

Evaluation des distances à partir des coordonnées géographiques fournies par Google Earth

Estimating distances from geographic coordinates provided by Google Earth

Jean Marie Lemoine¹, Gilles Tounsi²

¹ Ingénieur, Ecole Centrale de Paris, France, jean-marie.lemoine@wanadoo.fr

² Cartographe, Département de géographie, Université de Yaoundé 1, Cameroun, gilles.tounsi@univ-yaounde1.cm

RÉSUMÉ. Les coordonnées géographiques de Latitude et de Longitude fournies par Google Earth sont affectées par des erreurs qui laissent affirmer des incertitudes dans les mesures des distances et des trajets. La présente étude propose des formules d'amélioration afin de rendre les données de géolocalisation plus précises. Dans une démarche qui présente les formules pour évaluer et améliorer les incertitudes sur les distances produites par Google Earth, nos résultats démontrent que les incertitudes et les erreurs sur les distances contenues dans les mesures provenant de Google Earth sont tangibles en fonction de l'évaluation des distances qu'elles soient courtes, longues ou moyennes. La probabilité d'erreurs sur les coordonnées fournies par Google Earth est de plus ou moins (+/-) 2 mètres. La distribution des erreurs en fonction des distances montre qu'une erreur de +/- 3 m a seulement 0,4% de chance d'être dépassée. Cette méthodologie prend en compte la structure du globe terrestre : les méridiens, les parallèles, les pôles, l'équateur, les hémisphères et la structure bosselée de la Terre. Ces corrections contribuent à corriger la précision dans les applications qui utilisent la géolocalisation comme moyen d'optimisation des services. La correction des erreurs issues des coordonnées géographiques en se servant des formules qui réduisent les erreurs auraient un impact sur la géolocalisation dans les secteurs d'activités tels que le transport des biens, l'agriculture de précision et la santé. Tout en tenant compte du fait que la géolocalisation offre des avantages considérables en transformant de nombreux domaines, elle pose cependant quelques questions importantes concernant la vie privée des individus.

ABSTRACT. The latitude and longitude geographic coordinates provided by Google Earth are affected by errors that suggest uncertainties in distance and route measurements. This study proposes improvement formulas to make geolocation data more accurate. In an approach that presents formulas for evaluating and improving uncertainties in distances produced by Google Earth, our results demonstrate that the uncertainties and errors in distances contained in measurements from Google Earth are tangible depending on the evaluation of short, long, or medium distances. The probability of errors in the coordinates provided by Google Earth is plus or minus (+/-) 2 meters. The distribution of errors as a function of distance shows that an error of +/- 3 m has only a 0.4% chance of being exceeded. This methodology takes into account the structure of the Earth's globe: meridians, parallels, poles, the equator, hemispheres, and the Earth's bumpy structure. These corrections help improve accuracy in applications that use geolocation as a means of optimizing services. Correcting errors from geographic coordinates using formulas that reduce errors would have an impact on geolocation in industries such as goods transportation, precision agriculture, and healthcare. While recognizing that geolocation offers significant benefits by transforming many fields, it raises some important questions regarding individual privacy.

MOTS-CLÉS. Abbé Picard, distance, incertitude, géolocalisation, Google Earth, GPS, mesure, précision, RDUE, trajet

KEYWORDS. Abbé Picard, distance, incertitude, geolocation, Google Earth, GPS, measure, precision, EUDR, route.

Introduction

Google Earth est un Système d'Information Géographique qui donne une représentation en 3D des objets à la surface de la Terre. L'affichage se base sur la collection d'images provenant de l'imagerie satellitaire, des photographies aériennes et des données géographiques. L'outil facilite aussi la visualisation en haute résolution, de l'exploration du relief et des bâtiments tout en ayant la capacité de faire parcourir les vues à 360° de Street View. Le programme web diffusent des adresses, des

coordonnées, des lieux, des routes permettant ainsi aux utilisateurs de s'orienter dans les villes ou bien dans des localités précises. (*Google Earth Pro (and the free version, Google Earth) provide publicly available satellite, aerial, and Street View imagery. The first two provide a top-down perspective and show features such as sports fields, courts, benches, and picnic tables. Street View provides an “eye level” view and shows smaller objects such as litter, play equipment, and some graffiti*). Google Earth Pro (et sa version gratuite) propose des images satellite, aériennes et Street View accessibles au public. Les deux premières offrent une vue plongeante et montrent des éléments tels que des terrains de sport, des courts, des bancs et des tables de pique-nique. Street View offre une vue à hauteur d'œil et affiche des objets plus petits tels que des déchets, des équipements de jeu et des graffitis. [TAY 11]. Google, le propriétaire de Google Earth révèle en 2019, que, l'application accessible sur les systèmes d'exploitation iOS, Windows et Linux (depuis la version 4) et téléchargeable sur un smartphone ou une tablette « couvre désormais 98 % des lieux de vie dans le monde » [GAR 19]. Problème : « Avec son milliard d'utilisateurs mensuel » [FAU 19], Google Earth vient à poser quelques incertitudes au regard du décalage qui ressort lors des prises de points GPS servant de vérification des mesures que ce soit lors de la position d'un objet ou bien lors des trajets parcourus. Les travaux de l'Abbé Picard sur les mesures de la terre parus en 1671 dressent les bases de compréhension des biais dans le processus de vérification des erreurs sur les distances contenues dans Google Earth.

Dans ce contexte, il est difficile de trouver des données fiables concernant la précision des coordonnées fournies par Google Earth et donc d'évaluer l'incertitude sur les distances calculées à partir de ces coordonnées. Par ailleurs, la formule classique permettant de calculer des distances à partir des coordonnées géographiques est affectée d'une incertitude importante de $\pm 0,5\%$. Dans l'optique d'examiner cette incertitude, cette étude évalue l'incertitude sur les coordonnées fournies par Google Earth en les comparant aux coordonnées de points géodésiques de l'IGN¹. Elle propose des formules plus précises permettant de calculer les distances à partir des coordonnées et évalue l'incertitude associée à chacune de ces formules.

Dans l'optique d'apporter des formules d'amélioration de la précision sur les coordonnées et les distances fournies par Google Earth, nous allons dans une première partie, évaluer l'incertitude sur les coordonnées fournies par l'application géographique. Cette approche fait ressortir une estimation des erreurs exprimée en mètre et la probabilité d'erreur sur les coordonnées géographiques. La seconde partie établit une estimation des incertitudes relative sur les distances. Un accent est mis sur l'amélioration de la précision pour les grandes distances. La correction tient compte de la forme sphérique de la Terre existant comme une structure bosselée. Troisièmement, nous présentons une amélioration de la précision pour les courtes distances. Pour ce cas, l'incertitude absolue liée à l'incertitude sur les distances se transforme en incertitude relative à évaluer. Enfin, une vérification des mesures de l'abbé Picard est complétée par la réalisation d'une application numérique des formules contenues dans un fichier à télécharger.

¹ Institut national de l'information Géographique et forestière : *Etablissement public à caractère administratif ayant pour mission d'assurer la production, l'entretien et la diffusion de l'information géographique de référence en France*

Jean Picard, dit l'abbé Picard

L'abbé Picard, géodésien et astronome français du 17^e siècle est né le 21 juillet 1620 à La Flèche (Commune française située dans le sud du département de la Sarthe en région Pays de la Loire) et mort le 12 octobre 1682 à Paris. Son œuvre majeure est la mesure précise, par triangulation, d'un arc de 1 degré du méridien terrestre. Pour ce faire, il a utilisé des instruments de sa conception munis de lunettes astronomiques à réticule. Pour ces mesures ainsi que pour ses nombreux travaux de cartographie, il est considéré comme le fondateur de la géodésie moderne. Il a proposé d'utiliser la longueur d'un pendule battant la seconde comme étalon universel pour les longueurs. En astronomie, il a défini une méthode pour déterminer les coordonnées équatoriales des astres par leur passage au méridien.

Encadré 1. Mini-CV de Jean Picard

1. Description de la démarche

1.1 Evaluation de l'incertitude sur les coordonnées fournies par Google Earth.

La quasi-totalité des points géodésiques visibles sur Google Earth se situe en hauteur. Les coordonnées fournies par Google Earth étant prises au niveau du sol, la correction de la perspective est donc nécessaire. Dans certaines zones, Google Earth offre la possibilité d'abaisser le point de vue au niveau du sol pour voir les surfaces verticales. Cette possibilité, appelée option 3D dans cette publication, corrige la perspective et permet d'obtenir des coordonnées fiables de points en hauteur. En dehors de ces zones, l'utilisateur doit corriger lui-même la perspective ; ce qui augmente les erreurs. Les coordonnées fournies par Google Earth Pro ont été comparées à celle des fiches géodésiques de l'IGN dont l'incertitude nominale est de +/- 0,1 mètre. Dans les zones où l'option 3D est disponible, les coordonnées peuvent être relevées de manière fiable avec la précision du centième de seconde soit avec une incertitude de +/-0,15 mètre. Les deux parties du tableau d'analyse sont présentées respectivement en annexe 1 et annexe 2. Pour les zones 3D, les valeurs donnent une erreur maximale de 2 mètres sur les 20 points analysés. La distribution des erreurs est présentée dans la figure 1.

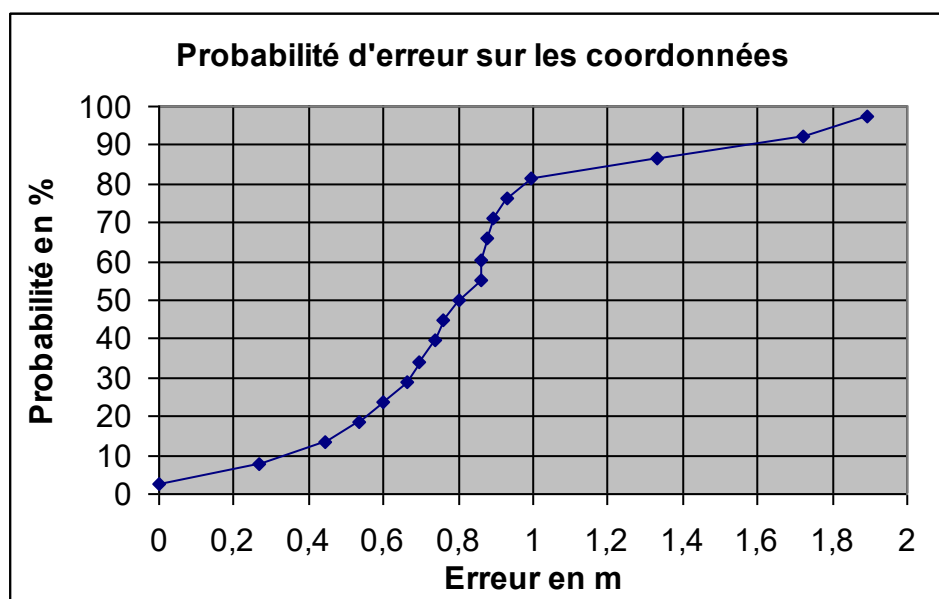


Figure 1. Distribution des erreurs à +/-2 mètre

Ce graphique met en évidence une distribution à ± 1 m avec quelques valeurs extrêmes qui donnent une incertitude de ± 2 m. La cause probable de ces valeurs extrêmes est l'imperfection de la correction de la perspective par l'outil 3D. En dehors des zones 3D, l'incertitude est plus importante car il est nécessaire de corriger l'obliquité du point de vue pour prendre une référence au niveau du sol. L'erreur a pu être évaluée pour seulement 4 des 50 points analysés. La valeur maximale obtenue est de 5,3 m.

1.2 Estimation des incertitudes relatives sur les distances.

La première cause de l'incertitude est liée à l'imprécision des coordonnées. Pour estimer l'incertitude pour les zones 3D, le doublement de l'incertitude sur les coordonnées n'est pas réaliste car la probabilité que deux valeurs extrêmes s'ajoutent est très faible. Pour trouver une valeur plus exacte, la probabilité d'erreur a été calculée en utilisant toutes les combinaisons possibles des erreurs et en tenant compte de leur orientation relative. La probabilité des erreurs en fonction des distances est donc évidente sur la figure 2 qui montre qu'une erreur de ± 3 m a seulement 0,4% de chance d'être dépassée. Cette valeur a donc été choisie comme incertitude. En dehors des zones 3D, on double l'incertitude sur les distances ce qui donne ± 10 m.

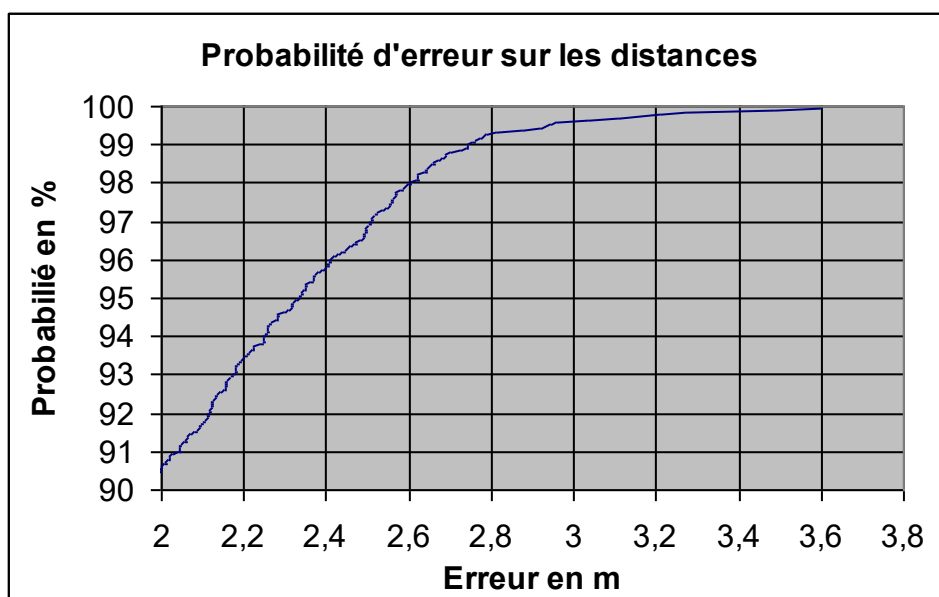


Figure 2. Distribution des erreurs en fonction des distances

La seconde cause d'incertitude est l'imprécision du modèle utilisé pour calculer les distances à partir des coordonnées. Pour obtenir des distances plus précises que celles calculées à partir du modèle sphérique, nous prenons en compte la variation des rayons de courbure du géoïde² en fonction de la latitude (Figure 3).

² Géoïde : expression pour désigner la forme théorique, irrégulière et un peu bosselée de la Terre. C'est aussi entendu comme la surface idéale du niveau moyen de la mer prolongé sous les continents correspondant à une surface de référence pour mesurer les altitudes. A ne pas confondre avec l'ellipsoïde qui est une approximation lisse de la Terre caractérisée par une forme mathématiques pour les calculs du système de positionnement GPS

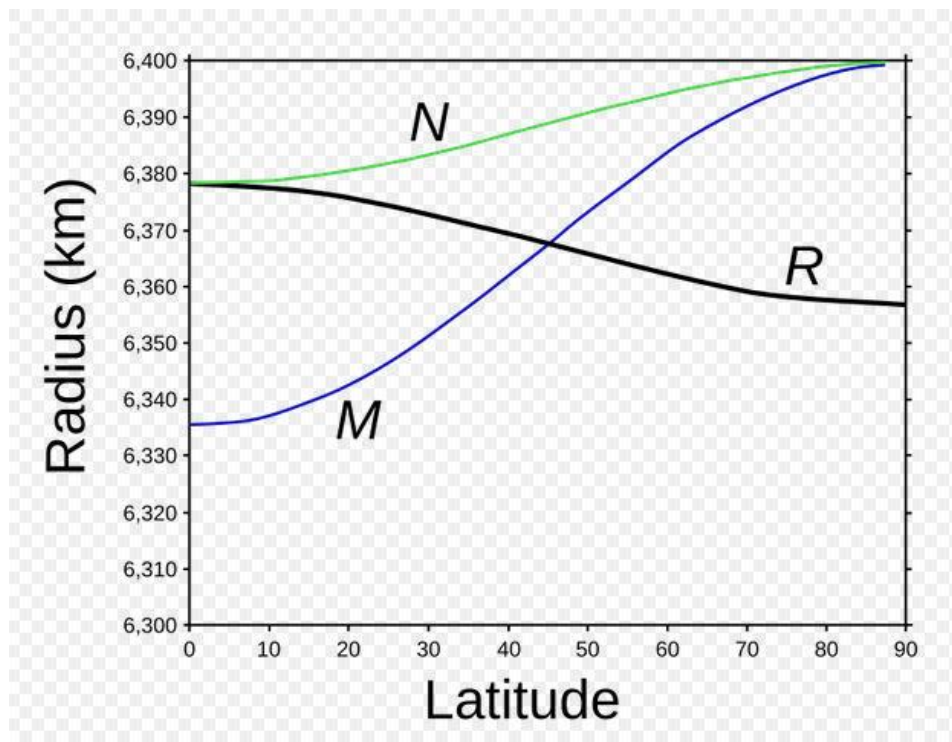


Figure 3. Variation des rayons de courbure du géoïde

La courbe M présente la variation du rayon de courbure du méridien en fonction de la latitude. Le rayon varie de $R_{m0} = 6335,42$ km à l'équateur pour atteindre $R_{90} = 6399,71$ km au pôle. La courbe N présente la variation du rayon de courbure du grand cercle tangent au parallèle pour une latitude donnée. Ce rayon varie de $R_{p0} = 6\,378,137$ km à l'équateur pour atteindre $6399,7$ km au pôle.

1.2.1 Approximation sphérique

Cette approximation suppose que la terre est une sphère de rayon constant. La valeur du rayon la plus souvent utilisée est le rayon moyen volumétrique de $6\,371$ km. En réalité, le rayon de courbure du géoïde varie entre $6\,335,42$ km à l'équateur et $6\,399,71$ aux pôles. Si l'on veut avoir une variation relative symétrique de $\pm 0,5\%$, Il vaut mieux utiliser la valeur médiane R_m de $6\,367$ km. La distance se calcule avec la formule suivante.

$$D = R_m \times \text{ArcCos} \left(\begin{aligned} &(\sin(Lat1) \times \sin(Lat2)) \\ &+ \cos(Lat1) \times \cos(Lat2) \times \cos(Lon2 - Lon1) \end{aligned} \right) \quad [1]$$

L'incertitude relative sur la distance calculée est de $\pm 0,5\%$.

2. Amélioration de la précision pour les distances moyennes

Pour des distances inférieures à $1\,000$ km, le calcul d'une approximation des distances s'effectue à partir des coordonnées $Lat1$, $Lon1$, $Lat2$ et $Lon2$ des deux extrémités du trajet, on calcule la distance en effectuant une suite d'opérations simples :

- Premièrement, nous calculons d'abord la latitude moyenne avec la formule suivante :

$$Lat = (Lat1 + Lat2)/2 \quad [2]$$

- Après l'angle U du trajet analysé avec l'axe Est Ouest en utilisant la formule suivante :

$$U = \text{ArcSin} \left(\frac{\text{Lat}2 - \text{Lat}1}{\sqrt{(\text{Lat}2 - \text{Lat}1)^2 + (\text{Lon}2 - \text{Lon}1)^2 \times \text{Cos}^2(\text{Lat})}} \right) \quad [3]$$

– Ensuite, vient le calcul du rayon de courbure du méridien pour la latitude moyenne en utilisant la formule suivante :

$$Rm(\text{Lat}) = Rm0 + (R90 - Rm0) \times (1 - \text{Cos}^2(\text{Lat})) \quad [4]$$

– le rayon de courbure du grand cercle tangent au parallèle pour la latitude moyenne en utilisant la formule suivante :

$$Rp(\text{Lat}) = Rp0 + (R90 - Rp0) \times (1 - \text{Cos}^2(\text{Lat})) \quad [5]$$

– pour le trajet étudié, le rayon de courbure du géoïde dans la direction U en utilisant la formule suivante :

$$Ru = \frac{1}{1/Rp(\text{Lat}) + (1/Rm(\text{Lat}) - 1/Rp(\text{Lat})) \times \text{Sin}^2(U)} \quad [6]$$

– Enfin, le calcul de la longueur D du trajet avec la formule standard en utilisant le rayon Ru à la place du rayon médian soit :

$$D = Ru \times \text{ArcCos} \left(\begin{aligned} &(\text{Sin}(\text{Lat}1) \times \text{Sin}(\text{Lat}2) \\ &+ \text{Cos}(\text{Lat}1) \times \text{Cos}(\text{Lat}2) \times \text{Cos}(\text{Lon}2 - \text{Lon}1)) \end{aligned} \right) \quad [7]$$

Cette formule permet de calculer toutes les distances. Cependant, elle n'améliore la précision que pour les distances inférieures à 1 000 km. Elle ne doit donc être utilisée que pour des trajets inférieurs à 1 000 km. Pour des grandes distances l'approximation sphérique doit être utilisée.

L'intégration de la fonction [4] permet de calculer l'erreur entre la distance réelle et la distance calculée pour un trajet le long d'un méridien utilisant la latitude médiane.

Cette erreur relative se calcule avec la formule suivante :

$$\text{Err} = \frac{R90 - Rm0}{R90 + Rm0} \times \left(\text{Cos}(\text{Lat}1 + \text{Lat}2) - \frac{\text{Sin}(2 \text{Lat}2) - \text{Sin}(2 \text{Lat}1)}{2(\text{Lat}2 - \text{Lat}1)} \right) \quad [8]$$

Un point important à souligner est que cette formule n'est exacte que si les deux latitudes se situent dans le même hémisphère. Si ce n'est pas le cas, pour avoir l'erreur maximale il faut mettre Lat1 = 0 et Lat2 égale à la plus grande des valeurs absolues de Lat1 et de Lat2.

La valeur donnée par cette formule représente un majorant de l'erreur sur la distance calculée. En effet, l'erreur en longitude est trois fois plus faible que celle le long du méridien et Ru étant une moyenne pondérée entre Rm et Rp l'erreur sur Ru sera nécessairement inférieure à celle sur Rm. Cette fonction présente un maximum de 0,043 % pour une distance de 7 000 km. En arrondissant à la valeur supérieure de 0,05%, on peut donc conclure que la méthode de calcul proposée donne une incertitude inférieure à 0,05 % sur toutes les distances calculées. Pour des distances mesurées en France on a Lat1 = 42,43° et Lat2 = 51,00° ce qui donne une incertitude relative de 0,0001% qui est pratiquement négligeable. Cette

valeur faible est due au fait que la France se situe à cheval sur le 45^{ème} parallèle pour lequel l'erreur est très faible.

3. Evaluation de l'incertitude relative pour les courtes distances

Pour de très courtes distances, l'incertitude absolue liée à l'incertitude sur les distances se transforme en incertitude relative. Pour évaluer cette incertitude relative, les distances des 171 combinaisons des 19 points géodésiques présentés en annexe 1 ont été calculées avec les coordonnées de l'IGN et celles données par Google Earth. Les valeurs absolues des différences entre ces deux distances, pour des trajets inférieurs à 5 km, sont présentées dans la figure 4

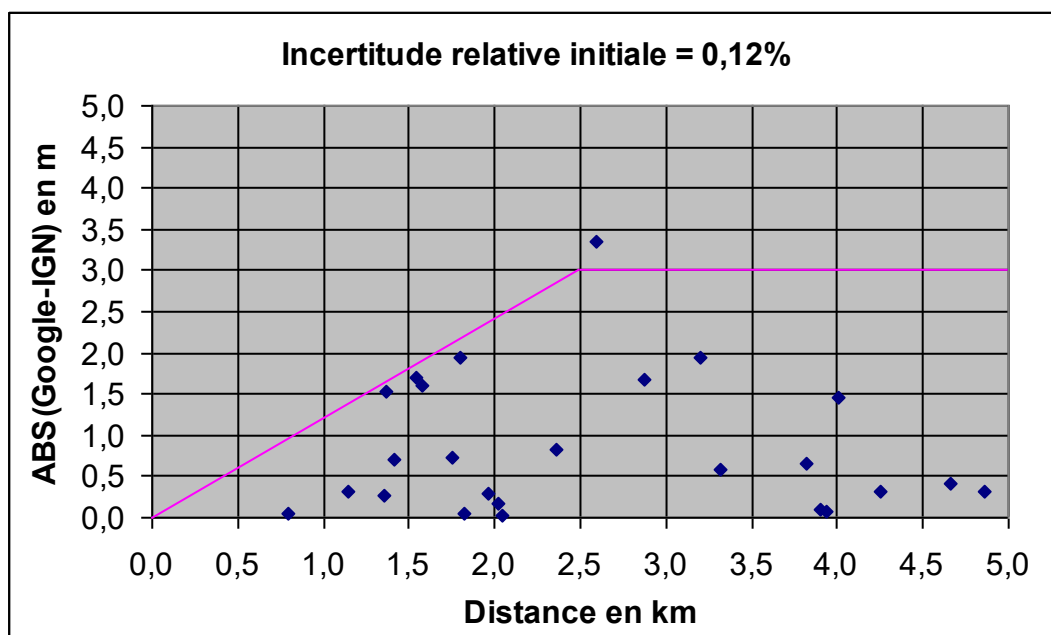


Figure 4 . Différences des distances entre Google et IGN

Ce graphique permet d'évaluer l'incertitude relative initiale à +/- 0,12%. Pour garder la continuité de l'incertitude, nous calculons alors la valeur de la distance de transition D_t soit $3 / 0,12 \times 100 = 2,5$ km pour l'exemple présenté.

4. Amélioration de la précision pour les grandes distances

Il est possible d'améliorer la précision des distances calculées en divisant le trajet en n segments d'égales longueurs. Pour ce faire, nous utilisons les formules de l'analyse vectorielle avec un système de coordonnées cartésiennes dont le centre est le centre de la terre. L'axe x part du centre de la terre pour aboutir au point de latitude et longitude nulles. L'axe y part du centre et passe par le point de coordonnées $Lat=0$ et $Lon=90^\circ$. L'axe Z part du centre et passe par le pôle Nord.

Pour chacune des deux extrémités du trajet, nous calculons les composantes des vecteurs V_1 et V_2 avec les formules suivantes :

$$- \quad V_x = \cos(Lat) \times \sin(Lon) \quad [9]$$

$$- \quad V_y = \cos(Lat) \times \cos(Lon) \quad [10]$$

$$- \quad V_z = \sin(Lat) \quad [11]$$

Ensuite, nous calculons l'angle α sous lequel le trajet est vu du centre de la terre avec les formules suivantes :

- Si le produit scalaire $V1.V2$ est positif l'angle se calcule avec la formule :

$$\alpha = \text{ArcSin}(\text{Mod}(V1 \wedge V2)) \quad [12]$$

- Si le produit scalaire $V1.V2$ est négatif l'angle se calcule avec la formule :

$$\alpha = \pi - \text{ArcSin}(\text{Mod}(V1 \wedge V2)) \quad [13]$$

Et puis, on calcule les coordonnées des points intermédiaires le long du trajet avec les formules suivantes :

L'angle du point intermédiaire d'ordre i avec le vecteur $V1$ est :

$$\alpha_i = \alpha \times \frac{i}{n} \quad [14]$$

Nous pouvons aussi calculer les composantes du vecteur correspondant avec la formule :

$$V_i = \frac{\text{Sin}(\alpha - \alpha_i)}{\text{Sin}(\alpha)} \times V1 + \frac{\text{Sin}(\alpha_i)}{\text{Sin}(\alpha)} \times V2 \quad [15]$$

Les coordonnées des point intermédiaires sont alors calculées avec les formules :

$$\text{Lat } i = \text{ArcSin}(V_{iz}) \quad [16]$$

$$\text{Lon } i = \text{ArcTg}\left(\frac{V_{ix}}{V_{iy}}\right) \quad [17]$$

Le calcul de la longueur de tous les segments se fait en utilisant les formules [1], [2], [3], [4], [5], [6], [7] et [8] et nous obtenons la longueur du trajet en additionnant la longueur de tous les segments.

Si l'on augmente le nombre de segments pour améliorer la précision, l'incertitude relative reste limitée par la précision des Rayons R_{m0} et R_{90} . Ils ont été calculés à partir de la valeur du mille marins ayant une résolution de 0,1m. L'incertitude relative sur ces valeurs est de 0,0027%. Leur différence est donc affectée d'une incertitude relative de 0,0054 %. Cette valeur limite l'incertitude relative sur les distances calculées. La variation de l'incertitude en fonction du nombre de segments est présentée dans le tableau 1

n	Dmax (km)	Inc.Rel. (%)	Inc.Abs (km)
10	2000	0,026	5,2
30	667	0,012	2,5
100	200	0,0075	1,5
300	67	0,0061	1,2
1000	20	0,0056	1,1

Tableau 1. Les variations de l'incertitude en fonction des segments

Le nombre de 300 segments semble être une bonne valeur car il permet d’obtenir une incertitude proche du minimum. Ce calcul peut être programmé sur une page Excel.

5. Vérification des mesures de l’abbé Picard

La vérification des mesures de l’abbé Picard implique la réalisation d’une application numérique des formules présentées en téléchargeant le fichier Excel qui accompagne cette publication. Cet outil vérifie les mesures effectuées par l’abbé Picard. Les données utilisées ont été publiées en 1771 par l’abbé Picard dans son livre intitulé « Mesure de la terre » [PIC 71]. Il y décrivait, en détail, les travaux qu’il avait effectués pour mesurer la longueur d’un arc de méridien de 1°. Une version de ce livre, numérisée par la Bibliothèque Nationale de France, est disponible sur Internet. A partir d’une mesure de distance au sol, l’abbé Picard a effectué des mesures de triangulation permettant de calculer la distance entre la cathédrale d’Amiens et un lieu-dit Malvoisine au sud de Paris. Il a ensuite mesuré la différence de latitude entre la cathédrale d’Amiens et Malvoisine. Pour ce faire il a utilisé 27 triangles dont il donne les angles et les longueurs des côtés. Les angles sont précis mais les longueurs sont toutes affectées d’une même erreur relative. Les rapports entre les longueurs, par contre, sont très précis. 14 des 23 points de repère qu’il a utilisés ont pu être localisés avec certitude. Douze (12) de ces points peuvent être utilisés pour calculer la longueur de 21 segments qu’il a mesurés. Les coordonnées de ces points ont été extraites des fiches de géodésie ou du géoportail de l’IGN. Elles sont présentées dans le tableau 2

Point	Repère	Latitude	Longitude
A	Moulin de Villejuif (Base1)	48°47'49,45"N	2°21'55,21"E
B	Pavillon de Juvisy (Base2)	48°41'53,43"N	2°22'20,21"E
C	Clocher de Brie-Comte- Robert	48°41'25,3203"N	2°36'31,0657"E
D	Tour de Montlhéry	48°38'05,82"N	2°16'19,52"E
E	Pavillon de Malvoisine	48°30'50,05"N	2°25'06,81"E
H	Château de Dammartin	49°03'17,44"N	2°41'01,57"E
I	Clocher St Samson de Clermont	49°22'46,25"N	2°25'03,22"E
K	Moulin de Joncquière	49°23'36,71"N	2°43'48,29"E
L	Clocher de Coyvrel	49°33'11,5494"N	2°33'22,1327"E
N	Clocher de Sourdon	49°42'36,18"N	2°23'57,98"E
P	Clocher de Montmartre	48°53'12,30"N	2°20'32,25"E
Q	Clocher de St Christophe	49°15'37,04"N	2°35'51,23"E
R	Eglise St Pierre de Montdidier	49°38'57,58"N	2°34'01,26"E

Tableau 2. Coordonnées des points de l’abbé Picard

Les mesures de l’abbé Picard se trouvant en France, l’erreur relative sur les distances est négligeable. Il ne reste donc que l’incertitude de +/- 0,5 m sur les coordonnées extraites du Géoportail IGN ce qui donne une incertitude de +/- 1m sur les distances. Le tableau des valeurs numériques des erreurs est présenté en annexe 3 et l’analyse de leur distribution est présentée dans la figure 5.

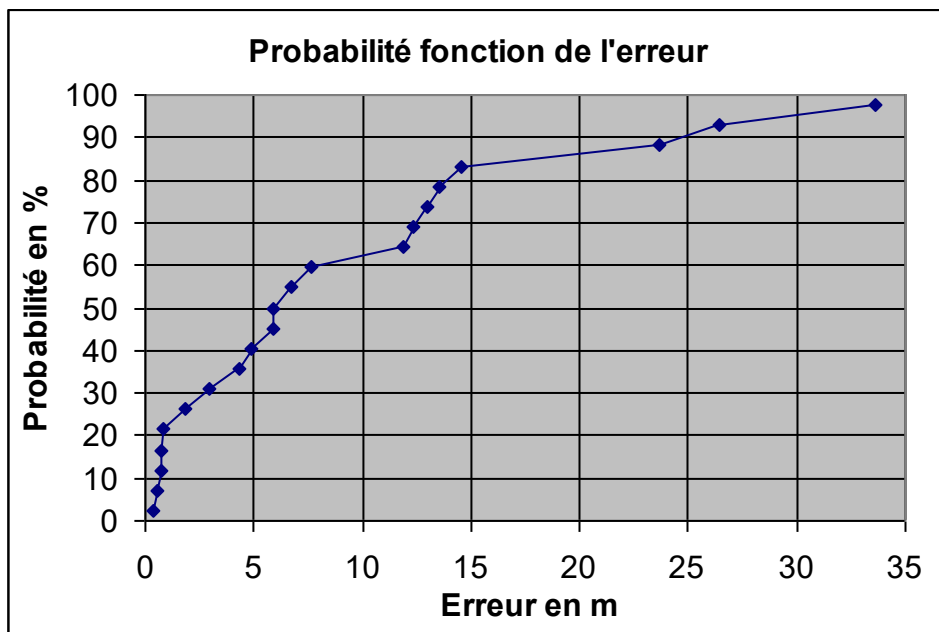


Figure 5. *Distribution des valeurs numériques des erreurs*

Nous avons une erreur typique de $\pm 7,5$ m avec 3 valeurs hors distribution. Cette erreur typique est compatible avec l'affirmation de l'abbé Picard d'une erreur inférieure à 1 minute d'angle, par contre les trois valeurs extrêmes proviennent d'erreurs de mesure ou de calcul. Cette constatation ne remet pas en cause la qualité des mesures car, les erreurs relatives sont en moyenne de 0,01% et restent toujours inférieures à 0,2%.

Les cartes géographiques aux annexes 4, 5 et 6 représentent les points levés à différents endroits. Le point A (Moulin de Villejuif) a été pris au centre de la D85 (Route Départementale 85) à l'aplomb du moulin dont on voit les fondations à soixante-dix (70) mètres à l'ouest de la route (Annexe 4). Les coordonnées du moulin sont : 48,797069 N / 2,365339 E

Le point B (Pavillon de Juvisy) a été pris au coin du bâtiment se trouvant au Nord-Est du carrefour entre la N7 (Route Nationale 7) et la D25. (Annexe 5/). Des analyses de cohérence ont montré que le coin du bâtiment qui devait se trouver à cet endroit du temps de l'abbé Picard se situait vingt-cinq (25) mètres plus au Nord et à vingt-cinq (25) mètres plus à l'Est avec pour coordonnées : 48,698592 N / 2,372497 E.

Le point Q (Clocher de S^t Christophe) a été pris à l'endroit estimé du clocher de la chapelle détruit pendant la révolution française de 1789 (à la Révolution). (Annexe 6).

6. Fichier de l'application des formules de vérification des mesures de l'abbé Picard

Cette application programmée dans un fichier au format Microsoft Excel permet de calculer des distances exactes sur le géoïde à partir des coordonnées géographiques. Il calcule la longueur de l'arc joignant les deux extrémités du trajet A1 et A2 à la surface du géoïde, dans le plan défini par les points O, A1 et A2. O étant le centre du géoïde. Les distances, calculées au niveau de la mer, ne tiennent pas compte des altitudes. Si les points A1 et A2 se trouvent aux antipodes l'un de l'autre, le trajet n'est plus défini. Il est donc nécessaire d'utiliser un point intermédiaire pour le définir.

Pour utiliser le fichier, il suffit de renseigner les cases A5, B5, C5 et D5 de la feuille Calcul pour calculer la distance D en E5 entre les deux extrémités du trajet. Ainsi que l'angle U en F5 du milieu du avec l'axe Est Ouest. Les cases E14 et E20 permettent d'évaluer les erreurs induites par les approximations. Le fichier est disponible à partir du lien Google Drive suivant :

<https://drive.google.com/drive/folders/1TYqVazBIUmmlkbGvTe8ABpksZdCGtfk?usp=sharing>

7. Limites de l'étude

Toutes les coordonnées utilisées dans ce document provenant de la France métropolitaine, l'extension de ces résultats à d'autres lieux n'est donc pas garantie. Par ailleurs, l'inadéquation de la terre réelle avec le géoïde n'est pas prise en compte.

Conclusion

Les méthodes de calcul des distances à partir des coordonnées géographiques trouvées sur Internet ne prennent pas en compte la variation des rayons de courbure du géoïde. Elles sont donc affectées d'une incertitude de $\pm 0,5\%$. Elles ne peuvent donc pas être utilisées pour des applications qui nécessitent une meilleure précision. Cette réflexion propose des formules simples qui permettent de réduire à $0,05\%$ l'incertitude sur les trajets dont les deux extrémités se trouvent dans le même hémisphère d'une part et d'autre part des formules permettant de calculer la longueur exacte des trajets sur le géoïde au niveau de la mer. L'incertitude sur le résultat ne dépend plus que des incertitudes sur les coordonnées et sur les rayons de courbure du géoïde utilisés pour effectuer les calculs.

L'incertitude sur les coordonnées fournies par Google Earth a été évaluée par des comparaisons de ces coordonnées à celles de points géodésiques publiées par l'IGN. L'incertitude sur les distances calculées à partir des coordonnées fournies par Google Earth peut donc s'évaluer selon les zones. Dans les zones pour lesquelles l'option 3D est disponible l'incertitude est de :

- $\pm 0,12\%$ pour des distances inférieures à 2,5 km.
- $\pm (3\text{m} + 0,05\%)$ pour les distances supérieures à 2,5 km.

En dehors de ces zones, l'incertitude est de :

- $\pm 0,12\%$ pour des distances inférieures à 8 km.
- $\pm (10\text{m} + 0,05\%)$ pour les distances supérieures à 2,5 km.

Pour des distances mesurées en France métropolitaine, l'incertitude relative de $0,05\%$ est réduite à $0,0001\%$ ce qui la rend pratiquement négligeable. Le calculateur de trajet de Google Earth prend en compte les rayons de courbure du Géoïde mais, comme les deux extrémités du trajet doivent se trouver sur la même vue, sa précision reste limitée à $\pm 0,1\%$. L'incertitude absolue de 3m peut être réduite à 1m si l'on utilise les coordonnées fournies par le Géoportail de l'IGN.

Pour le futur, les formules proposées pour corriger les erreurs contenues dans les coordonnées géographiques auront un impact sur la précision en géolocalisation. Les secteurs d'activités tels que le transport des biens, l'agriculture de précision et la santé affineront la précision de la géolocalisation de leurs services. D'autres applications nécessitent l'utilisation de la géolocalisation de précision pour améliorer leurs services. La livraison avec précision à domicile par un drone d'un colis sur la fenêtre ou la terrasse d'une résidence est une évidence chez certaines grandes enseignes de distribution. Les pays

en voie développement ont besoin de la technologie de géolocalisation absente de toute erreur pour augmenter la production en évitant le gaspillage des ressources. La précision dans la géolocalisation impose aux machines agricoles de suivre des trajets précis pour planter, dépoter des engrais ou irriguer les plantations. Au Cameroun, l'agriculture porteur de l'économie camerounaise est tournée entre autres vers les cultures de rente tels que le cacao, le café, le palmier à huile, le soja ou le caoutchouc. L'Union Européenne a mis sur pied le règlement européen relatif à la lutte contre la déforestation et la dégradation forêts (RDUE). A partir du 30 décembre 2025 pour les grandes entreprises et au 30 juin 2026 pour les TPE et PME, tous les produits issus de l'exploitation forestière ne pourront plus être mis en vente, ou importés sur le marché de l'Union Européenne, ou exportés depuis le marché de l'UE vers d'autres pays. Trois conditions doivent être remplies pour ces produits : ils sont zéro déforestation et zéro dégradation forestière, ils ont été produits conformément à la législation pertinente du pays de production et ils font l'objet d'une déclaration de *Diligence Raisonnée*. Pour le règlement, ces cultures ont besoin de la géolocalisation de précision pour attribuer une référence géospatiale aux parcelles de production. Ces référents spatiaux composés de coordonnées géographiques seront utilisés dans la déclaration d'une diligence raisonnée. Ce processus de collecte d'informations comprend des levés des coordonnées géographiques des parcelles concernées par les cultures pour les stocker dans une base de données. Le règlement capitalise les données de géolocalisation des parcelles pour protéger l'environnement et augmenter la productivité des agriculteurs, bien que l'accès aux outils de géolocalisation restent très limités dans les zones rurales du Cameroun. Le secteur de la santé se sert de la géolocalisation pour optimiser les trajets empruntés par les ambulances. Certains services de ce secteur utilisent les données de géolocalisation pour évaluer la propagation des épidémies ou des pandémies dans un territoire. Exemple avec le Covid-19. Les interventions deviennent ciblées avec les corrections apportées à la précision.

Bien que les données de géolocalisation aient des avantages tangibles, elles soulèvent cependant quelques préoccupations. En effet, les données collectées en masse par la géolocalisation sont sujettes à des piratages informatiques. Elles renferment les données à caractère privé relatif aux déplacements, à la localisation des personnes. Quelques questions d'éthiques se posent quant à l'utilisation de ces données collectées par les technologies de la géolocalisation. Quelques personnes peuvent se sentir surveiller dans leurs faits et gestes.

Avec les formules proposées pour corriger la précision et lever les incertitudes pour les distances ou les points GPS, les données de géolocalisation des différents secteurs d'activités, sont améliorées avec une précision centimétrique ou millimétrique.

Références

- [FAU 19] FAURE L., « Google Earth couvre désormais plus de 98 % du globe, 10 millions de kilomètres d'images pour Street View », itsocial, <https://itsocial.fr/contenus/actualites/google-earth-couvre-desormais-plus-de-98-globe-10-millions-de-kilometres-dimages-street-view> , 2019.
- [GAR 19] GARTENBERG C., « Google reveals just how much of the world it's mapped with Street View and Earth », theverge, <https://www.theverge.com/2019/12/13/21020814/google-world-mapped-street-view-earth-square-miles>, 2019.
- [PIC 71] PICARD J., *Mesure de la terre*, Imprimerie royale, Paris, 1671. Consulté le 14 Janvier 2025 sur
- [TAY 11] TAYLOR B. T., FERNANDO P., BAUMAN A. E., WILLIAMSON A., CRAIG J.C, REDMAN S. «Measuring the Quality of Public Open Space Using Google Earth». *American Journal of Preventive Medicine*, n° 40, p.1-8, 2011, <https://doi.org/10.1016/j.amepre.2010.10.024>

1. Coordonnées des points géodésiques.

Ref IGN	Repère	IGN	IGN	Google	Google
		Latitude N	Longitude E	Latitude N	Longitude E
74076B	Eglise Villejuif	48°47'31,9625"	2°21'48,7138"	48°47'31,98"	2°21'48,74"
9404101	Immeuble Ivry	48°48'15,1143"	2°22'49,7452"	48°48'15,13"	2°22'49,77"
9102702	Chât.d'eau Athis-Mons	48°41'55,9395"	2°22'20,2219"	48°41'55,95"	2°22'20,25"
91326A	Eglise Juvisy	48°41'31,6514"	2°22'33,5933"	48°41'31,66"	2°22'33,62"
91589A	Eglise Savigny	48°41'16,3278"	2°21'00,0927"	48°41'16,32"	2°21'00,14"
77053A	Eglise BrieComteRobert	48°41'25,3203"	2°36'31,0657"	48°41'25,31"	2°36'31,08"
91339A	Chât.d'eau Montlhéry	48°37'32,1948"	2°15'02,3446"	48°37'32,22"	2°15'02,37"
91570A	Eglise St Michel/Orge	48°37'54,7164"	2°18'12,1475"	48°37'54,74"	2°18'12,17"
91458A	Eglise Nozay	48°39'37,0431"	2°14'33,5361"	48°39'37,07"	2°14'33,55"
9113502	Borne Champcueil	48°30'43,6515"	2°25'18,9905"	48°30'43,66"	2°25'18,99"
9115902	Château d'eau Chevannes	48°31'56,4705"	2°26'18,7424"	48°31'56,47"	2°26'18,74"
75056E	Dôme Sacré Cœur	48°53'12,0220"	2°20'34,9200"	48°53'12,08"	2°20'34,95"
75056AH	Egl. St Michel des Bat.	48°53'20,1004"	2°19'29,5481"	48°53'20,12"	2°19'29,58"
75056BB	Eglise St Eustache	48°51'48,2906"	2°20'42,4149"	48°51'48,24"	2°20'42,45"
75056AL	Eglise St Sulpice	48°51'04,0904"	2°20'03,0166"	48°51'04,10"	2°20'03,05"
75056AR	Eglise St Paul St Louis	48°51'16,3034"	2°21'40,9655"	48°51'16,34"	2°21'41,00"
9157001	Chât.d'eau StMichel/orge	48°38'23,4557"	2°18'47,6050"	48°38'23,47"	2°18'47,62"
91549B	Eglise Ste Geneviève...	48°38'02,0570"	2°20'06,9978"	48°38'02,08"	2°20'06,98"
7739201	Eglise Rouvres	49°03'43,9609"	2°43'02,1748"	49°03'43,96"	2°43'02,08"
6015802	Eglise Coyvrel	49°33'11,5494"	2°33'22,1327"	49°33'11,44"	2°33'22,09"
91045A	Eglise Ballancourt	48°31'31,046"	2°23'09,529"		
9152501	Pylone électrique	48°30'47,4414"	2°02'53,5207"	48°30'47,27"	2°02'53,55"

2. Ecart en mètres entre les points Géodésiques et ceux désignés par les coordonnées fournies par Google Earth Pro.

Ce tableau montre que les distances sont inférieures à 2m dans les zones 3D et peuvent atteindre voire dépasser 5m en dehors de ces zones. Les 4 derniers points sont situés en dehors des zones 3D. Ils représentent les valeurs mesurables les plus grandes sur un échantillon de 30 points géodésiques. Pour l'église de Ballancourt, les distances ont été mesurées en utilisant un logiciel de Conception Assistée par Ordinateur sur l'image numérisée.

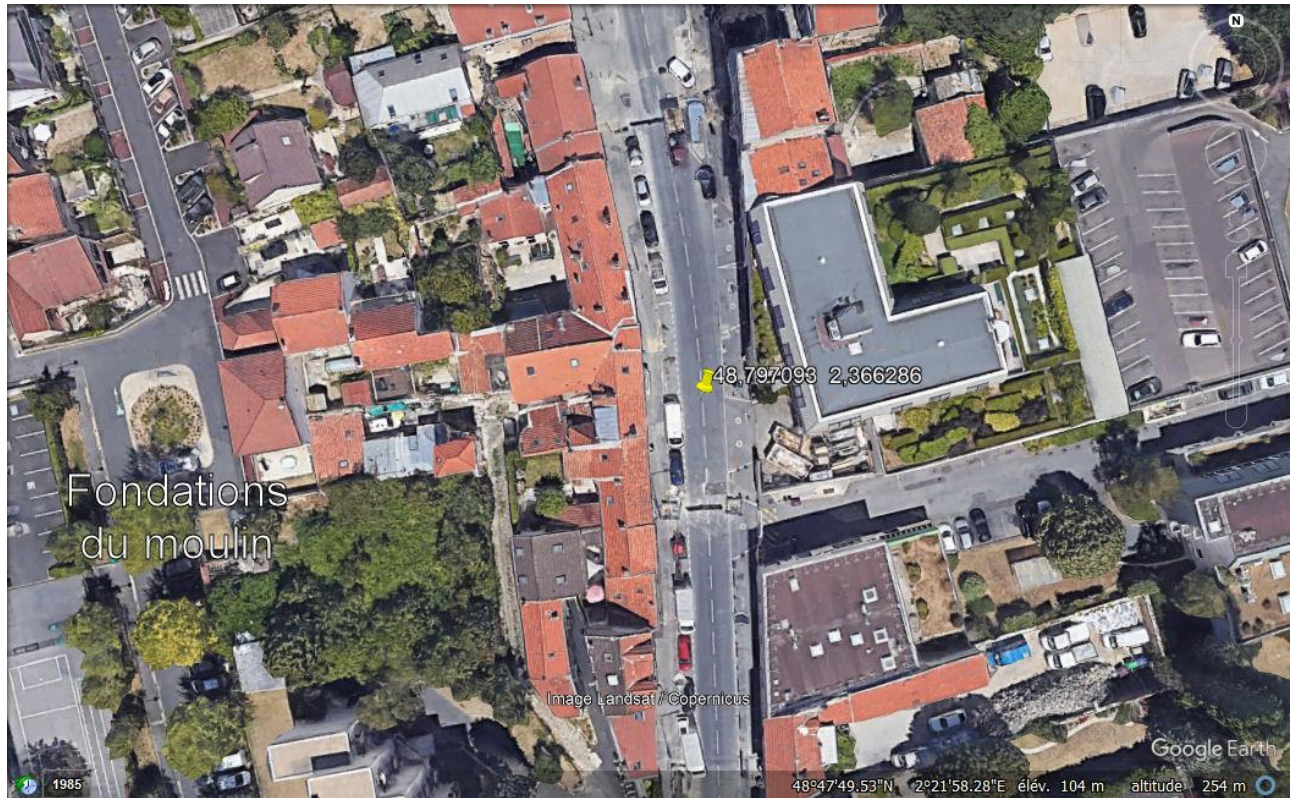
Ref IGN	Repère	D Lat	D Lon	Ecart
		m	m	m
74076B	Eglise Villejuif	0,5	0,5	0,8
9404101	Immeuble Ivry	0,5	0,5	0,7
9102702	Chât.d'eau Athis-Mons	0,3	0,6	0,7
91326A	Eglise Juvisy	0,3	0,5	0,6
91589A	Eglise Savigny	-0,2	1,0	1,0
77053A	Eglise BrieComteRobert	-0,3	0,3	0,4
91339A	Chât.d'eau Montlhéry	0,8	0,5	0,9
91570A	Eglise St Michel/Orge	0,7	0,5	0,9
91458A	Eglise Nozay	0,8	0,3	0,9
9113502	Borne Champcueil	0,3	0,0	0,3
9115902	Chât.d'eau Chevannes	0,0	0,0	0,0
75056E	Dôme Sacré Cœur	1,8	0,6	1,9
75056AH	Egl. St Michel des Bat.	0,6	0,6	0,9
75056BB	Eglise St Eustache	-1,6	0,7	1,7
75056AL	Eglise St Sulpice	0,3	0,7	0,7
75056AR	Eglise St Paul St Louis	1,1	0,7	1,3
9157001	Chât.d'eau St Michel/orge	0,4	0,3	0,5
91549B	Eglise Ste Geneviève...	0,7	-0,4	0,8
7739201	Eglise Rouvres	0,0	-1,9	1,9
6015802	Eglise Coyvrel	-3,4	-0,9	3,5
91045A	Eglise Ballancourt	-4,2	1,5	4,5
9152501	Pylone électrique	-5,3	0,6	5,3

3. Erreurs sur les distances mesurées par l'abbé Picard

La colonne Picard donne les valeurs mesurées par l'abbé Picard. La colonne IGN donne les valeurs calculées à partir des coordonnées géographiques de l'IGN. L'incertitude estimée sur ces valeurs est de +/-1 mètre.

AC	21464	21471	-34	21437	-34
AD	19339	19291	-69	19314	24
AE	31779	31733	-83	31739	6
BC	17451	17422	-3	17429	8
BE	20800	20774	-81	20774	-1
CD	25574	25546	-14	25542	-4
CE	24146	24116	-55	24116	-1
CP	29361	29326	48	29324	-2
DE	17288	17263	-51	17266	3
EP	41889	41842	-82	41836	-6
HI	41013	40988	62	40961	-26
HK	37866	37819	85	37818	-1
IK	22768	22744	4	22739	-5
IL	21803	21774	63	21775	1
IN	36845	36787	88	36799	12
KL	21806	21779	55	21778	0
LN	20837	20796	57	20811	15
LR	10740	10720	86	10726	7
NR	13882	13852	-29	13865	12
PD	28497	28474	-80	28461	-13
Moyenne	24 580	24 549		24549	0

4. Moulin de Villejuif.



5. Pavillon de Juvisy



6. Clocher de l'église de Brie-Comte-Robert.

