Géoréférencement des plans historiques (du XVIIIe au XIXe) de la ville de Rome, et leur comparaison avec des cartes actuelles

Valerio Baiocchi[1] *, Keti Lelo*[2]

Cet article présente l'expérience actuellement en cours au Centre universitaire pour l'étude de Rome de l'université de Rome 3 (CROMA), en vue de la réalisation grâce à un SIG de l'*Atlas historique de la Rome moderne*. Dans notre approche, l'information géographique, quelle que soit son échelle de référence, est considérée comme le socle unificateur sur lequel il devient possible de décrire ales différents éléments territoriaux en termes de relations et de développement. Dans ce contexte, le SIG, utilisé adéquatement, constitue une aide fondamentale au processus d'intégration de la connaissance, synthétisant la transformation du passé, la gestion du présent et la planification de l'avenir.

Le géoréférencement de fonds cartographiques anciens constitue une opération au mieux complexe qui requiert l'évaluation minutieuse des caractéristiques de chaque plan. Les techniques cartographiques révolues vont de la pure représentation symbolique, en usage au XIIIe siècle, jusqu'à l'iconographie en projection verticale, en passant par le graphisme artistique des vues dites « à vol d'oiseau », courantes au XVIe au XVIIIe. Les seules cartes directement comparables avec les réalisations actuelles, et donc géoréférençables, sont celles du second groupe, quand bien même elles auraient été levées avec des instruments et des méthodes différentes de ceux en usage actuellement. Quoique la précision de la plupart de ces plans soit jugée remarquable, vu l'époque de leur réalisation, ils n'en demeurent pas moins entachés d'erreur de mesure qui dépassent les imprécisions graphiques actuellement tolérées. Les techniques SIG de calibration, géoréférencement et transformation de projections rendent possible la comparaison entre cartes anciennes et actuelles, en réduisant les effets des déformations des supports, ainsi que les imprécisions dues diverses méthodes de représentation et de levé.

Le travail présenté ici a consisté à étudier diverses méthodes optimisant les conditions de comparaison entre cartes anciennes et modernes. De ce point de vue, ont fait l'objet d'une attention particulière :
– l'étude des cartes anciennes, en examinant avec soin les techniques de mesure et de levé, ainsi que la qualité globale du document ;
– le géoréférencement, fondé sur un semis de points GPS, de fonds anciens jugés de précision suffisante pour une telle opération ;
– l'évaluation de cartes numériques de dernière génération, qui pourraient servir de référentiels pour la géolocalisation et l'examen de l'évolution du bâti.

Les fonds historiques

La carte topographique de Rome, éditée en 1866 par la direction générale du recensement, constitue la base de la première cartographie numérisée géoréférencée au programme de l'Atlas historique de la Rome moderne.

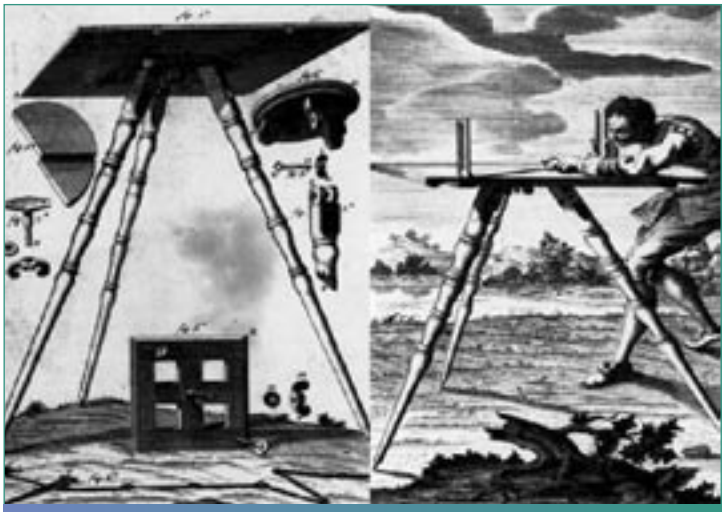
Ce choix procède principalement du fait que cette carte représente l'état de la ville en 1870, lors de la chute de Napoléon III – et donc de la fin du pouvoir temporel des papes. Il s'agit par conséquent du dernier plan, dressé suffisamment rigoureusement, de la « vieille » Rome, avant que l'unification de l'Italie n'y apporte des transformations profondes. En outre, choisir une carte de la fin du XIXe permet une comparaison plus aisée avec la carte récente choisie comme support pour le géoréférencement.

1 *DDITS - Topographie, Université de Rome « La Sapienza », Via Eudossiana 18, I-00184 Rome. Valerio.baiocchi@uniroma1.it.*
2 *CROMA (Centre universitaire pour l'étude de Rome), Université de Rome 3, Via Ostiense 139, I-00154 Rome. Lelo@uniroma3.it.*

L'étude préliminaire nécessaire à la connaissance du processus de fabrication de ce plan, ainsi qu'à la détermination de son degré d'exactitude, nous a conduit à émettre plusieurs remarques sur les cartes plus anciennes sur lesquelles il s'est appuyé. De fait, ce plan n'est que la mise à jour d'une version précédente de 1829, élaborée sur la base des minutes relevées par la cadastre urbain entre 1818 et 1822[1]. L'impression, faite à l'échelle 1: 4 000, a été ordonnée par le bureau du recensement[2], quelques années avant sa dissolution. Le produit final constitue une réduction des minutes levées au 1: 1000, mise à jour des éventuelles mutations intermédiaires. En ce qui concerne les techniques de levé de ce plan, qui représente l'ultime maillon d'une chaîne cartographique débutant en l'an 800 et s'achevant aux premières cartes « modernes » réalisées par l'IGM[3], aucun document d'archive n'apporte de renseignements précis. Il semblerait que les architectes romains Salvi et Palazzi, membres de l'Académie de Saint-Luc, chargés par la Chaire apostolique d'exécuter les travaux, aient proposé, en lieu et place d'un levé ex-novo, de se fonder sur le plan de Jean-Baptiste Nolli[4] de 1748, *« en y apportant toutes les modifications pour le corriger et l'intégrer là où […] s'étaient produites des variations »* (Ruggeri, Londei, 2000). Le travail semble avoir été entamé à l'alidade, à l'aide d'agrandissements à l'échelle 1:1 000 du plan de Nolli, une étape qui dura quatre mois, pour déboucher sur les phases plus complexes de levés terrain (subdivision des îlots en parcelles, mensuration des cours intérieures, etc.). C'est ainsi qu'au cours de cette recherche sur les méthodes et les levés de la carte du recensement de 1866, en remontant le cours du temps, les documents finissent tous par aboutir aux opérations de lever rigoureuses et scientifiques conduites par Nolli en 1748.

Ce travail cartographique – qui dura douze ans – est caractérisé par un niveau de détail stupéfiant, et d'une précision extrême jusqu'aux îlots et aux monuments les plus petits, « y compris dans le cas de bâti […] déjà précédemment levé et publié » (Bevilacqua, 1998). Les travaux précédents de Nolli, en Lombardie et en Savoie, lui avaient donné l'occasion de se former aux techniques de mesure, y compris l'usage de la tablette prétorienne[5], qu'il utilisa intensivement pour ses levés. Parfaitement conscient que, en dépit de sa bonne précision, la tablette ne pouvait garantir des « marges d'approximations réduites » (Bevilacqua, 1998), Nolli effectua une triangulation de la ville entière entre les remparts d'Aurélien, fondée sur des points d'appui situés sur les colonnes et les obélisques, ainsi que l'axe de la via del Corso. À la suite de quoi il fut possible de lancer le levé des quartiers à partir des places, avenues et monuments principaux, en répartissant les erreurs éventuelles sur des rues et blocs moins importants. La procédure, menée avec un soin extrême par Nolli, a conduit à une cartographie élaborée qui a servi de base aux travaux suivants pendant des années.

Pour en revenir au plan de 1866 de la direction générale du recensement, en définitive, celui-ci pourrait être considéré comme une simple mise à jour de cartes précédentes, lesquelles, à leur tour, remontent toutes au plan général de Nolli, qui, selon cette hypothèse, serait le seul à avoir exécuté un levé général de Rome *intra muribus Aurelianis* au milieu du XVIIIe. Bien que nous ayons gardé en tête la relative difficulté de comparer un tel plan avec son homologue moderne, dressé à l'aide de techniques entièrement différentes (photogrammétrie aéroportée), la



La tablette prétorienne et son utilisation (gravure de Marioni, 1751)

1 *L'exécution du premier cadastre géométrique-parcellaire dans les États pontificaux fut ordonné par l'article 191 du* motu proprio *du 6 juillet 1816, signé du pape Pie VII. Les cartes furent réalisées entre 1818 et 1820/21, mais ce cadastre ne fut reconnu en tant qu'instrument fiscal (en remplacement du cadastre Piano) seulement en 1835 sous le pontificat de Grégoire XVI, d'où son nom de « cadastre grégorien ».*

2 *Le bureau du recensement (*Congregazione del censo*), devenu présidence du recensement, désigne l'organisme central à qui avait été dévolu la direction et la coordination des opérations de levé du nouveau cadastre.*

3 Istituto geographico militare, *l'équivalent de l'IGN en Italie (NdT).*

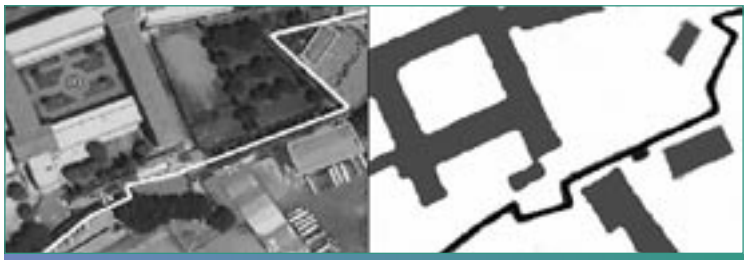
4 Giovanni Battista Nolli da Como *(1692-1756), architecte et sculpteur. Réalisa en 1748 le* Nouveau plan de Rome, *premier à être dessiné avec le nord magnétique « en haut », à l'échelle (métrique) d'environ 1:2 900.*

5 *La tablette prétorienne se compose d'une table en bois, appuyée sur un cavalier au moyen d'une attache amovible. L'opérateur déploie la minute sur la tablette et trace directement ses relevés à l'aide d'une boussole et d'une alidade mobile munie de deux mires pour le dessin des droites et des angles. Mise au point vers la fin du VIe siècle par le mathématicien et astronome allemand Johanes Richter (dit* Prætorius*), son usage s'est répandu en Europe au cours du XVIIe. En Italie, elle fut utilisée pour la première fois dans les premières décennies du VIIIe par le mathématicien de la cour lombarde Marioni à l'occasion des discussions techniques concernant les relevés cadastraux.*

nécessité de mener à bien cette étude diachronique du centre historique a nécessité une étude poussée des méthodes anciennes afin d'améliorer le plus possible le géoréférencement sur un système de coordonnées moderne.

Le géoréférencement

Dans un premier temps, la carte de la direction générale du recensement a été géoréférencée sur la carte technique régionale du Latium de 1990, à l'échelle 1: 10 000, qui, à l'époque, s'est révélée être la seule carte officielle utilisable. La méthode d'ancrage de planches historiques a permis d'évaluer les erreurs locales, garantissant ainsi un contrôle sur la précision de la procédure de géoréférencement, éventuellement menée en redéfinissant les points de contrôle. Dans certains cas, la comparaison a mis à jour un systématisme dans certaines zones de la carte historique : on y a décelé une erreur locale égale à la moyenne de l'erreur totale, soit environ quatre mètres, probablement causée par une imprécision historique de la mesure, qui s'est propagée successivement aux différents relevés périphériques.



Erreur cartographique contemporaine : Murailles d'Aurélien (vers la porte Saint-Jean). À gauche, photographie aérienne avec le tracé exact ; à droite, extrait de la CTR et son dessin inexact (en noir).

L'erreur cartographique, due à de nombreuses causes, a été l'objet d'un examen attentif, de façon à en mesurer les effets sur la précision et le résultat finaux. Les principales causes d'erreurs que nous avons identifiées sont :

– Les déformations de la carte historique liées à des problèmes de conservation des planches et probablement aux projections différentes ;
– Les erreurs historiques de levé, ou plutôt la propagation d'erreurs successives le long de la grille de levé ;
– Les erreurs historiques de représentation, dues au dessin de détails inexistants ou ajoutés pour des motifs esthétiques ;
– Les erreurs simultanées d'interprétation, causées par un manque d'informations détaillées sur l'ensemble de la ville au sujet des variations morphologiques du bâti, considéré comme un élément immuable entre deux rédactions successives ;
– Des erreurs contemporaines (*Fig. 2*) dues aux imprécisions de la cartographie actuelle prise comme référentiel lors du géoréférencement.

Dans le reste de ce document, nous ne prendrons en considération que les erreurs issues du premier point cité.

Comme nous l'avions déjà évoqué, le géoréférencement de cartes anciennes – en l'absence de grille de référence – ne peut s'appuyer que sur des éléments aisément identifiables dont on peut calculer les coordonnées. La façon la plus rapide de calculer ces coordonnées serait encore de repérer ces éléments sur des cartes modernes, pourvu que leur identification ne prête pas à équivoque. On comprend aisément que pour mener à bien une telle tâche, la carte moderne doit posséder une échelle plus importante que l'ancienne, faute de quoi la précision insuffisante du calage risque d'entacher le fond ancien d'erreurs et de forcer sa géométrie dans une trame imprécise. Malheureusement, dans notre cas précis, il a été impossible de se procurer ce référentiel actuel à grande échelle, moyennant quoi la comparaison avec des cartes à échelle plus réduite a donné des résultats contradictoires. Nous avons donc décidé de procéder par nous-même à des relevés GPS différentiels de points connus, de manière à placer les fonds dans un système de référence absolu.

Ce relevé, principalement destiné à effectuer un contrôle qualité, a été conçu de manière à couvrir aussi régulièrement que possible l'ensemble du centre historique. Dans un premier temps, il a fallu déterminer un ensemble de points idoines sur le plan historique (par exemple, nous avons choisi les échauguettes des murailles). Moins sûrs, des détails isolables comme les fontaines, les statues, les obélisques, que l'on reconnaît sans peine mais qui ont pu être maintes fois déplacés au cours du temps lors de divers aménagements urbains ou réfections de la voirie. Malheureusement, les rebords ne sont pas très bien adaptés aux relevés GPS : lorsqu'on se place en-dessous, une grande partie du ciel est masqué, la couverture radio devient piteuse ; monter sur les rebords pour obtenir un dégagement suffisant pose des problèmes de logistique d'accès. Il faut donc procéder à un choix surnuméraire de points candidats sur la carte historique, déterminer leur emplacement exact sur la carte actuelle, par exemple en superposant les deux sources, puis se déplacer sur le terrain pour vérifier la situation réelle et la possibilité d'effectuer le relevé ou non.

Le premier semis GPS comprenait une vingtaine de points distribués à peu près uniformément sur le centre historique. Ce premier ensemble nous a permis d'éva-

Id punto	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	Media quadratica
Residuo x (m)	-7.5	2.6	2.5	-3.3	1.4	0.3	0.8	2.0	-0.9	3.6	-7.1	1.2	-0.5	0.3	0.3	-0.2	1.8	2.8	0.7
Residuo y (m)	-5.2	3.1	0.0	-1.2	5.3	-2.7	-3.5	-2.6	-0.9	-0.5	0.6	-2.4	-1.1	2.8	2.7	-1.8	8.0	-0.7	0.8

Fig. 3 - Résidus de la transformation polynomiale d'ordre un appliquée au fichier raster de la carte du recensement sur la base des points GPS.

luer des paramètres statistiques initiaux mesurant les déformations. Les premières comparaisons GPS/carte historique nous ont semblé encourageantes, vu l'âge du fonds. Le géoréférencement fondé sur ces points, en appliquant une transformation polynomiale de degré un, nous a donné un résidu quadratique moyen acceptable (inférieur à un mètre, *fig. 3*).

En ce qui concerne le semis lui-même, un seul point s'est révélé se trouver être franchement mal positionné (erreur de 15 mètres). Il s'agit probablement d'une erreur de relevé, ou bien d'une modification architecturale d'ampleur, la zone en question, à savoir la via della Concilazione, ayant été fortement réaménagée dans les années trente.

La carte du recensement géoréférencée a été comparée à une série de planches actuelles, avec une excellente concordance dans certaines zones, et des décalages importants dans d'autres. Ces décalages peuvent être dus soit à des déformations du support, soit à des imprécisions de relevé. Il faut avouer que le choix des points de référence dans cette première phase avait privilégié les endroits dégagés (places, ruines…) ; de fait, beaucoup de quartiers denses ont été mal couverts. Cependant, on y note une précision surprenante, qui s'explique peut-être par la plus grande densité de lieux de cultes, lesquels avaient été utilisés pour mener la triangulation originale (Bevilacqua, 1998).

Fig. 4 - Exemple de superposition entre la carte du recensement (1866) géoréférencée et rééchantillonnée sur la base du semis GPS et d'un cartographie actuelle à l'échelle 1:2 000 (1997). En haut, un exemple de zone où la concordance est maximale, en bas, une zone où l'on observe des décalages hétérogènes de cinq mètres.

La phase suivante a consisté à densifier le semis GPS, particulièrement dans les zones décalées, et procéder au calage sur ce semis dense de la carte Nolli de 1748. Les nouveaux points sont pour la plupart situés sur la partie sommitale d'édifices historiques. Nous avons mesuré 24 points du réseau *Forma urbis*, à l'aide d'un dispositif différentiel à deux stations, grâce à des mesures de 30 minutes, qui, pour certains points, ont été répétées plusieurs jours de suite afin de s'assurer de leur validité. La précision de ces points est considérée comme géodésique. Ces nouveaux points ont particulièrement amélioré la restitution de l'ensemble, même s'il faut déplorer que leurs levés aient été entravés par des obstacles pratiques et administratifs.

Fig. 5 - Semis exhaustif de points GPS acquis au cours du temps.

Une fois le semis acquis, les opérations de géoréférencement et de recalage ont été de nouveau menées, à la fois sur la carte du recensement, pour en améliorer le

Fig. 6 - Diverses représentations de l'église de Saint Augustin, au nord de la Piazza Navona. La même base numérique récente a été superposée à la carte de Nolli (à gauche) et à celle du rencensement (à droite). Le dessin de la carte de Nolli correspond mieux à la réalité.

Fig. 7 - Mêmes conditions que dans la figure précédente : sur la gauche, la carte de Nolli concorde parfaitement avec le tracé des murs d'Aurélien ; sur la carte du recensement, on note un décalage d'environ 25 mètres.

calage, et sur la carte Nolli. Cette dernière se compose de douze planches, dont les copies utilisées pour la numérisation montraient de telles déformations anisotropes que leur utilisation a nécessité un travail préliminaire de calibrage.

Contrairement à ce que la chronologie pourrait laisser penser, la carte Nolli offre une précision au moins égale à celle du recensement, et la justesse de la représentation graphique du bâti y est souvent supérieure à celle de son épigone. L'hypothèse que la carte Nolli ait servi de base à toutes les cartographies ultérieures est battue en brèche par la superposition des fonds à certains endroits. Par exemple, *figure 7*, nous voyons que le tracé des murailles d'Aurélien est fondamentalement différent sur les deux fonds. La carte Nolli présente la réalité actuelle, alors que la carte du recensement dévie de l'ordre de 25 mètres par rapport au tracé exact. Il semble qu'ici la carte du recensement, qui s'appuie sur le cadastre Pie-grégorien, ait pâti d'une imprécision de relevé de ce dernier.

En somme, on peut affirmer que la carte Nolli, en plus d'être la première représentation géométriquement correcte de la Rome intra muros, est l'unique plan établi sur la base d'un relevé topographique à la méthodologie connue. Un tel document constitue une source d'informations précieuse et un référentiel adéquat pour y caler les relevés de l'évolution urbaine postérieure.

Comparaison avec les cartes numériques récentes

Comme nous l'avons déjà remarqué, l'absence de carte officielle à moyenne-grande échelle couvrant la ville de Rome a fortement influencé notre projet. Il a fallu revoir les objectifs pour les faire cadrer soit avec un plan à échelle inadaptée (Carte technique régionale ou CTR, 1990 à échelle 1: 10 000), soit avec une base apocryphe (vectorielle, probablement au 1:2 000). C'est cette carence en fonds contemporains qui a motivé le relevé GPS à des fins de géoréférencement.

Cependant, une carte de Rome numérique et tridimensionnelle a récemment été finalisée. Le besoin évident d'une telle base pour géoréférencer les fonds historiques et pouvoir modéliser la dynamique du bâti nous a conduit à acquérir ce produit, pour en évaluer la qualité et les caractéristiques, et voir si une telle base pouvait avantageusement remplacer la longue et coûteuse procédure de relevé GPS. L'analyse s'est concentrée sur deux points : la précision du positionnement et l'exactitude du bâti.

Sur le premier point, nous n'avons pas eu le temps de conduire une enquête exhaustive. Nous nous sommes donc contentés d'un test préliminaire, censé nous renseigner au moins approximativement sur la précision du produit. Il faut noter à ce sujet que la base est projetée dans le système Gauss-Boaga alors que les points GPS sont évidemment relevés en UTM-WGS 84. La transformation nécessaire à l'harmonisation a été calculée par le logiciel Transfo (logiciel en version bêta développé par le ministère de l'environnement) qui, selon les tests effectués par quatre universitaires, s'est révélé être le plus fiable. Celui-ci borne l'erreur de transformation à 40 cm (c'est-à-dire quasiment de l'ordre de grandeur des erreurs de graphisme acceptables), doublant l'imprécision du produit qui se retrouve ainsi de l'ordre de grandeur de 80 cm.

Les points utilisés pour le test sont de nouveau ceux du semis *Fonta urbis* qui, comme nous l'avons déjà dit, possèdent une précision optimale. De ce semis, nous avons extrait dix points identifiables sans ambiguïté sur la carte, parmi lesquels seul un s'est révélé posséder un décalage double de notre borne maximale d'admissibilité.

En revanche, en ce qui concerne la précision de restitution du bâti, nous avons trouvé des erreurs inattendues qui pourraient bien limiter fortement l'utilisation du produit dans le cadre de notre étude, étant donné que la superposition des deux fonds ne peut se faire que dans des conditions optimales si l'on veut que le géoréférencement soit correct.

Nous avons trouvé en particulier des erreurs dans la restitution du Colisée. À l'extrémité est des murailles externes, restaurées et épaulées avec des murs de soutènement dès le début du IXe siècle, la structure représentée diffère totalement de la réalité (il s'agit probablement de l'inclusion dans le bâti d'une portion du pavement original). En outre, une réentrance

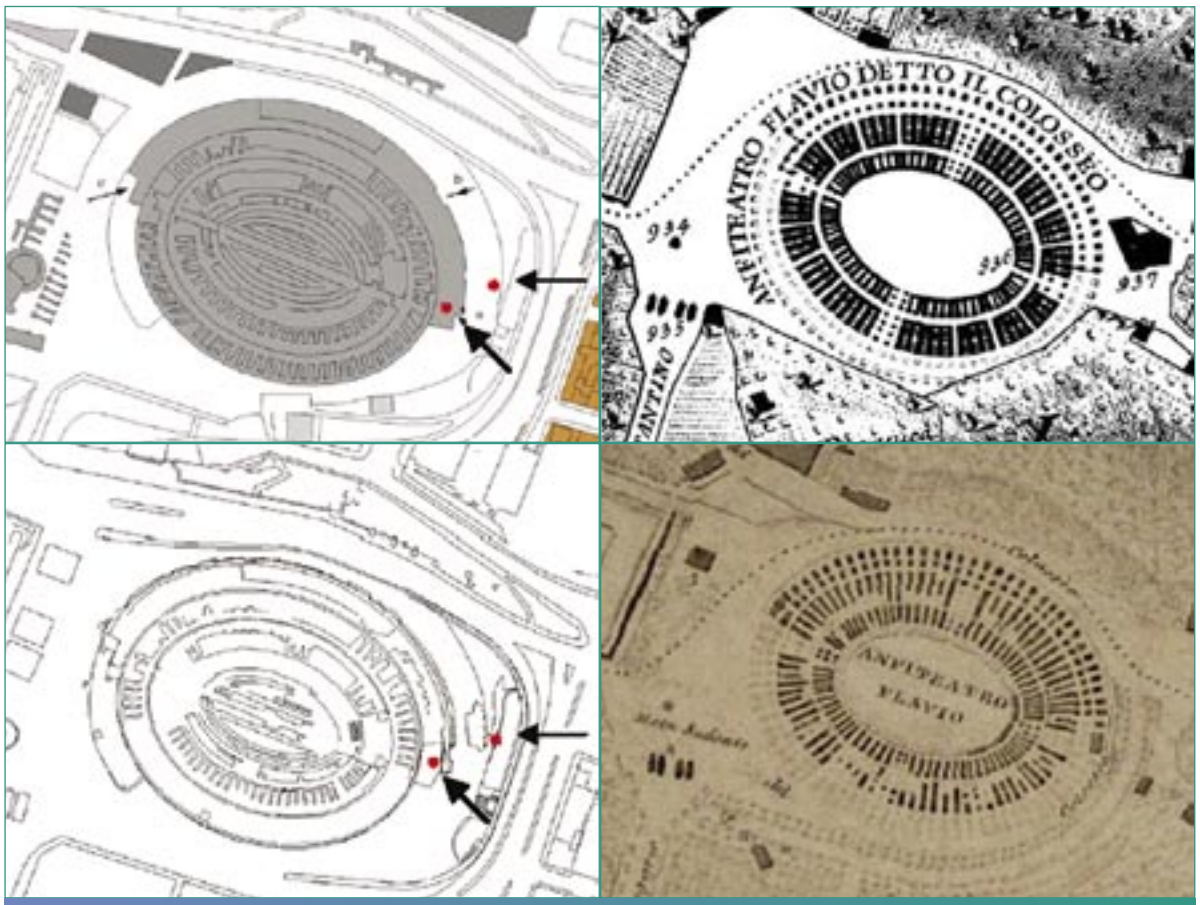


Fig. 8 - Cartographies du Colisée. À gauche, en haut : la nouvelle cartographie numérique. Les lettres a, b et c indiquent les différences observées ; en bas, une précédente cartographie numérique exacte. À droite : en haut la carte de Nolli (à cette époque, le mur de soutènement de l'extrémité est n'existait pas encore) ; en bas, le plan du recensement (noter les détails dans les murs).

dans le corps du bâtiment, à l'ouest de la zone précédemment identifiée, ferait croire à la présence d'un détail architectural inexistant. Il semblerait que cela soit dû au dessin d'un détail manquant de la corniche sommitale. L'extrémité ouest du parvis est également rendu d'une façon erronée.

Conclusions

Le géoréférencement de divers fonds historiques nous a permis de nous rendre compte que la précision des fonds cartographiques anciens ne dépend pas directement de leur âge, voire que le graphisme était parfois plus précis dans les planches les plus vieilles.

L'utilisation d'un semis GPS pour le géoréférencement des cartes historiques de Rome postérieures au XVIIe siècle, a donné des résultats qui dépassent nos attentes. Nonobstant, un tel procédé est intrinsèquement limité par les problèmes de coût, de temps, d'accessibilité et de réalisation de la mesure. La densification du semis de points, initialement envisagée dans le but d'améliorer le géoréférencement des plans historiques, s'est finalement également révélée utile pour évaluer la qualité d'une base numérique récente.

La comparaison avec les bases numériques récentes a démontré une excellente concordance géométrique, quoique des travaux complémentaires sur le bâti soient nécessaires pour expliquer et résoudre certaines différences, parfois causées par des imprécisions des bases numériques. C'est pourquoi l'identification univoque des points terrain et de leurs correspondants sur la carte historique nous paraît devoir requérir comme référentiel des orthophotographies à grande échelle. ❑

Fig. 9 - À gauche, l'énorme renfort construit en 1807, sous Pie VII, pour soutenir l'extrémité est du cercle extérieur ; à droite, en haut, un élément de corniche manquant ; à droite, en bas, l'autre extrémité du cirque extérieur, réparé en 1827, sous Léon XII.