Malheureusement, la figure manque de coordonnées absolues, et les lignes représentant la topographie moderne ne sont pas facilement corrélées avec les structures existantes.

L'estimation initiale de la localisation de la base de l'obélisque a été proposée par Buchner avant la découverte de la chaussée méridienne [20](#). Le spécialiste s'est appuyé sur les informations fournies par Stuart et De Marchis, mentionnées dans le livre de Bandini, qui avaient tous deux observé, au moins en partie, l'excavation de l'obélisque [21](#), et l'inscription située encore sur la Piazza del Parlamento 3, commémorant la découverte de la base obélisque sous le bâtiment. En 1980, la découverte de la ligne méridienne, dont l'extension passe par le centre de la base, offre une contrainte précise sur l'axe Est-Ouest. En 1995, Buchner a organisé une série de noyaux autour de ce bâtiment pour tenter d'intercepter la base [11](#). Un rapport partiellement de cette campagne de forage est disponible [6](#), ainsi que le plan créé par Leonhardt en mai 1995, détaillant les positions [5](#) et certains noyaux, conservés à la Deutsches Archäologisches Institut et examinés par la suite par G. Giordano et C. Rosa [6](#). Malheureusement, la numérotation utilisée par Leonhardt et la numérotation actuelle sur les noyaux originaux ne s'alignent pas, seules quelques carottes sont identifiables. Des traces de blocs de tuf, qui font probablement partie de la fondation du monument, ont été trouvées

dans quatre noyaux. Malgré l'absence de corrélation avec la numérotation de Leonhardt, il semble évident, comme l'a observé Frischer²², que ces quatre carottes devraient relever de ceux positionnés par Leonhardt correspondant au contour de la base de l'obélisque sur le plan de 1995, en particulier ceux numérotés de 10 à 14, sinon, il ne serait pas raisonnable de porter d'hypothèse sur l'emplacement de la base dans cette zone. Dans le plan de 1995, Leonhardt propose deux grandes lignes de la base de l'obélisque, avec des orientations légèrement différentes. Selon l'une d'elle, le noyau 14 croise ou non la base. Il convient de noter que puisque seuls quatre carottes présentent des traces de tuf, la solution correcte devrait être celle qui exclut le noyau 14 ; sinon, il y aurait cinq carottes avec des traces de tuf. Cette orientation correspond à celle précédemment observée par Stuart, indiquant une inclinaison de 15 degrés vers l'ouest. Dans ce cas également, l'exactitude et la précision de l'arpentage et du positionnement des carottes ne sont pas connues. Enfin, des informations détaillées sur les dimensions et l'apparence de base sont disponibles dans les rapports de De Marchis et Stuart ²¹; ces dernières fournissent également des cartes topographiques précises.

En ce qui concerne la hauteur du gnomon, il est important de souligner qu'il n'est que partiellement lié à la hauteur de l'obélisque, qui ne forme qu'un seul de ses composants. La hauteur du gnomon que nous avons estimée est définie comme la hauteur du point de référence de l'ombre, qui consiste en la distance perpendiculaire au sol entre le point de référence du gnomon (centre de la sphère? Voir Fig. S1) et le niveau du plancher défini par Buchner. Ainsi, en pratique, les segments qui doivent être additionnés sont : le rayon de la sphère (a), une tige possible qui a relié la sphère au sommet de l'obélisque (b), l'obélisque lui-même (c), sa base jusqu'à ses fondations (pédestal plus trois socles, d), et enfin, la différence de hauteur entre le niveau du sol du gnomon et le niveau du revêtement méridien à la Via di Campo Marzio 48 (e). La mesure de (a) pourrait être estimée, si l'on considère que l'un des globes du musée Capitoline Museums est bien celui de l'obélisque d'Auguste même si l'association, suggérée ²³ par certains auteurs, reste hautement spéculative ; la mesure (b) ne peut pas être calculée avec précision car aucune tige n'a jamais été trouvée ; les hauteurs de l'obélisque (c) et de sa base (d) peuvent être déduites, avec une légère incertitude. Quoi qu'il en soit, notre point de départ repose sur la description et les mesures détaillées par Stuart et De Marchis ²¹. Stuart a mentionné que l'obélisque se trouvait à une hauteur de 71 4583 pieds anglais, tandis que son piédestal mesurait exactement un cinquième de la hauteur de l'obélisque, soit 14,2916 pieds. Il convient de noter que les chiffres décimaux indiqués ici sont ceux fournis dans le document original de Stuart et sont présentés par souci d'exhaustivité ; pour une conversion en système métrique, nous nous arrêtons prudemment aux centimètres. Au total, 85,7499 pieds anglais, soit $21,78 + 4,35 \text{ m} = 26,14 \text{ m}$, en utilisant le taux de conversion de 1 pied anglais pour 304,80 mm ²⁴. Cette valeur de hauteur de l'obélisque est très proche de l'une des valeurs les plus accréditées à l'heure actuelle (21,79 m)²⁵. Selon Stuart et De Marchis, sous le piédestal, il y avait deux socles en marbre et un socle de travertin, sous lequel se trouvaient les fondations. Selon Stuart, le plancher de travertin était situé au même niveau que le haut du socle de travertin. Si nous supposons que c'est la base de l'obélisque, nous devons donc ajouter à la hauteur de l'obélisque et de son piédestal les deux socles de marbre, qui étaient situés à un niveau supérieur. Les enregistrements de Stuart indiquent ces mesures de 5 pieds, 7 pouces et 60 centesimaux (DN et EM dans le texte), environ 1,71 m. Par conséquent, la hauteur totale de l'obélisque et de sa base, à l'exclusion de la sphère, atteint 27,85 m. Si, en revanche, nous suivons la description de De Marchis, qui place le plancher de travertin à la base du socle de travertin, alors nous devons également ajouter la hauteur de ce socle, 2 et 2/3 de paume (0,59 m). Dans ce cas, la hauteur totale de l'obélisque et sa base atteint 28,44 m. Revenant à l'estimation de la hauteur du gnomon, certains auteurs ont utilisé une approche trigonométrique simplifiée, la hauteur du gnomon lui-même pouvant être estimée à partir de la longueur du méridien. En extrapolant les données de la seule section du méridien découverte à ce jour, il est proposé deux hauteurs : initialement, 31,0 m ⁷, puis après révision : 30,70 m ¹⁵. Albèri Auber, basant ses calculs sur de multiples hypothèses a présenté

différentes hauteur de gnomon : 30,34 m; 30,05 m; 30,05 m ²⁶, éventuellement 29,60 m ¹⁷. Il convient de noter que la mesure de 29,60 m avait précédemment suscité un intérêt, étant égale à 100 pieds romains. Albèri Auber suggère que cette éventualité aurait pu faciliter les calculs mathématiques essentiels à la réalisation du projet. Néanmoins, Schütz ²⁷ adopte un point de vue opposé, soulignant que les calculs auxquels fait référence Albèri Auber, reposant sur un système décimal, seraient anachroniques pour l'époque. Il est important de souligner que toutes ces valeurs ont été calculées sans précision rigoureuse.

L'interprétation des entailles sur le sol en travertin n'est pas unanime. La majorité des auteurs qui abordent cette question considèrent les encoches comme des représentations de jours. Cependant, le Schottz ^{7,15,27} tient une opinion différente, considérant qu'il s'agit de degrés de longitude éclipique : dans ce cas, chaque encoche indiquerait une augmentation de 1 degré, totalisant 181 crans. Cette interprétation provient principalement des inscriptions grecques trouvées sur le sol, indiquant les signes zodiacaux du Bélier et du Taureau, du côté ouest du méridien, et de Léo et de la Vierge, sur le côté est. Étant donné que dans le cas des jours, le nombre d'encoches dans une année bissextile aurait été de 184, et que la longueur totale du méridien reste constante, les deux hypothèses supposent un espacement différent entre les encoches. Cependant, comme cette différence est minimale, il n'a pas été possible jusqu'à présent, de mesurer les distances entre deux crans adjacents avec la précision nécessaire et, par conséquent, de comprendre quelle est la bonne hypothèse.

Pour affiner la définition de ces quatre points, il était nécessaire de positionner l'étendue de la chaussée, qui comprend les encoches et les inscriptions, avec une précision du degré, en utilisant des techniques géodésiques et géomatiques. Par la suite, en intégrant une reconstruction de l'inclination du rayon solaire frappant le cadran solaire, nous avons estimé la géométrie relative entre le trottoir et le gnomon, à savoir la hauteur du gnomon, la longueur de la méridienne et la distance entre les deux sections du monument. Ces quantités ont été associées à leur écart-type respectif.

Nous démontrons ici qu'en utilisant un estimateur, comme la méthode des moindres carrés, sur des mesures effectuées avec des techniques géomatiques précises, il est possible d'extraire l'information géométrique du méridien avec la précision permise par le court tronçon de trottoir trouvé jusqu'à présent. Simultanément, des approches statistiquement rigoureuses permettent d'estimer non seulement les valeurs des inconnues mais aussi leurs incertitudes. Dans la présente étude, outre le positionnement et la reconstruction avec précision de la mise en place et de la hauteur (voir paragraphe suivant) du gnomon avec la même précision, nous avons réussi à estimer que la probabilité de marquages des jours de notation est supérieure à celle des degrés de notation (voir les valeurs de σ d dans le tableau 1).

Résultats

Un relevé précis était essentiel pour obtenir des résultats fiables permettant de déterminer la position et la taille du gnomon et sa distance par rapport à la ligne méridienne. Les relevés du réseau local avec des récepteurs GPS/GNSS et le parcours avec la "station totale" ont permis de déterminer la position absolue des deux sections du monument avec une précision inférieure au centimètre par rapport au Système international de référence géodésique.

La relation mathématique entre des quantités inconnues et les observations peut être décrite par deux formulations mathématiques : le modèle 1, Topographic et le modèle 2, Pseudo-observations (figure 2) dont les différences sont expliquées en détail dans le paragraphe Méthodes. La redondance du nombre de mesures par rapport aux inconnues et la nécessité d'estimer le niveau d'incertitude avec lequel elles sont calculées ont nécessité l'utilisation de techniques statistiques

fondées sur le principe des moindres carrés. Une approche précise nécessite d'associer une «pondération» aux observations dérivées de leurs niveaux de précision.

Dans cette contribution, nous utilisons deux catégories d'observations : les mesures géodésiques spécifiquement réalisées pour cette étude et les observations pseudo-zénithales ζ (comme détaillé dans Eq. (3) de la section des méthodes) qui ont été précédemment calculées et sont accessibles à la communauté scientifique par l'intermédiaire de la NASA ²⁸. Les mesures géomatiques, réalisées avec scanner laser et les levés photogrammétriques, donnent une valeur d'écart-type par rapport au processus de mesure et des analyses ultérieures de 3 à 5 mm. Au lieu de cela, les valeurs de ζ dérivent de considérations et de corrections qui reconstruisent la position du soleil au moment où le méridien a été réalisé, et pour cette raison seules des hypothèses peuvent être faites sur leurs écarts types. Les résultats des estimations réalisées selon les différentes hypothèses seront ζ présentés ci-après, tandis que nous renvoyons à la section consacrée aux méthodes pour la description des procédures et la définition des quantités estimées.

En outre, les analyses devaient tenir compte des deux hypothèses concernant la «signification» des encoches, qu'elles représentent des jours de l'année ou des diplômes. Comme mentionné précédemment, dans les deux hypothèses, le nombre d'encoches serait différent. Plus précisément, dans l'hypothèse des entailles/degrés, il n'y a pas de différence entre une année bissextile et une année non bissextile. Au contraire, dans l'hypothèse des encoches, le nombre d'encoches peut varier entre les deux semestres, et la situation change également selon l'année, revenant à la même position à la fin d'un cycle de quatre ans. En utilisant le plancher de travertin comme s'il était au niveau d'Auguste, dans les estimations suivantes, l'année 4 de l'ère BCE sera toujours utilisée dans les calculs, car elle est plus tardive que la construction de l'obélisque et parce que sur la base d'analyses spécifiques (voir annexe, Fig. S2) il présente un léger écart entre les valeurs de deux semestres. En tout état de cause, il a été évalué que, sur la base de calculs astronomiques, la datation à l'âge de Flaven n'entraîne pas de variations significatives.

Enfin, les résultats obtenus nous ont permis de déterminer l'hypothèse plus probable (days/degrees) et les mesures avec une plus grande probabilité.

notch meaning: days				
Adjustment model	Model 1			Model 2
a	b	c	d	e
σ_d	0.005 m	0.005 m	0.005 m	0.005 m
σ_ζ	0.001°	0.01°	0.1°	0.001° - 0.1°
H	31.171	31.148	31.138	31.154
σ_H	0.130	0.135	0.270	0.054
D_0	14.942	14.933	14.932	14.940
σ_{D_0}	0.062	0.066	0.147	0.030
a	0.144	0.150	0.307	0.062
b	0.0005	0.004	0.015	0.003
θ°	154.385°	154.129°	151.495°	150.612 - 150.615°

Tableau 1 : Estimation des inconnues (H, D_0), de leurs écarts types (σ_H , σ_{D_0}) et des paramètres de l'alignement d'erreur (a, B, z) pour l'année 4 av. J.-C. Résultats obtenus en considérant l'hypothèse basée sur des encoches comme des modèles d'ajustement et les deux modèles d'ajustement (modèle 1: approche géomatique; modèle 2: pseudo-observations).

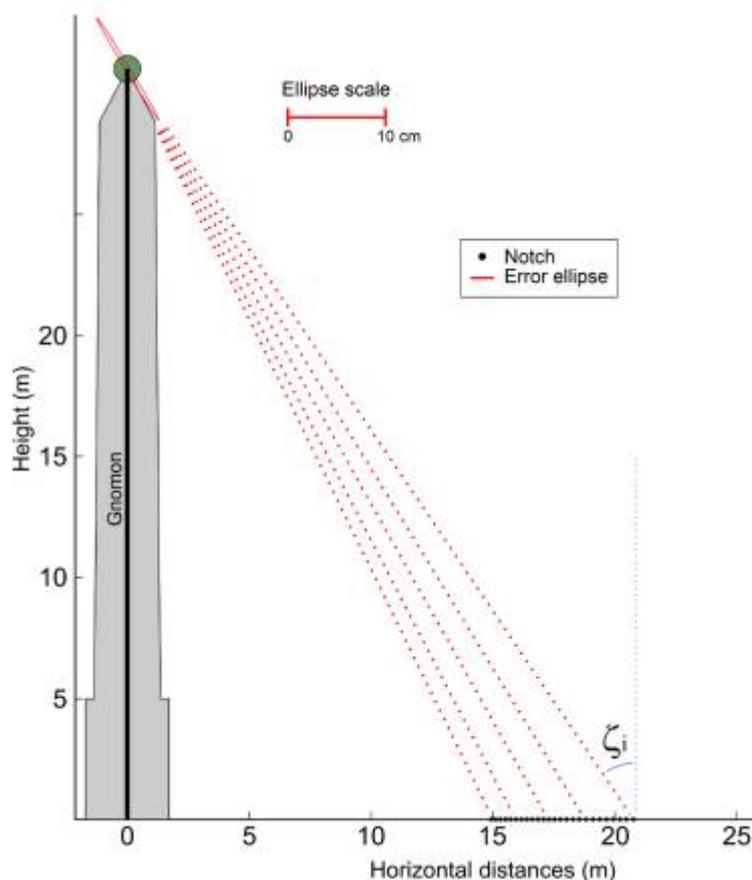


Fig. 2 : Ellipse d'erreur standard pour la position du gnomon. Veuillez noter que l'échelle de l'ellipse dépasse celle du méridien.

Hypothèse fondée sur des encoches comme jour de l'année

Les valeurs retenues pour les incertitudes de d_i et ζ_i définissent le modèle statistique d'observation utile pour les ajustements des moindres carrés: deux modèles informatiques ont été utilisés, comme nous l'avons dit, tous deux basés sur le critère des moindres carrés.

En ce qui concerne le premier modèle d'ajustement, les informations requises sont la position du gnomon par rapport à l'encoche méridionale de la ligne méridienne et le modèle statistique adopté; les coordonnées du sommet du gnomon (point inconnu) peuvent être calculées à l'aide d'un logiciel développé pour le "ajustement des réseaux planimétriques" qui fournit la valeur ajustée des coordonnées, leurs écarts types et les paramètres de l'ellipse d'erreur standard. En outre, le logiciel permet une analyse des résidus normalisés. Dans le tableau 1, les deux modèles ayant des valeurs d'écart type (ET) différents sont comparés pour la même année (4 BCE). Plus en détail, les colonnes b-d montrent les solutions calculées avec différentes valeurs d'écarts types des angles ζ

(σ_z) : hauteur et distance du gnomon ainsi que leurs écarts-types (σ_H , σ_{D_0}), et les paramètres de l'ellipse d'erreur standard (a, b, Θ°), des demi-axes majeures et mineures a et b, et l'orientation - sont indiquées (les quantités sont exprimées en mètres et en degré).

Les différentes valeurs supposées pour l'écart type (σ de 0,001 à 0,1 degré) influencent les inconnues H et D_0 : les différences sont respectivement de 3 et 1 cm. Respectivement: H est la hauteur du gnomon tandis que D_0 est la distance entre l'axe du gnomon et l'encoche actuellement trouvée plus au sud. Inversement, leurs écarts types changent avec la variation du modèle stochastique: de 27 cm à 13 cm pour H, de 15 cm à 6 cm pour D. La solution utilisée comme référence est la suivante: $\sigma_z = 0.1^\circ$, $H = 1.138$ m and $D_0 = 14.932$ m.

Dans le second modèle d'ajustement, les inconnues sont estimées en considérant pour chaque encoche l'angle zenithal ζ_i et la distance de la première encoche D_i , comme décrit en détail dans la section des méthodes. Les résultats obtenus avec ce deuxième modèle et le même choix d'écarts-types sur les mesures ($\sigma_d \times 0,005$ m et $\sigma_z 0,001^\circ - 0,10^\circ$) sont présentés dans le tableau 1 (colonne e). Dans ce deuxième cas, les différentes différences de σ_z rendement de moins d'un millimètre, tant en valeurs numériques qu'en termes d'écart type et pour cette raison, les résultats ne sont rapportées qu'une seule fois (colonne e); cette vérification a été répétée avec des valeurs plus extrêmes σ_z pour ζ comprendre la variabilité des estimations et les résultats de ces autres essais sont rapportés dans le supplément (Tab. S1).

La figure 2 (où la hauteur de la base du piédestal alignée sur le plan méridien doit être considérée comme purement schématique et non comme une hypothèse géométrique de reconstruction) montre la configuration géométrique dans le plan vertical du gnomon, les encoches sur la ligne méridienne et l'ellipse de l'erreur standard à l'échelle appropriée.

La différence de distance et de hauteur du gnomon entre les deux modèles est de 8 mm et 16 mm, respectivement. Les écarts types pour le modèle 2 sont plus petits et de 30 mm et 54 mm, respectivement. On observe la même réduction également pour les paramètres de l'ellipse d'erreur standard. Les deux modèles fournissent donc des résultats concordants pour les valeurs des estimations.

En conclusion, les résultats que nous considérons comme les plus fiables dans l'hypothèse en encoche/jour sont ceux calculés avec le modèle 2, à savoir: hauteur de gnomon, 31,154 m; distance de l'axe du gnomon à l'encoche la plus méridionale actuellement visible, 14,940 m; longueur totale de la piste (du solstice d'été au solstice d'hiver), 58,524 m.

Hypothèse basée sur des encoches comme des degrés de longitude écliptique

L'hypothèse basée sur la longitude écliptique associée à chaque encoche conduit à des valeurs différentes pour la déclinaison solaire, et donc à des valeurs différentes pour l'angle zenithal dans chaque encoche du méridien. En assignant à l'obliquité de l'écliptique (inclinaison de l'orbite solaire sur le plan équatorial) la valeur de $23,6964^\circ$ calculée avec l'équation (5) de la section de méthode et faisant varier la longitude de l'écliptique par une unité entière en fonction de la valeur relative à affecter à l'encoche de séparation entre la constellation de Léon et de la Vierge ; la déclinaison astronomique peut être calculée comme dans l'équation (4) de la section méthode.

Le même modèle (2/pseudo-observations) et le même choix pour l'écart type des distances et des angles zénithal utilisés pour les hypothèses précédentes (à $\sigma_d = 0,005$ m et $\sigma_z = 0,1^\circ$) conduit aux résultats pour les inconnues indiquées dans le tableau 2.

Tableau 2 :
Estimation
des
inconnues
(H, D₀), de
leurs écarts
types (H, -D

Adjustment model: 2 notches meaning: degrees of ecliptic longitude								
σd	$\sigma \zeta$	H	σH	D ₀	σD_0	a	b	θ°
0.005 m	0.1°	30.759	0.245	14.601	0.132	0.278	0.015	151.845°

), et des paramètres de l'ellipsoïde d'erreur

(a, B, -) pour l'année 4 apr. J.-C. Résultats obtenus considérant l'hypothèse basée sur des encoches comme des degrés de longitude éclipstique et modèle d'ajustement 2 (pseudo-observations).

Comme le montrent les résultats du tableau 2, les valeurs de la distance et de la hauteur du gnomon, en partant de l'hypothèse que les encoches sont associées aux degrés de longitude éclipstique, sont inférieures à celles indiquées dans le tableau 1 - colonne (e) ; d'autre part, les écarts types de ces valeurs sont considérablement plus importants.

Étant donné que l'espacement des encoches dépend de leur représentation en tant que jours ou de degrés de longitude éclipstique, l'analyse des écarts de niveau (modèle 2 : $\sigma_H = 0,245$ et $\sigma_{D_0} = 0,132$ valeurs signifiant des degrés d'encoche ; $\sigma_H = 0,054$ et $\sigma_{D_0} = 0,03$ encoche signifiant jours) montre une moins bonne adéquation entre le modèle et les données mesurées sous l'hypothèse de degrés.

En conclusion, les résultats que nous considérons comme les plus fiables dans l'hypothèse des encoches/d degrés de la longitude éclipstique sont : hauteur de gnomon, 30,759 m; distance de l'axe du gnomon à l'encoche la plus méridionale actuellement visible, 14,601 m; longueur totale du cheminement (du solstice d'été au solstice d'hiver), 57,697 m.

Modélisation 3D de la Méridienne d'Auguste

Dans cette section, nous tenterons de reconstruire, sur la base des résultats de nos recherches et des sources historiques existantes sur la méridienne d'Auguste, un modèle géoréférencé tridimensionnel de la méridienne dans lequel sont inclus à la fois les éléments mesurés du méridien et de l'obélisque, ainsi que la modélisation virtuelle de l'ensemble du méridien et des éléments originaux qui sont actuellement manquants ou remplacés. Comme on l'a déjà mentionné, l'obélisque a été placé, après sa redécouverte, sur la place Monte Citorio, dans une position différente de celle qu'il occupait au moment de sa construction (figure 3 a). Pour la construction du modèle tridimensionnel de l'obélisque, une approche photogrammétrique a été appliquée à l'aide d'images prises avec des caméras pour smartphones. De nombreuses recherches sur les performances des appareils photo modernes de smartphone par rapport aux appareils photomatiques normalement utilisés en photogrammétrie numérique ont montré que les résultats obtenus sont très satisfaisants [29](#).

Les lentilles des smartphones modernes permettent d'obtenir d'excellents résultats en termes de détails d'image; les algorithmes Structure from Motion mis en oeuvre dans le logiciel de photogrammétrie numérique permettent d'orienter ces images et d'obtenir des modèles 3D de très haute qualité .

Dans notre cas, 13 images avec une résolution de 12 Mpx (4000 x 3000) de l'obélisque ont été réalisées avec un smartphone, (distance focale équivalente de 26 mm). Elles ont été prises à partir de positions inscrit dans un secteur circulaire d'environ 200° (pour des raisons de sécurité, il n'est pas possible de photographier l'obélisque depuis toutes les directions, ni de prendre des mesures directes). Ces photos ont été utilisées pour créer un modèle 3D du gnomon. Toutes les

images ont été orientées à l'aide d'Agisoft Metashape 2.0.2 [31](#), ce qui a entraîné une erreur de reprojection avec un RMS (Root Mean Square) de 0,5 pixel. Un nuage de point dense a ensuite été extrait du réseau de caméras orientés et il a utilisé pour construire un maillage polygonal.

Le modèle 3D obtenu a été modélisé en Blender 4.0 [32](#) selon une approche "low-poly" concernant les principales lignes de rupture afin de préserver les arêtes vives. Le modèle 3D de l'obélisque a été positionné par rapport au modèle méridien étudié conformément au calcul effectué pour l'hypothèse 1.

La reconstruction de la méridienne d'Auguste a été réalisée dans l'environnement Blender, en collectant plusieurs modèles :

- i. La partie de la ligne méridienne étudiée par notre équipe.
- ii. L'obélisque placé sur la place Monte Citorio, étudiée par notre équipe.
- iii. Le modèle de CAO de la base obélisque tel que décrit métriquement par De Marchis et Stuart [21](#).



Fig. 3 : a) L'obélisque dans sa position actuelle, représentation extraite de l'une des 13 images utilisées pour la construction du modèle 3D et b) le résultat de la modélisation complète (Blender 4.0 [32](#)).

- iv. Le modèle de CAO de la sphère telle que représentée sur le relief central de la base de la colonne d'Antonin le Pieux (voir fig. [S1](#) en complément).
- v. Le modèle de CAO du cadran méridien, où la ligne méridienne de bronze a été posée.
- vi. Le modèle de CAO de sept marches où se trouve la base de l'obélisque.

Les deux premiers modèles 3D (i et ii), illustrés à la figure [3b](#), ont été texturés à partir d'images réelles acquises lors des relevés décrits ci-dessus. Ces modèles ont été mis à l'échelle avec des mesures collectées in situ. La base obélisque a été modélisée en CAO, conformément au dessin technique et aux mesures rapportées dans De Marchis et Stuart [21](#). La figure 3b est représentée en couleur blanche. Enfin, tous les objets décrits dans la littérature, mais dont les mesures n'ont pas été rapportées sont modélisés en gris ; spécifiquement : la sphère ajoutée au modèle 3D de l'obélisque et les sept marches qui supportent la base obélisque.

Discussion et conclusions

Le méridien Auguste est un monument unique par son importance historique et sa valeur scientifique; il consistait en un gnomon dont l'ombre était projetée sur une bande en bronze possédant des encoches orthogonales. Cette méridienne a probablement servi à indiquer le choix correct de l'année bissextile tous les quatre ans, bien qu'il n'y ait pas de source historique pour le confirmer. En 1980, un plancher de travertin contenant une petite partie de la ligne de méridienne a été découvert.

L'approche que nous avons utilisée a commencé avec un levé géomatique de haute précision de sa géométrie, en utilisant de multiples techniques de levé pour obtenir des résultats précis et de haute précision. Cette approche originale a permis de déterminer la position des encoches avec une incertitude inférieure à 3 mm.

Pour reconstruire les deux grandeurs fondamentales H et D_0 , respectivement la hauteur du gnomon et la distance de ses axes à partir de l'encoche la plus méridionale de la partie découverte du méridien, il faut assigner une valeur d'angle spécifique à chaque encoche. Cet angle correspond à l'ombre portée par le gnomon à une date particulière et a été déterminé par des calculs astronomiques. Deux hypothèses ont été faites: premièrement, que chaque encoche représentait un jour de l'année et, deuxièmement, que chaque encoche correspondait à un degré de longitude écliptique.

Dans ce contexte, il est important de noter que les données indiquent clairement que le revêtement méridien visible reste largement insensible aux déplacements significatifs. Cette conclusion découle de l'observation de l'alignement horizontal quasi parfait du sol. Maintenir une horizontalité aussi précise aurait été improbable en présence de déplacements ou de déformations, qui présentent généralement une composante différentielle distincte. De plus, les dalles semblent parfaitement assemblées, sans aucun espace ni déplacement susceptible d'indiquer des déformations du sol lui-même.

Les données se rapportant à 4 BCE ont été traitées avec deux modèles informatiques différents («topographic» et «pseudo-observations»), tous deux basés sur le critère des moindres carrés qui fournissait essentiellement les mêmes estimations des inconnues (D_0 et H) avec des différences inférieures à 2 cm entre les deux modèles. Dans le modèle des «pseudo-observations», qui a abouti aux plus précises, les incertitudes (en termes d'écart type) associées aux valeurs estimées sont respectivement de 3 et 5 cm pour D_0 et H .

Comme mentionné ci-dessus, deux hypothèses différentes peuvent être faites sur la fonction des encoches. Soit peut indiquer ces encoches représentant des jours ou bien elles correspondent à la valeur d'un degré de la longitude écliptique. Alors que dans une année bissextile, le nombre de jours est de 366, le nombre de degrés écliptiques est de 360 chaque année. Sur la longueur totale de la méridienne, les différences entre les deux hypothèses sont faibles. Toutefois, ils ne sont pas négligeables compte tenu de la précision obtenue dans nos mesures. Les écarts types obtenus dans l'hypothèse encoche/degrés sont beaucoup moins précis, d'où plusieurs dizaines de cm, alors que dans l'hypothèse des encoches/jours, les écarts-types sont de quelques cm. Il en est conclu que l'ajustement des données est meilleur avec l'hypothèse des encoches/jours.

Cela renforce deux hypothèses. La première est que le cadran solaire représentait une matérialisation monumentale de la réforme calendaire d'Auguste, démontrant l'efficacité des corrections apportées. La seconde est qu'il servait également à illustrer le passage des jours ce qui ne pourraient être appréciés que par la grande dimension du gnomon.

En élargissant les considérations de 9 à 1 avant J.-C. (Tab. S1) et donc en incluant deux années bissextiles, la moyenne des valeurs obtenues pour H et D_0 s'écarte d'environ un cm des résultats précédents rapportés dans le tableau 1 pour 4 avant J.-C.

Le niveau de précision qui est considéré comme atteint pour les inconnues H, D_0 est de quelques cm.

Les travaux actuels ont ainsi établi la géométrie complète de l'instrument à partir de tous les éléments actuellement visibles. Les estimations que nous avons calculées sous les différentes hypothèses s'écartent sensiblement des valeurs supposées par Auber ³³ et ne sont donc pas compatibles avec l'hypothèse des 100 pieds romains si l'on considère (comme le fait Auber) le pied romain de 0,296 m, l'estimation la plus répandue et acceptée ^{34,35}. L'hypothèse de Schutz²⁷, en revanche, semble mieux correspondre à notre estimation sous l'hypothèse des encoches comme étant des degrés d'écliptiques.

Il est utile de noter que l'hypothèse d'Auber de 100 pieds serait beaucoup plus proche des valeurs estimées par Schutz et dans cette contribution si la dimension du pied Attic (0,308 m) était prise en compte.

En conclusion, les résultats que nous considérons comme les plus fiables (hypothèse de l'encoche/jours, modèle 2) sont : la hauteur du gnomon (différence de hauteur entre le sommet du gnomon et le niveau du plancher découvert), 31,15 m; la distance de l'axe du gnomon à l'encoche visible la plus méridionale, 14,94 m; la longueur totale de la piste (du solstice d'été d'été à le solstice d'hiver).

Ces indications indiquent que l'obélisque développe une ombre maximale de 73,46 m (14,94 m + 58,52 m) sur le sol au solstice d'hiver. Cette longueur se situe bien dans la plage de 80 m dont Hannah ¹² a démontré empiriquement comme étant une distance à l'intérieur de laquelle l'ombre d'une structure de telles dimensions reste nettement visible.

Notre estimation de la hauteur du gnomon peut être comparée aux données dérivées de Stuart (27,85 m) et De Marchis (28,44 m). Les différences entre ces valeurs vont de 2,71 à 3,3 m et ne peuvent s'expliquer uniquement par la taille possible du globe. Cela confirme l'hypothèse de l'existence, sous les socles, d'une base supplémentaire pour laquelle nous n'avons pas de mesure, mais qui pourrait correspondre au «septem gradus circum» mentionné vers 1500 par Pomponio Leto.

Il convient de noter que, les différences entre les valeurs astronomiques utilisées dans sa construction pendant la période augustiniennne et celles de la période Flaviennne étant négligeables, cette nouvelle reconstruction ne fournit pas de données supplémentaires pour l'appui à la datation de l'une ou l'autre période. L'hypothèse « Domitienne » repose principalement sur l'élévation à laquelle le méridien a été découvert, qui semble être supérieur au niveau typiquement associé à la phase Auguste. Cependant, il ne peut être exclu que le plancher du cadran solaire ait été conçu à l'origine pour être élevé au-dessus de la surface de marche contemporaine. Un tel choix de conception aurait été tout à fait logique, en particulier compte tenu de la sensibilité de la zone aux fréquentes inondations par le Tibre.

Les données issues de cette étude faciliteront également toute nouvelle excavation des segments survivants du méridien, qui, selon toute vraisemblance, sont encore enterrés dans ce secteur du Campus Martius.

En outre, la reconstruction géométrique précise a permis une reconstruction virtuelle fidèle et précise qui sera vue dans une présentation multimédia disponible sur Google Earth.

Méthodes

Pourquoi un relevé géomatique est-il nécessaire?

Pour vérifier certaines hypothèses sur le fonctionnement de la méridienne, les études historiques doivent s'accompagner d'une connaissance approfondie de la géométrie de l'artefact et en particulier de la position des encoches dans la seule partie mise en lumière. Étant donné qu'il n'existe pas de documentation complète sur le sujet, des enquêtes approfondies ont été réalisées à l'aide de diverses techniques pour vérifier la fiabilité des résultats obtenus.

Le levé géomatique fournit la position absolue du méridien et les distances d_i entre les 25 des 28 encoches consécutives disponibles, tandis que les considérations astronomiques permettent à chaque encoche d'être associée à un angle zénithal ζ_i (l'angle entre la ligne de visée de l'observateur au soleil et la verticale locale) d'estimer à la fois la hauteur H du gnomon et sa distance horizontale D_0 à la première (plus au sud) encoche.

La géométrie des encoches joue un rôle clé et peut être observée en effectuant des levés géomatiques précis sur la découverte. En effet, les différentes techniques de levés géomatiques (Total Station, Solstrial Laser Scanner, Digital Photogramtry) ont été utilisées pour obtenir des résultats indépendants dont la congruence fournit le niveau de fiabilité du résultat obtenu.

Le nombre d'observations est très redondant par rapport à celui des inconnues, de sorte qu'un critère des moindres carrés peut être adopté pour le traitement, ce qui permet d'estimer les dimensions du méridien avec beaucoup plus précisément qu'avec un simple calcul trigonométrique qui n'exploite pas toutes les mesures prises. En outre, l'approche statistique permet la valeur de l'indétermination avec laquelle les inconnues sont estimées, en termes d'écart type.

Deux modèles d'ajustement différents peuvent être adoptés, dont le premier appelle une approche *géomatique* (en considérant des mesures d'angles et de distances entre points) et le second considère directement la relation géométrique entre l'observation et les inconnues.

Relevé géomatique

L'étude de la partie du sol méridien, située dans une cavité souterraine située à environ 7 m au-dessous du niveau actuel du sol, a nécessité l'utilisation combinée de techniques géomatiques traditionnelles et de méthodes satellitaires en raison de la complexité du site et de la zone urbanisée environnante [36,37](#).

L'étude a été géoréférencée dans le cadre géodésique national ETRF2000/RDN2008 (EPSG:6708) au moyen d'un réseau GNSS local externe relié à certaines stations du réseau permanent du Latium GNSS [38](#). La salle souterraine était alors reliée à une traversée 3D (Total Station measures) au réseau GNSS externe, et enfin des études détaillées ont été réalisées avec la station totale, la photogrammétrie et le balayage laser pour une description précise et contrôlée de la découverte.

Réseau GNSS

A la demande de la surveillance de géoréférencer, un réseau GNSS a été mis en place à l'extérieur, sur la «Piazza del Parlamento» (Place du Parlement) à proximité. Ce réseau local se compose de 3 sommets, matérialisés par des marqueurs métalliques. Sur les 3 points, une session de mesure en mode statique d'une durée d'environ 4 h a été réalisée avec des récepteurs géodésiques GPS/GLONASS à double fréquence.

Les 3 sommets GNSS locaux ont été connectés à 4 stations permanentes du réseau GNSS de la région du Latium, dont les coordonnées sont connues avec une précision inférieure à la précision

du niveau de référence géodésique italien RDN [39](#). Le réseau de 7 points obtenu a été post-traité à l'aide de Topcon Tools 8.2.3 [40](#).

Trois solutions différentes ont été calculées:

- une contrainte minimale, en ne connectant que la station permanente la plus proche (4 points);
- une contrainte minimale, reliant les 4 stations permanentes et assumant la plus proche en tant que réseau fixe (7 points);
- les 4 stations permanentes supposées comme un réseau fixe (7 points).

Les trois solutions ont fourni pour les sommets GNSS locaux presque des valeurs de coordonnées confondues, avec des variations de plus ou moins 1 - 2 mm. Les écarts types des coordonnées sont d'environ 1 mm (horizontal) et 2 mm (vertical).

En ce qui concerne l'altimétrie, la solution GNSS a fourni des hauteurs ellipsoïdales, converties ultérieurement en hauteurs orthométriques à l'aide du modèle national de géoside [41](#) d'ITALGEO 2005.

Traversée de connexions extérieures intérieures

Pour le géoréférencement de la salle souterraine comprenant les artefacts méridiens, un réseau géodésique local tridimensionnel (travers) a été établi reliant les trois sommets GNSS extérieurs aux espaces intérieurs. Cette partie du réseau géodésique a été mesurée avec une station totale et des prismes, remplacées par des cibles opaques pour les jambes transversales les plus courtes, où les centres cibles prismatiques n'étaient pas reconnaissables en raison du fort grandissement de l'optique de l'instrument.

La traversée comprend 10 sommets et travées de la *Piazza del Parlamento* aux espaces souterrains, en passant par *la Via di Campo Marzio*, puis le long des couloirs intérieurs et des escaliers du bâtiment, jusqu'à ce qu'elle atteigne la pièce où une partie du méridien a été découverte. Les mesures ont été effectuées deux fois dans les deux sens (avant et arrière). Toutes les mesures totales de la station ont été répétées 3 fois en position droite et 3 fois en sens inverse. Des dispositifs de centrage forcé ont été utilisés pour tous les points.

L'ajustement du réseau a fourni des intervalles de confiance de 95 % inférieurs à 1 cm dans toutes les directions.

Enquête détaillée sur le méridien

Les restes du méridien, constitués de plaques métalliques au sol de la pièce souterraine, ont été mesurés au moyen de trois techniques différentes, toutes soutenues par le réseau décrit ci-dessus [37,43,44](#).

a) Relevé total direct des postes

De la dernière traversée au-dessus de la salle souterraine méridienne, les points d'intersection entre la bande longitudinale sud/nord métallique et les encoches transversales ont été directement mesurés au moyen de la station totale (Fig. 4 B).

Pour chaque intersection, 4 points ont été mesurés aux coins de la « transversale » formée par les bandes métalliques. Les coordonnées de l'axe de la bande longitudinale ont ensuite été calculées en coordonnées de la moyenne des points du côté est et de l'ouest.

b) Relevé de scanner laser terrestre (TLS)

Après le chemin de traversée de l'extérieur vers la salle méridienne souterraine, 12 balayages laser se chevauchant ont été effectués. Les applications de cette technique aux sites

archéologiques sont décrites par exemple dans Lerma et al.⁴³ Les balayages laser ont été acquis avec un scanner de différence de phase FARO Focus 3D X130.

Pour l'orientation relative et absolue des balayages, on a utilisé 21 cibles carrées en damiers de 20 x 20 cm (dont les centres avaient été mesurés avec la station totale des sommets traversés) et un ensemble de six sphères étalonnées de 145 mm de diamètre (uniquement pour l'orientation relative). De cette manière, les résultats de l'étude TLS ont été géoréférencés dans la même donnée que le réseau géodésique.

Les scans, traités avec le cyclone 9.2.1⁴³, ont produit un modèle tridimensionnel de l'espace intérieur incluant la partie visible du méridien. La figure 4 A montre le nuage de points global des 12 balayages laser fusionnés.

Les points d'intersection entre les bandes métalliques longitudinales et transversales ont été récemment mesurés sur ce modèle 3D, donc de manière indépendante à partir de la mesure totale de la station décrite ci-dessus. Les coordonnées obtenues à partir de ce résultat de la méthode étaient presque confondues avec celles mesurées directement avec la station totale: les différences se situent entre plus ou moins 1 - 2 mm.

c) Relevé photogrammétrique

Une enquête précise par photogrammétrie numérique a également été réalisée, obtenant un modèle 3D et un orthophonie (Fig. 4 B) du plancher méridien indépendant de celui dérivé de TLS. L'orientation relative et absolue des images numériques était basée sur les mêmes objectifs que ceux utilisés pour l'enquête TLS.

Sur le modèle 3D dérivé de la photogrammétrie, les coordonnées d'intersection des bandes ont été mesurées pendant une troisième fois, obtenant des valeurs en accord avec les deux autres méthodes dans une plage de plus ou moins 1 - 2 mm.

Les distances entre les 25 encoches consécutives ont finalement été calculées pour procéder à une estimation de la hauteur du gnomon et de sa distance horizontale de l'encoche la plus méridionale de la partie visible du méridien.

Bien que les écarts types formels soient de l'ordre de 1 à 2 mm, compte tenu de la complexité de l'enquête, nous jugeons plus approprié pour évaluer l'incertitude des distances de l'ordre de 3 à 5 mm. Les coordonnées locales figurent dans le fichier supplémentaire (Tab. S2, paragraphe 1.4).

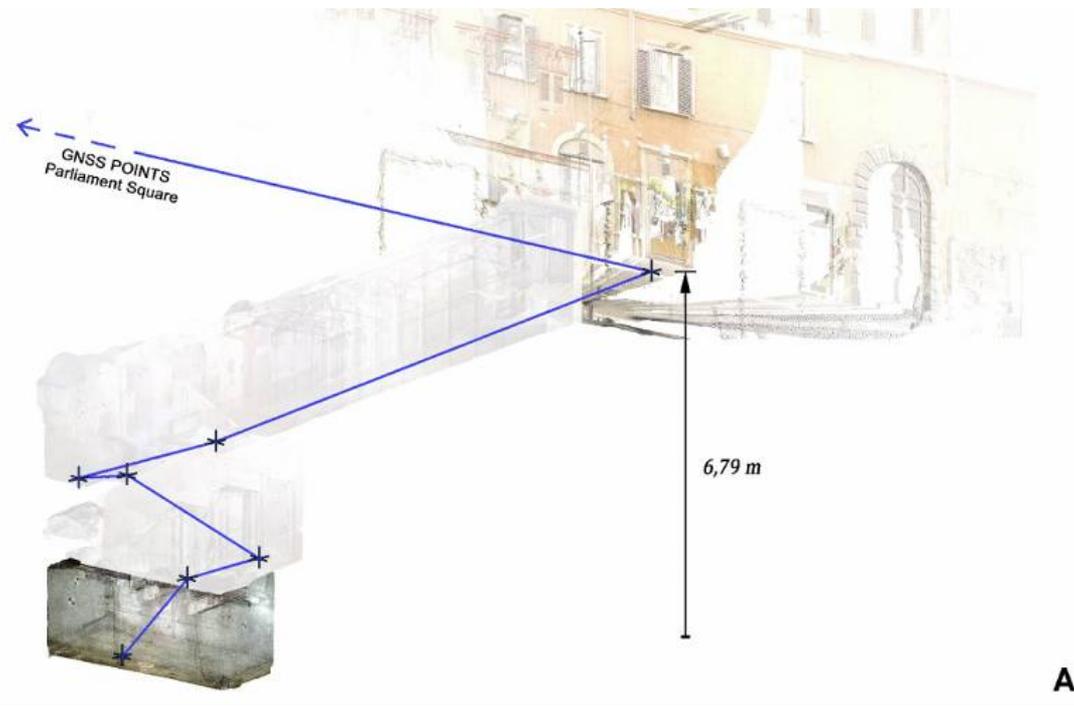
Considérations astronomiques

Une méridienne est un dispositif dont le but est de marquer l'heure et le jour de l'année en utilisant l'ombre du soleil projetée par un gnomon sur une surface plane. La projection de points de la sphère céleste d'un point de vue positionné en son centre équivaut à la construction d'une carte gnomonique. La projection du chemin du soleil les jours des solstices (parallèle de déclinaison) sera représentée par deux arcs d'hyperbole ; d'autre part, la projection de l'équateur céleste, un grand cercle qui est le chemin du soleil durant les deux jours d'équinoxe, est une droite (Fig. 5). Les marques extrêmes de l'ensemble du méridien ne sont touchées par l'ombre du gnomon qu'une fois par an : au solstice d'été ou au solstice d'hiver. Plus précisément, pour une méridienne située dans l'hémisphère nord à une latitude supérieure à l'obliquité de l'écliptique, le gnomon projette son ombre sur le signe le plus méridional le jour du solstice d'été et sur le signe le plus septentrional le jour du solstice d'hiver. Dans ces deux cas, le soleil atteint sa déclinaison maximale et minimale, respectivement, comme le montre la figure 5. Les autres marques transversales sur le méridien (comme celle d'Auguste) sont généralement utilisées pour indiquer un jour qui tombe entre des

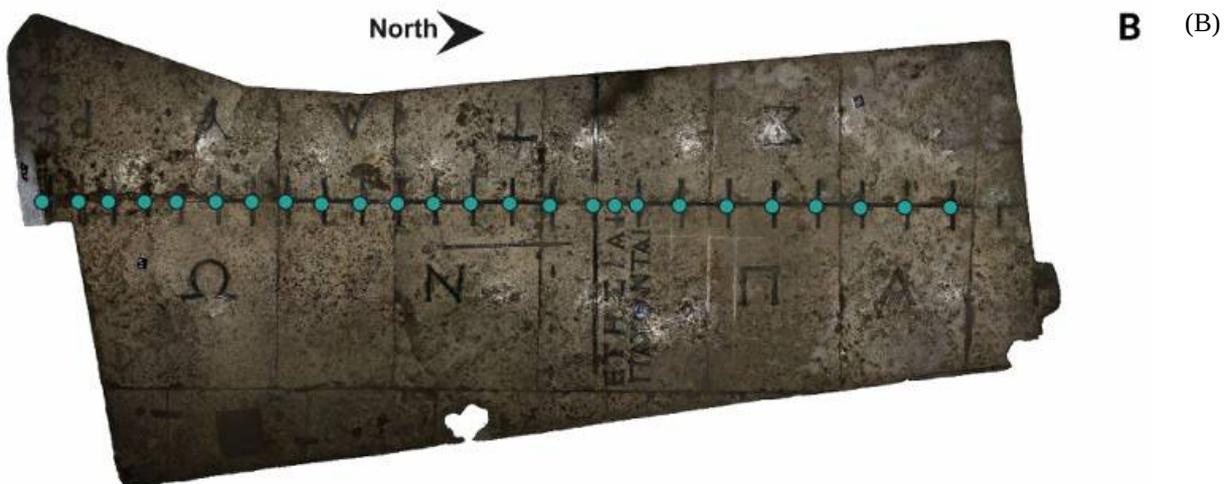
événements astronomiques particuliers (comme le jour entre un équinoxe et un solstice); elles sont touchées par l'ombre du soleil deux fois par an, comme le signe équinoxe atteint les jours d'équinoxe lorsque la déclinaison astronomique du soleil est nulle.

Vraisemblablement, la méridienne d'Auguste devait montrer que la durée de l'année était de 365 jours et quart et, par conséquent, que la réforme du calendrier julien avait été correctement appliquée en interposant une année bissextile de 366 jours après trois ans de 365 jours. Après une période de 4 ans, le soleil occuperait la même position dans le ciel et ainsi un obélisque de hauteur considérable jetait son ombre le même jour sur les signes de la même journée occupée 4 ans plus tôt. Plus l'obélisque est élevé, plus la différence entre la position de l'ombre le même jour dans différentes années est visible. En termes astronomiques, cela implique que la déclinaison du soleil lorsqu'il traverse la ligne méridienne n'est pas exactement la même le même jour en deux années adjacentes, mais a des cycles de quatre ans.

Fig. 4
(A)
Colonge
global de



balayages laser fusionnés (Cyclone 9.2.1 ⁴²);



Orthophoto de l'ancienne méridienne avec les encoches mesurées mises en évidence.

Cette tendance est évidente en calculant la déclinaison astronomique du soleil au passage du méridien de Rome le 4 septembre pour chaque année de 9B.C à 1B.C.; le résultat augmente régulièrement de 8,1° à 8,37° dans la période 9 av. J-C à 6 av. J-C., puis remonte à 8,09° en 5 av. J.-C), le comportement se répète au cours des quatre années suivantes, ce qui a permis d'obtenir 8,36° (2 av. J-C) et 8,08° en 1 av. J-C (Bissextile)

La même tendance est suivie de l'angle zénithal θ du soleil également. En effet, pour un observateur statique, cela ne dépend que de la déclinaison astronomique δ (Équation 1) car la latitude ϕ de l'obélisque est constante.

Fig. 5
Chemin du soleil et du gnomon (GeoGebra 6,0 866,0 ⁴⁶).

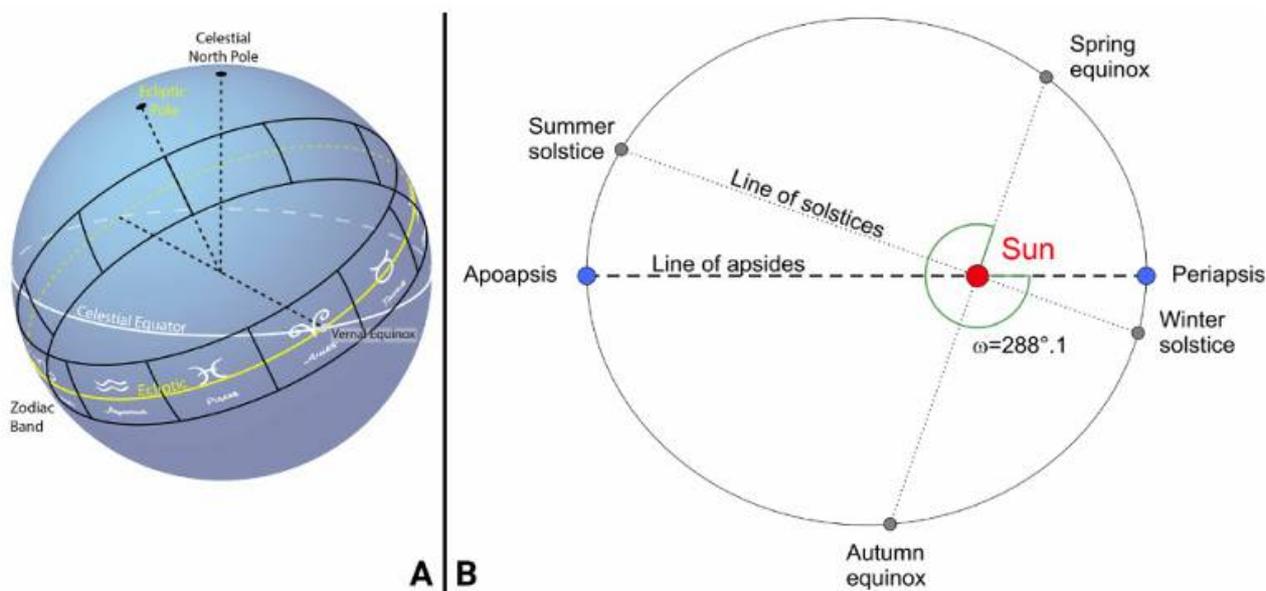
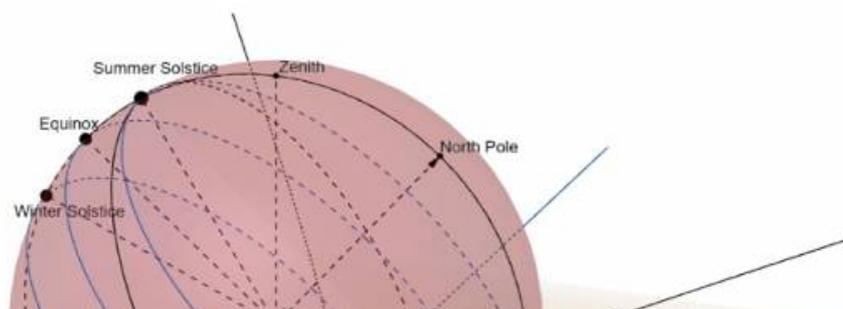


Fig. 6 A) Chemin annuel apparent de la constellation du soleil et du zodiaque; (B) Orbite de la Terre.

Dans son chemin apparent annuel sur la sphère céleste, le soleil, suivant l'écliptique, apparaît projeté sur les différentes constellations du zodiaque (Fig. 6A et B) ; sur la ligne méridienne d'Auguste, certains signes portant les noms du zodiaque sont gravés en bronze : en partie, les inscriptions Krios (Aries), Tauros (Taurus), Léon (Leo), Parthon (Virgo) et deux phrases météorologiques-calendaires ont été trouvées, reconnues par Auber ¹⁷ comme fragments d'un « parapegme », sorte de calendrier avec indications météorologiques insérées par rapport aux constellations du zodiaque.

Les deux phrases paraggétiques peuvent être traduites par « Les vents d'Etsii se terminent » et « L'été commence ». Il est donc possible d'attribuer, avec une certaine approximation, un jour de

l'année ou du degré et, par conséquent, la déclinaison qui sera indispensable pour calculer l'angle zénithal ζ associé à chaque encoche.

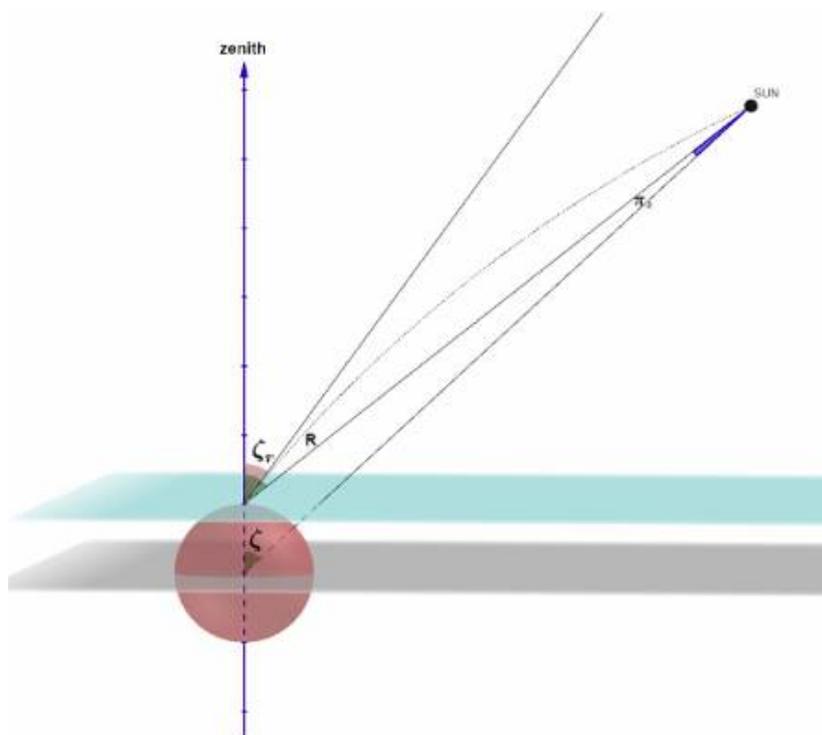


Fig. 7. Effet de la parallaxe diurne et de la réfraction atmosphérique sur le calcul de la distance zénithale

Auber ¹⁷ a considéré le 19e jour précédant l'équinoxe d'automne comme le jour correspondant à l'encoche la plus septentrionale de la partie visible du méridien. Dans son travail, Auber utilise un total de 28 crans, mais seulement 25 encoches peuvent être identifiées à partir de l'orthophoto (Fig. 4 A) en négligeant les deux crans les plus septentrionales et la dernière encoche la plus méridionale. Par conséquent, la référence temporelle devient le 21e jour avant l'équinoxe d'automne (ou après l'équinoxe de printemps) pour l'encoche la plus septentrionale, d'où les jours correspondant aux 25 crans vont du 11 août au 4 septembre (ou du 12 avril au 6 mai).

Il est donc nécessaire de connaître le jour exact de l'équinoxe d'automne d'il y a environ 2000 ans. À une époque historique, l'année 4 av. J.-C. a été choisie, une année bissextile proche de l'époque où Auguste a construit le méridien à Campo Marzio.

Les déclinaisons du soleil, ainsi que les instants des équinoxes et des solstices, ont été estimées à l'aide de l'outil Nasa Horizons ²⁸.

Hypothèse alternative : jours ou degrés ?

Cette analyse tient compte de l'hypothèse que de nombreuses méridiennes du passé ont été construites en appariant chaque encoche à un degré de longitude écliptique du soleil. Par conséquent, chaque encoche correspondrait à 1° d'écliptique et la méridienne serait ainsi divisée en douze sections, chacune de 30 degrés, c'est-à-dire les douze constellations du zodiaque. À partir de cette hypothèse, Auber a utilisé le parapghome grec pour reconstruire la méridienne, y compris la partie manquante. Dans ce cas, la déclinaison du soleil correspondent à chaque encoche peut être calculée à l'aide de l'équation suivante :

$$\sin \delta = \sin \lambda \sin \varepsilon \quad (2)$$

Où ε est l'obliquité de l'écliptique, tandis que λ représente la longitude écliptique. Dans l'hypothèse d'Auber selon laquelle l'ombre du soleil tombe sur la marque la plus septentrionale le 4 septembre, il y aurait 21 jours d'avance sur l'équinoxe d'automne (donc près de 21° de longitude écliptique).

Selon la norme définie par l'IUA (International Astronomical Union) , la valeur de l'obliquité de l'écliptique change lentement au fil des siècles et peut être modélisée par la formule suivante :

$$= 23^\circ 26' 21.448'' - 46.8150'' T - 0.00059'' T^2 + 0.001813'' T \quad (3)$$

où T est le temps mesuré à l'époque de Julien à partir des siècles d'époque J2000.0 ⁴⁹49; la valeur moyenne de l'obliquité écliptique calculée pour l'année de construction du méridien d'Auguste est de 23,6964 .

Correction des angles zénithal

Avant d'utiliser l'algorithme de calcul de la hauteur du gnomon, il est nécessaire de considérer que l'ombre portée par le gnomon sur la méridienne est influencée par la réfraction subie par les rayons du soleil traversant l'atmosphère. En outre, l'angle zénithal ζ doit être calculé pour un observateur placé à la surface de la Terre (et non en son centre), de sorte que la parallaxe diurne π_z du Soleil (comme indiqué à la figure 7) doit également être prise en compte.

L'effet de parallaxe peut être modélisé par l'expression suivante :

$$\pi_z = \frac{a(1 - s \sin^2 \phi)}{d} \sin \zeta \quad (4)$$

Où a et s représentent respectivement le demi-grand axe et l'aplatissement de l'ellipsoïde de référence, d la distance entre le centre de la Terre et le Soleil.

A des fins pratiques, l'ellipsoïde de référence peut être remplacé par une sphère et la distance au soleil peut être considérée comme constante. Cette correction, pour le soleil, ne dépasse pas 8,8", on peut utiliser la formule approximative suivante pour estimer la parallaxe diurne exprimée en secondes d'arc :

$$\pi_z = 8.749'' \sin \zeta \quad (5)$$

En ce qui concerne la réfraction atmosphérique R, il existe plusieurs algorithmes qui peuvent être utilisés pour modéliser son effet en fonction de l'angle zénithal réfracté ζ_r

$$R = A \cdot \tan \zeta_r - B \cdot \tan^3 \zeta_r \quad (6)$$

avec R exprimé en secondes d'arc, A = 60,39" et B = 0,07" et valide pour $\zeta_r < 80^\circ$ dans les conditions atmosphériques normales (t = 0° et P = 760 mm). Bennett ⁴⁸ suggère la formule suivante pour calculer la réfraction :

$$R = \cot \left(h_r + \frac{7.31^\circ}{h_r + 4.4^\circ} \right) \quad (7)$$

en fonction de l'élévation réfractée $h_r = 90^\circ$ exprimée en degrés et R exprimée en minutes d'arc. Saemundsson ⁴⁹ a développé une relation dans laquelle la réfraction est calculée en fonction de l'élévation réelle ($h = 90^\circ - \zeta_r$), et c'est précisément celle à utiliser dans notre cas :

$$R = 1.02 \cot \left(h + \frac{10.3^\circ}{h + 5.11^\circ} \right) \quad (8)$$

Dans les calculs à effectuer pour obtenir la hauteur du gnomon, les angles zénithaux réfractés ζ_r doivent être utilisés car c'est le chemin apparent des rayons du soleil qui est examiné, par conséquent la parallaxe diurne et les corrections de réfraction doivent être soustraites des angles zénithaux (Fig. 7).

Effet de l'excentricité de l'orbite

Un argument de périhélie presque égal à 288° (Fig. 6 B) produit un manque de coïncidence entre la ligne des apsides et la ligne des solstices pour l'orbite elliptique de la Terre autour du Soleil ; selon la deuxième loi de Kepler, il génère également à la fois une durée différente des saisons et une variation différente de la déclinaison du Soleil par rapport au solstice d'été. Par conséquent, la valeur absolue de la variation de la déclinaison solaire dans les mois de déclinaison croissante pendant un nombre donné de jours jusqu'à ce que le solstice ait une valeur différente si le même nombre de jours est examiné après le solstice. De même, la distance entre les deux encoches extrêmes du méridien qui sera incluse dans le calcul se référera à la modification de la déclinaison qui se produit en 25 jours, mais elle sera différente si cette période est considérée dans les mois ascendants ou descendants, même si cette période est symétrique par rapport au solstice. Cela signifie qu'un méridien qui doit être utilisé comme calendrier devrait avoir une double séquence d'encoches, une concernant la période des mois ascendants (du solstice d'hiver au solstice d'été), l'autre pour les mois descendants (du solstice d'été au solstice d'hiver)⁵⁰. La partie récupérée du méridien Auguste ne montre qu'une séquence d'encoches, et nous devons donc comprendre si cette séquence est plus appropriée pour les mois ascendants ou descendants. Il est utile de souligner que si l'argument du périhélie avait une valeur égale à 270° , il aurait été une parfaite coïncidence des encoches pour les mois ascendants et descendants.

Estimation de la hauteur et de la distance de gnomon par réglage des mesures

Le relevé géomatique fournit la position absolue du méridien et les distances d_i entre les 25 encoches consécutives, tandis que les considérations astronomiques permettent à chaque encoche d'être associée à un angle zénithal ζ_i (direction du soleil) d'estimer à la fois la hauteur H du gnomon et sa distance horizontale D_0 à la première encoche (plus grande), fig. 2. Le nombre d'observations est très redondant par rapport à celui des inconnues, de sorte qu'un critère des moindres carrés peut être adopté pour le traitement. Deux modèles d'ajustement différents peuvent être adoptés, dont le premier fait appel à une approche *géomatique* (en considérant des mesures d'angles et de distances entre points) et le second considère directement la relation géométrique entre observation et inconnues.

Approche géomatique. Modèle d'ajustement 1

Dans cette approche, le gnomon et les encoches sont considérés comme des points d'un réseau «planimétrique», reliés par des angles et des distances, et les inconnues d'intérêt (u) sont les coordonnées du gnomon. Considérons un système de référence local d'origine sur la première encoche de coordonnées (0,0), l'axe des abscisses le long du méridien et de l'axe des ordonnées le long de la verticale. Les centres des encoches et le gnomon sont les points à déterminer, appartenant

au plan vertical passant par l'obélisque et la partie visible du méridien. Les inconnues consistent donc en les coordonnées du gnomon (x_G, y_G) et des coordonnées x - les coordonnées des 24 encoches, contraintes sur l'axe x et donc par $y = 0$, c'est-à-dire ($x_i, 0$).

Les mesures considérées dans le réglage sont de 24 distances d_i entre encoches successives et de 25 angles α_i avec un sommet sur une encoche et des directions vers le gnomon et vers l'encoche adjacente (donc le long de l'axe x); ces angles sont facilement calculés à partir de ζ_i .

Pour chaque observation, nous considérons l'équation qui la relie aux inconnues (u) et l'introduction des résidus (v_i) nous obtenons un ajustement fonctionnel du modèle d'observations indirectes :

$$A u = f + v \quad (9)$$

Les observations sont considérées comme non corrélées avec un écart-type σ_d pour toutes les distances et σ_α pour tous les angles, de sorte que la matrice de variance donne des résultats diagonales Σ_{ii} ; le modèle d'ajustement statistique est de $W = \sigma_o^{-2} \Sigma_{ii}^{-1}$.

Les erreurs aléatoires associées aux mesures d'angle ne sont pas connues avec fiabilité et seules des hypothèses peuvent être faites à leur sujet.

La solution bien connue pour ce modèle est ⁵¹:

$$\hat{u} = (A^T W A)^{-1} A^T W f \quad (10)$$

$$\hat{\sigma}_0^2 = (v^T W v) / r \Sigma_{uu} = \hat{\sigma}_0^2 (A^T W A)^{-1} \quad (11)$$

La redondance r est la différence entre le nombre de mesures et le nombre d'inconnus. Σ_{uu} est la matrice de variation des variations des estimations.

Modèle de réglage des observations des pseudo-observations 2

Nous considérons pour chaque encoche, l'angle zénithal ζ_i et la distance de la première encoche D_i . La relation fonctionnelle (non-linéaire dans les inconnues) est :

$$H \tan(\zeta_i) = D_0 + D_i \quad (12)$$

En considérant la pseudo-observation $T = \tan \zeta$, la relation devient :

$$HT_i = D_0 + D_i \quad (13)$$

Cette contrainte doit être valide pour tout couple d'observations relatif à chaque encoche en y insérant les valeurs mesurées ($\sim T_i, \sim d_i$) et leurs corrections v_d et v_T ; la relation de contrainte étant non linéaire dans les inconnues, les valeurs initiales approximées h, d_0 et leurs corrections $\delta h, \delta d_0$ sont considérées pour les inconnues H et d .

Sous forme matricielle, l'équation relative aux mesures sur la i -ème encoche, en négligeant les quantités du second ordre, donne :

$$\begin{bmatrix} -1 & \tilde{T}_i \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta d_0 \\ \delta h \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \bar{h} & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{T_i} \\ v_{d_i} \end{bmatrix} = \tilde{f}_i ; \tilde{f}_i = \bar{d}_0 + \tilde{d}_i - \tilde{T}_i \bar{h} \quad (14)$$

L'ensemble des couples de mesures, pour $i = 1, 2, \dots, n$, (où n est le nombre d'encoches) forme le modèle de contrainte suivant (dont les rangs sont données par la formule précédente):

$$A \begin{bmatrix} \delta d_0 \\ \delta h \end{bmatrix} + B \begin{bmatrix} v_{T_1} \\ \cdot \\ v_{T_n} \\ v_{d_1} \\ \cdot \\ v_{d_n} \end{bmatrix} = \tilde{f} \quad (15)$$

Dans ces travaux, on utilise un ajustement combiné des observations et des paramètres:

$$A u + B v = \tilde{f} \quad (16)$$

En ce qui concerne le modèle stochastique [52](#), en indiquant avec σ_d l'écart type associé aux mesures D et à σ_ζ ceux des déclinaisons, on obtient la loi de propagation de la covariance de variance aux pseudo-mesures T_i .

Chaque mesure est considérée comme non corrélée par rapport à toutes les autres, par conséquent la matrice de variance des observations Σ résultats:

$$\Sigma_T = \text{diag} \left((1 + T_i^2)^2 \sigma_\zeta^2 ; i = 1, 2, \dots, n \right) \quad \Sigma_d = \sigma_d^2 I_n \quad (17)$$

$$\Sigma = \text{diag} (\Sigma_T, \Sigma_d) = \text{diag} (\sigma_{T_1}^2, \sigma_{T_2}^2, \dots, \sigma_{T_n}^2, \sigma_{d_1}^2, \sigma_{d_2}^2, \dots, \sigma_{d_n}^2) \quad (18)$$

Définition du modèle statistique

$$W = \sigma_0^2 \Sigma^{-1} \quad (19)$$

ensemble

$$W_e = (B W^{-1} B^t)^{-1} \quad (20)$$

la solution est donnée par:

$$\hat{u} = (A^t W_e A)^{-1} A^t W_e \tilde{f} \quad (21)$$

et la matrice de variance des estimations est la suivante:

$$\hat{\sigma}_0^2 = \frac{\hat{v}^t W \hat{v}}{r} \Sigma_{uu} = \hat{\sigma}_0^2 (A^t W_e A)^{-1} \quad (22)$$

Disponibilité des données

L'ensemble des données utilisées et analysées au cours de la présente étude sont disponibles auprès de l'auteur correspondant sur demande raisonnable.

Références

1. Pline l'aîné. *Naturalis Historia*. vol. 36.71-73.
2. Buchner, E. Horologium solarium Augusti. Bericht Aber die ausgrabungen 1979/80. *Mitteilungen Des. Deutschen Archologischen Instituts de la République de Macédoine Abteilung*. **87**, 355-373 (1980).
[Google Scholar](#)
3. Buchner, E. *Die Sonnenuhr Des Augustus* Mayence,. (1982).
4. Heslin, P. J. Le code d'auguste: une réponse à L. Haselberger. *J. Archaeol romain*. **24**, 74-77 (2011).
[Article Google Scholar](#)
5. Haselberger, L. Le «horologum»: où en sommes-nous et où devrions-nous aller? *J. Archaeol romain. Ser.f. supplémentaire*. **99**, 167-201 (2014).
[Google Scholar](#)
6. Frischer, B. Le solarium d'Edmund Buchner Augusti: nouvelles observations et études limpides. *Atti Della Pontificia Accad. Romana Di Archéologia Rend.* **LXXXIX**, 3-90 (2017).
[Google Scholar](#)
7. Schotz, M. Sonnenhur des augustus auf dem Marsfeld. *Gymnase* **97**, 432-457 (1990).
[Google Scholar](#)

8. Heslin, P. Le calendrier julien et le méridien solaire d'Auguste: faire courir à Rome à temps. dans *L'histoire culturelle de la Rome d'Augustan: Textes, Monuments, et Topographie* (éds Loar, M. P., Murray, S. C. Rebggiani, S.) 45-79 (Cambridge University Press, Cambridge, doi: <https://doi.org/10.1017/9781108635806.004>. (2019).
[Chapter Google Scholar](#)
9. Polverini, L. Augusto e Il contròlelo Del tempo. dans *Studi Su Augusto à Occasione Del XX Centenario Della Morte* (dir. publ. Valvo, A.) 95-114 (Giappichelli, Turin, (2016).
[Google Scholar](#)
10. Buchner, E. Horologium Augusti. dans *Via Del Corso. Una Strada Lunga 2000 Anni* (dir. publ.) 159 à 163 (Roma, (1999).
11. Buchner, E. Mayence,. Unter den Strassen und Kellern Roms, Sonnenuhr und Augustus-Musolée. dans *Archologische Entdeckungen. Die Forschungen des Deutschen Archologischen Instituts im 20. Jahrhundert 179-1883* (2000).
12. Hannah, R. Le horologium de l'auguste comme un cadran solaire. *J. Archaeol romain*. **24**, 87-95 (2011).
[Article Google Scholar](#)
13. Haselberger, L. Un débat sur le horologium d'Auguste: controverse et clarification. *J. Archaeol romain*. **24**, 47-73 (2011).
[Article Google Scholar](#)
14. Rodriguez-Almeida, E. Il Campo Marzio settentrionale: Solarium e Pomerium. *Atti della Pontificia Accademia Romana di Archeologia. Rendiconti LI-LII* 195-212 (1980). (1978-1980).
15. Schotz, M. Le horologium sur le campus Martius a reconsidéré. *J. Archaeol romain*. **24**, 78-86 (2011).
[Article Google Scholar](#)
16. Heslin, P. Auguste Domitian et le So-Called horologium Augusti. *J. Stud romain*. **97**, 1-20 (2007).
[Article Google Scholar](#)
17. Albèri Auber, P. Reconstruire l'obélisque de Montecitorio d'Auguste : un point de vue du magnosoniste. *J. Archaeol romain. Ser.f. supplémentaire*. **99**, 63-76 (2014).
[Google Scholar](#)
18. Frischer, B. Fillwalk, J. Nouvelles études de simulation numérique sur l'obélisque, le méridien et Ara Pacis de l'autustus. *J. Archaeol romain. Ser.f. supplémentaire*. **99**, 77-90 (2014).
[Google Scholar](#)
19. Bill, R. Vermessungsarbeiten am horologium solarium Augusti. *Allgemeine Vermessungs-Nachrichten*. **90**, 147-154 (1983).
[Google Scholar](#)
20. Buchner, E. Solarium Augusti und Ara Pacis. *Mitteilungen Des. Deutschen Archologischen Instituts de la République de Macédoine Abteilung*. **83**, 319-365 (1976).

[Google Scholar](#)

21. Bandini, A. M. *De Obelisco Caesaris Augusti E Campi Martii Ruderibus Nuper Eruto Commentarius* (Palearini, 1750).
22. Frischer, B. Le solarium d'Edmund Buchner Augusti: nouvelles observations et études limpides. *Atti Della Pontificia Accad. Romana Di Archéologia Rend. LXXXIX*, 20-90 (2017).
23. Alfildy, G. Le horologium d'auguus et son modèle à Alexandrie. *J. Archaeol romain*. **24**, 96-98 (2011).

[Article](#) [Google Scholar](#)

24. *Le Britannica Guide des nombres et des mesures*. (Britannica Educational Publishing, New York, (2011).
25. zagari, F. Piazza Montecitorio: progetto di riqualificazione ambientale 1996-1998. *Camera dei deputati* (1998).
26. Albèri Auber, P. L'obelisco Di Augusto in Campo Marzio e La Sua linea Meridiana. Aggiornamenti e Proposte, in rendiconti Della pontificia accademia Romana Di archéologia. *Atti Della Pontificia Accad. Romana Di Archéologia Rend.* **84**, 447-580 (2012).

[Google Scholar](#)

27. Schotz, M. Gnomoniques anciennes et modernes: préoccupations et clarifications. *J. Archaeol romain. Ser.f. supplémentaire.* **99**, 91-99 (2014).

[Google Scholar](#)

28. Système Horizons. NASA Jet Propulsion Laboratory, Institut de technologie de Californie. (2023).
29. Andrews, J. et al. Validation de l'imagerie faciale tridimensionnelle capturée avec une application de photogrammétrie basée sur un smartphone par rapport au système de stéréophotogrammétrie. *Heliyon* **99**, e15834 (2023).

[Article](#) [PubMed](#) [PubMed Central](#) [Google Scholar](#)

30. Nocerino, E. et al. Reconstruction 3D avec une approche collaborative basée sur les smartphones et un serveur basé sur le cloud. *Int. Arch. Photogrammes à distance Sens. Spat. Inf. Sci.* **XLII-2/W8XLII-2/W8**, 187-194 (2017).

[Article](#) [Google Scholar](#)

31. Agisoft. *Agisoft Metashape (Version 2.0.2)*. <https://agisoft.com>. Il a été consulté le 5 mars (2025).
32. Fondation Blender. *Blender (Version 4.0)*. <https://www.blender.org/>. A eu lieu 5 mars 2025.
33. Albèri Auber, P. L'altèza dell'obelisco Di Augusto (en italien). *Atti Della Pontificia Accad. Romana Di Archéologia Rend.* 2014-2015. **87**, 451-472 (2015).

[Google Scholar](#)

34. Jacono, L. Treccani enciclopèia italiana: Piede. *Treccani enciclopèia italiana* (2023).
35. Camporeale, S. Le unità di misura nella progettazione architettonica dans Mauretania Tingitana. *Dialogues d'histoire* anciennement Supplément no 12, 79-100 (2014).

36. Baiocchi, V., Barbarella, M., D'Alessio, M. T., Lelo, K. Troisi, S. Le cadran solaire d'Auguste et son enquête: questions non résolues et solutions possibles. *Acta Geod. Géophys.* **51**, 527-540 (2016).
[Article](#) [ADS](#) [Google Scholar](#)
37. Baiocchi, V. et al. Techniques géomatiques intégrées pour géoréférencer et reconstruire la position des sites archéologiques souterrains: l'étude de cas du cadran solaire Auguste (Rome). *Sens à distance*. **12**, 4064 (2020).
[Article](#) [ADS](#) [Google Scholar](#)
38. Région des Abruzzes. Informatione utenti rete GNSS – Région des Abruzzes. Collegio dei Geometri e dei Geometri Laureati della Provincia di Pescara. (2023).
39. Giorgini, E. et al. 15 Years of the Italian GNSS geodetic reference frame (RDN): analyse préliminaire et considérations. in *Geomatics for Green and Digital Transition* (eds Borgogno-Mondino, E. - zamperlin, P.) vol. 1651 3-14 (Springer International Publishing, Cham, (2022)).
[Chapter](#) [Google Scholar](#)
40. Topcon *Topcon Tools (Version 8.2.3)*. <https://mytopconcon.com/it/support/products/topcon-tools> (2025). Consulté le 5 mars 2025.
41. Barzaghi, R., Borghi, A., Carrion, D. Sona, G. Affinement de l'estimation du quasi-génoïde italien. *Bollettino di Geodesia e Scienze Affini, Institut italien de géographie militaire (IGM)* LXVI no 3, (2007).
42. Leica Géosicaux. *Cyclone (Version 9.2.1)*. <https://leica-geosystems.com/--/media/files/leicageosystems/products/products/release%20notes/leicacyclone93rnen.ashx?la-pl-pl-hash-81FA34B2A9194B829DA0EEC97553E0B7>. Consulté le 5 mars 2025.
43. Baiocchi, V. et al. Augusto's sundial: la modélisation basée sur l'image pour l'ingénierie inverse *Int. Arch. Photogrammes à distance Sens. Spat. Inf. Sci.* **XLII-2/W3XLII-2/W3**, 63-69 (2017).
[Article](#) [Google Scholar](#)
44. Baiocchi, V., Piccaro, C., Allegra, M., Giammarresi, V. Vatore, F. Imagerie de la technologie Rover: caractéristiques, possibilités et améliorations possibles. *J. Phys. : Conf. Ser.* **11101110**, 012008 (2018).
[Google Scholar](#)
45. Lerma, J. L., Navarro, S., Cabrelles, M. Villaverde, V. Scanner par laser terrestre et photogrammétrie à courte distance pour la documentation archéologique 3D: la grotte paléolithique supérieure de Parpall en tant qu'étude de cas. *J. Archaeol. Sci.* **37**, 499-507 (2010).
[Article](#) [Google Scholar](#)
46. GeoGebra. *App GeoGebra (Ver. 6.0.876)*. <https://www.geogebra.org/download?langen>. Consulté le 5 mars 2025.
47. États-Unis, Naval et Observatoire - H.M. Bureau d'almanach nautique. L'almanach astronomique pour l'année 1990. *Gouvernement des États-Unis (Printing Office)* B18 (1989).

48. Bennett, G. G. Le calcul de la réfraction astronomique dans la navigation maritime. *J. Navig.* **35**, 255-259 (1982).

[Article](#) [Google Scholar](#)

49. Saemundsson, T. *Réfraction atmosphérique -skytel* **72**, 70 (1986)

[Google Scholar](#)

50. Fantoni, G. *Orologi Solari. Trattato Completo Di Gnomonica* (Technimedia Editore, 1988).

51. Mikhail, E. M. *Observations et moindres carrés* (Univ. Pr. d'Amérique, 1982).

52. Ghilani, C. D. *Calculs d'ajustement: Analyse des données spatiales* (Wiley, 2017).

[Télécharger les références](#)

Remerciements

Nous voudrions remercier Claudia Valeri et Guy Devreux pour leur aide lors de l'examen sur place de la base de la colonne Antoninus Pie; Roberta Ialongo, Ketil Lelo, Chiara Piccaro et Felicia Vatore pour leur aide pendant l'enquête.

Informations sur l'auteur

Auteurs et affiliations

1. Sapienza Université de Rome, Piazzale A.Moro, Rome, 00185, Italie

V. Baiocchi, M. T. D'Alessio et L. Alessandri

2. Soprintendenza speciale arche, belle arti e paesaggio di Roma, Piazza dei Cinquecento 67, Rome, 00185, Italie

M. Baumgartner

3. Université de Bologne, DICAM, Viale Risorgimento 2, Bologne, 40136, Italie

M. Barbarella

4. Parthénope Université de Naples, Centro Direzionale Isola C4, Naples, 80183, Italie

S. Del Pizzo et S. Troisi

5. Université de Niccolo Cusano, Via Don Carlo Gnocchi 3, Rome, 00166, Italie

F. Giannone

6. Université de Pérouse, Via G. Duranti 93, Pérouse, 06125, Italie

F. Radicioni, A. Stoppini et G. Tosi

Contributions

V.B., Mau. B., M.D., S.D., F.G., F.R., A.S., G.T., S.A. et L.A. ont contribué à la conception et à la mise en œuvre de la recherche, M.D., Mars. B. et L. A. ont développé les recherches historiques, archéologiques et muséales nécessaires à la reconstruction historique correcte. Tous les auteurs ont contribué à l'analyse des résultats et à l'écriture du manuscrit.

Auteur correspondant

Correspondance à [V. Baiocchi](#).

Déclarations d'éthique

Intérêts concurrents

Les auteurs ne déclarent aucun intérêt concurrent.

Informations supplémentaires

Note de l'éditeur

Springer Nature reste neutre en ce qui concerne les revendications juridictionnelles dans les cartes publiées et les affiliations institutionnelles.

Matériel électronique supplémentaire

On trouvera ci-après le lien avec le matériel électronique supplémentaire.

[Matière supplémentaire 1](#)

Droits et autorisations

Cet article est sous licence Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 Licence internationale, qui permet toute utilisation, partage, distribution et reproduction non commerciale dans n'importe quel support ou format, à condition que vous accordiez le crédit approprié à l'auteur ou aux auteurs et à la source d'origine, fournissez un lien avec la licence Creative Commons, et indiquez si vous avez modifié le matériel sous licence. Vous n'avez pas l'autorisation en vertu de cette licence de partager des matériels adaptés dérivés de cet article ou de certaines parties de celui-ci. Les images ou autres éléments de tiers dans le présent article sont inclus dans la licence Creative Commons de l'article, sauf indication contraire dans une ligne de crédit sur le matériel. Si le matériel n'est pas inclus dans la licence Creative Commons de l'article et que l'utilisation prévue n'est pas autorisée par la réglementation légale ou dépasse l'utilisation autorisée, vous devrez obtenir l'autorisation directement du titulaire du droit d'auteur. Pour consulter le texte de cette licence, visitez [le site http://creativecommons.org/licenses/by-ncnd/4.0/](http://creativecommons.org/licenses/by-ncnd/4.0/).

[Réimpressions et autorisations](#)

À propos de cet article



Citer cet article

Baiocchi, V., Baumgartner, M., Barbarella, M. *et al.* Le fonctionnement du méridien solaire d'Auguste et la naissance de l'année ouest. *Sci Rep* **15**, 16463 (2025).
<https://doi.org/10.1038/s41598-025-00653-8>

[Télécharger la citation](#)

- Reçu 13 juillet 2024
- Accepté 29 avril 2025
- Publiée 12 mai 2025
- DOI <https://doi.org/10.1038/s41598-025-00653-8>

Partager cet article

Toute personne avec laquelle vous partagez le lien suivant pourra lire ce contenu :

Dispensé par l'initiative de partage de contenu de Springer Nature SharedIt

Mots clefs

- [Auguste](#)
- [Méridiens solaires](#)
- [Rome ancienne](#)
- [Année de saut](#)
- [Calendrier](#)
- [Ajustement des moindres carrés](#)
- [Gnomon](#)
- [Obélisque de Psamtik II](#)

Sujets

- [Instrumentation astronomique](#)
- [Génie civil](#)