



GéoPeuple

Rapport numéro	L2.1-1
Titre	Géoréférencement des feuilles de Cassini
Rédigé par	Eric Gross (COGIT/IGN)
État (en cours / final)	Final
Relu par	Benoît Coste et Sébastien Mustière (COGIT/IGN)
Date	21 juillet 2011

0.1 Géoréférencement des feuilles Cassini

Ce document présente la méthode utilisée dans le projet GéoPeuple pour géoréférencer les feuilles de Cassini ainsi que les différentes évaluations qui lui sont relatives.

0.1.1 Zones de travail considérées

Quatre zones de travail sont considérées dans le projet GéoPeuple, Agen (feuille 73), Grenoble (feuille 119), Reims (feuille 79) et Saint-Malo (feuille 127), telles que représentées en bleu sur la figure 1. Une cinquième zone, Châlons (feuille 80), située au sud de la feuille de Reims et représentée en jaune orange sur la figure 1 a été ajoutée afin de pouvoir étudier les problèmes de raccord entre deux feuilles voisines.

0.1.2 Géoréférencements préalablement réalisés

Deux géoréférencements des cartes de Cassini auxquels nous avons accès ont été réalisés avant le démarrage du projet GéoPeuple. Le premier a été réalisé par la société GEOMOD pour le compte de l'École des Hautes Études en Sciences Sociales (EHESS) dans le cadre du projet "Des villages de Cassini aux communes d'aujourd'hui"¹, le second par l'Institut Géographique National (IGN) dans le cadre de la dématérialisation du fonds de la Cartothèque où un scannage patrimonial enrichi d'un géoréférencement et d'une rectification des cartes anciennes scannées est effectué. Les approches employées sont semblables et se découpent en deux étapes distinctes :

- la première étape consiste à géoréférencer chaque feuille Cassini dans le tableau d'assemblage des cartes de Cassini (cf. figure 1) afin de reconstituer la carte France entière, en assurant au mieux leur juxtaposition,
- la seconde à projeter les feuilles géoréférencées dans le tableau d'assemblage dans une projection actuelle.

La seconde étape, identique sur le principe théorique, diffère cependant par la définition de la projection Cassini utilisée. La société GEOMOD s'est appuyée sur une projection de Cassini basée sur la sphère de Picard avec les caractéristiques suivantes :

1. Site : <http://cassini.ehess.fr>

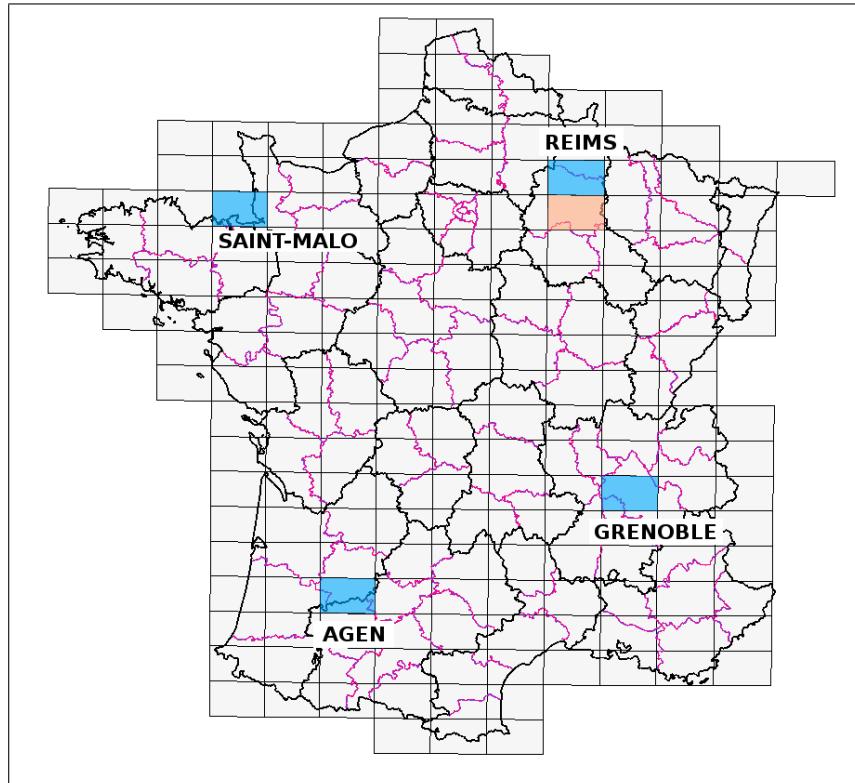


FIGURE 1 – Zones de travail considérées

- Ellipsoïde : sphère de Picard de rayon 6 371 598 mètres,
- Latitude origine : 48,836111111111° Nord,
- Longitude origine : méridien de Paris, 2,33722917° Est,
- Méridien central : 0°,
- Faux Est : 0 mètre,
- Faux Nord : 0 mètre.

GEOMOD, après avoir dans un premier temps utilisé des paramètres approchés de Datum Shift, a affiné ces paramètres en sélectionnant 70 clochers significatifs représentés dans les données actuelles et dans les feuilles Cassini. Les feuilles géoréférencées l'ont été dans une projection Lambert II étendu, projection utilisé en France lors de la réalisation du géoréférencement en 2004 et associée au système NTF (Nouvelle triangulation de la France). Ce géoréférencement a été validé par le département IGN conseil.

L'IGN a utilisé l'ellipsoïde Clarke 80 comme support de la projection Cassini et les feuilles géoréférencées l'ont été dans une projection Lambert 93, projection officielle pour les cartes de France métropolitaine associée au système géodésique RGF93.

Historiquement, il est difficile de savoir quelle projection a été utilisée pour concevoir la carte de Cassini, en particulier au niveau du choix de modélisation de la Terre par soit une sphère ou soit un ellipsoïde, comme l'illustrent les propos suivants rédigés par le colonel Berthaut dans "La carte de France 1750–1898, étude historique" (tome 1, page 44) à propos de la projection de Cassini : "La perpendiculaire à la méridienne, dans l'hypothèse de la Terre sphérique, est un grand cercle ; dans l'hypothèse de l'ellipsoïde de révolution, c'est une ligne à double courbure, dont les propriétés ont occupé plusieurs géomètres. Clairaut en a donné l'étude en 1733, dans un mémoire à l'Académie des Sciences. Cassini fait remarquer que cette courbe se confond sensiblement avec un grand cercle, lorsqu'il s'agit seulement d'une étendue de quelques degrés en longitude ; mais qu'elle diffère d'une façon très appréciable, lorsqu'il s'agit d'une distance aussi grande que celle de Paris à Vienne."

0.1.3 Méthode employée

Dans le cadre du projet GéoPeuple, l'objectif est de parvenir à une intégration aisée des éléments contenus dans les feuilles de Cassini. Suite à l'étude de la carte de Cassini, un géoréférencement basé sur une transformation unique s'appuyant sur les méthodes géodésiques précédemment décrites permet de répondre à une problématique d'étude d'erreurs dans les cartes anciennes, non forcément d'obtenir les données Cassini au plus proche des données topographiques actuelles. En effet, une transformation unique associée à l'ensemble du territoire ne peut à elle seule représenter les déformations liées aux cartes de Cassini telles qu'elles ont été conçues. C'est pourquoi, il a été décidé d'appliquer une transformation par feuille. Le choix de la transformation s'est porté sur une transformation de Helmert. Cette transformation est la combinaison de deux translations, d'une rotation et d'un changement d'échelle, comme illustré sur la figure 2. Elle convient en ce sens au problème posé, les repères tant des cartes de Cassini que des données actuelles étant orthonormés.

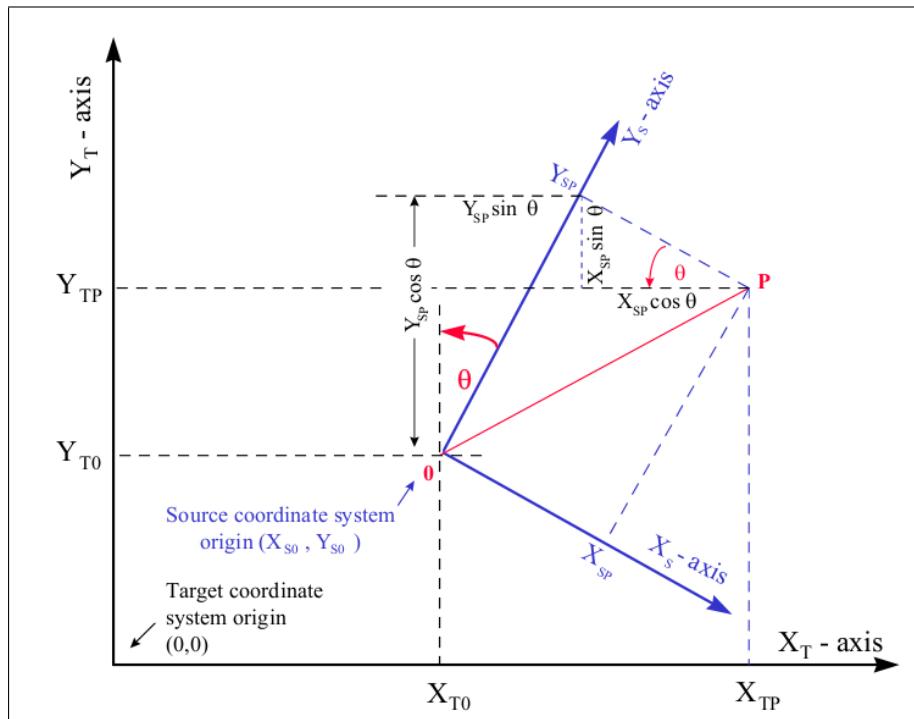


FIGURE 2 – Similarité ou transformation dite de Helmert

Mathématiquement, la transformation de Helmert est décrite par l'équation suivante :

$$\begin{bmatrix} x_t \\ y_t \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m.\cos(\theta) & m.\sin(\theta) \\ -m.\sin(\theta) & m.\cos(\theta) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_s \\ y_s \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} c \\ d \end{bmatrix} \quad (1)$$

ou, en posant $a = m.\cos(\theta)$ et $b = m * \sin(\theta)$:

$$\begin{bmatrix} x_t \\ y_t \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a & b \\ -b & a \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_s \\ y_s \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} c \\ d \end{bmatrix} \quad (2)$$

où :

- a et b sont les paramètres qui déterminent le changement d'échelle et la rotation,
- c et d sont les paramètres de translation,
- x_t et y_t sont les coordonnées cible,

– x_s et y_s sont les coordonnées source.

Deux amers seulement sont ainsi requis pour déterminer les paramètres de la transformation de Helmert. Toutefois, un nombre plus important d'amers est généralement mesuré.

Si n amers sont mesurés, l'équation 2 peut être réorganisée comme suit :

$$\underbrace{\begin{bmatrix} x_{s1} & y_{s1} & 1 & 0 \\ y_{s1} & -x_{s1} & 0 & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_{sn} & y_{sn} & 1 & 0 \\ y_{sn} & -x_{sn} & 0 & 1 \end{bmatrix}}_A \cdot \underbrace{\begin{bmatrix} a \\ b \\ c \\ d \end{bmatrix}}_X \approx \underbrace{\begin{bmatrix} x_{t1} \\ y_{t1} \\ \vdots \\ x_{tn} \\ y_{tn} \end{bmatrix}}_Y \quad (3)$$

Une procédure d'ajustement est réalisée pour estimer les paramètres de transformation relatif au système linéaire 3. Cette procédure se base sur la méthode des moindres carrés.

Cette transformation a de plus l'avantage d'être inversible. La transformation inverse est calculée comme suit, par résolution inverse du système linéaire défini par l'équation 2 :

$$\left\{ \begin{array}{l} b.y_s = x_t - a.x_s - c \\ b.x_s = -y_t + a.y_s + d \end{array} \right. \quad (4)$$

$$\Leftrightarrow \left\{ \begin{array}{l} b.y_s = x_t - a.x_s - c \\ b^2.x_s = -b.y_t + a.b.y_s + b.d \end{array} \right. \quad (5)$$

$$\Leftrightarrow \left\{ \begin{array}{l} b.y_s = x_t - a.x_s - c \\ (a^2 + b^2).x_s = -b.y_t + a.x_t - a.c + b.d \end{array} \right. \quad (6)$$

$$\Leftrightarrow \left\{ \begin{array}{l} b.y_s = x_t - a.x_s - c \\ x_s = \frac{a.x_t}{a^2+b^2} - \frac{b.y_t}{a^2+b^2} + \frac{b.d-a.c}{a^2+b^2} \end{array} \right. \quad (7)$$

Le passage du système d'équations 6 au système d'équations 7 est valide car $a^2 + b^2 > 0$. En effet, si $a^2 + b^2 = 0$ alors $a = 0$ et $b = 0$, ce qui implique que la transformation d'Helmert n'est pas définie car réduite au système suivant :

$$\left\{ \begin{array}{l} x_t = c \\ y_t = d \end{array} \right. \quad (8)$$

La transformation inverse est donc définie comme suit :

$$\begin{bmatrix} x_s \\ y_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{inv} & b_{inv} \\ -b_{inv} & a_{inv} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_t \\ y_t \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} c_{inv} \\ d_{inv} \end{bmatrix} \quad (9)$$

où :

- $a_{inv} = \frac{a}{a^2+b^2}$
- $b_{inv} = -\frac{b}{a^2+b^2}$
- $c_{inv} = \frac{b.d-a.c}{a^2+b^2}$
- $d_{inv} = -\frac{a.d+b.c}{a^2+b^2}$

0.1.4 Réalisation et évaluation du géoréférencement

La méthode de géoréférencement décrite précédemment a été utilisée pour géoréférencer les zones considérées dans le projet. Les amers et les points d'évaluation ont été sélectionnés conjointement sur les feuilles Cassini en coordonnées image (points source) et sur les données topographiques issues du RGE – données BDTOPO – en projection Lambert 93 (points cible).

Suite à ce travail, les différents livrables sont disponibles :

- les géoréférencements des feuilles Cassini des zones considérées et les évaluations associées ; les éléments d'évaluation sont présentés ci-après,
- un outil de géoréférencement des données au format vecteur, soit un géoréférencement des données issues de la vectorisation manuelle des feuilles Cassini considérées vers les données de la BDTOPO soit un géoréférencement inverse ; cet outil est décrit en [0.1.6](#).

Afin d'évaluer les géoréférencements réalisés, les éléments suivants ont été utilisés :

- feuille Cassini enrichie des amers (en rouge) et des points d'évaluation (ou points de contrôle) (en vert),
- visualisation des erreurs à un niveau local – erreurs représentées par un linéaire rouge pour les erreurs résiduelles liées aux amers, par un linéaire jaune orange pour les erreurs résiduelles liées aux points d'évaluation, les erreurs étant exagérées d'un facteur d'échelle égal à 10 afin de permettre une visualisation aisée – et à un niveau global – isolignes des erreurs résiduelles interpolées et liées aux amers, espacées de 10 mètres et symbolisées par un dégradé continu du bleu vers le rouge, le bleu étant utilisé pour les valeurs minimales, le rouge pour les valeurs maximales –
- tableau récapitulatif informant sur la RMS (Root Mean Square, en français appelé valeur efficace ou encore moyenne quadratique), les erreurs résiduelles liées aux amers et celles liées aux points d'évaluation.

Ces éléments ont été appliqués pour chaque feuille des 4+1 zones considérées. L'ensemble des évaluations est présenté dans les pages suivantes et les principaux éléments sont résumés dans le tableau ci-dessous :

Zone considérée	Nombre d'amers	Nombre de points d'éval.	RMS	Écart-type	Erreur min	Erreur max
Agen	15	5	114.25	51.48	10.51	173.06
Grenoble	13	4	318.65	176.72	52.69	750.65
Reims	15	6	103.21	54.91	6.40	174.35
Saint-Malo	17	4	127.62	47.91	61.31	200.71
Châlons	13	5	118.24	59.53	14.38	203.95

Feuille d'Agen

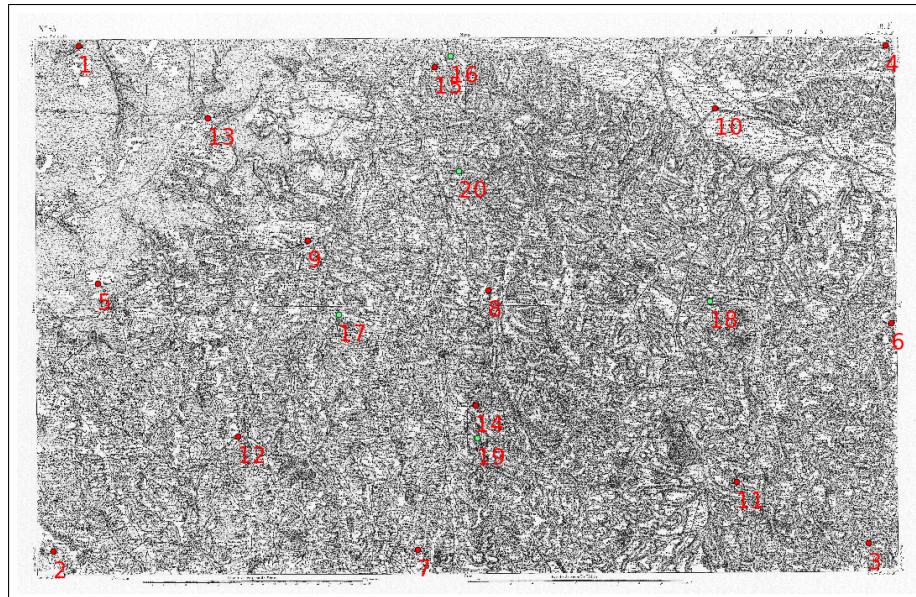


FIGURE 3 – Amers de la feuille d'Agen.

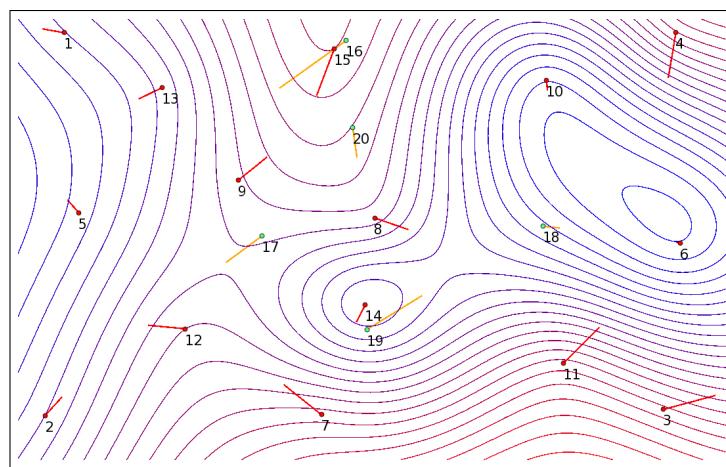


FIGURE 4 – Erreurs de la feuille d'Agen

RMS	114.24635994545416	
Erreurs résiduelles	1 : 69.50749390274842	9 : 117.90351387556137
	2 : 80.04223010439966	10 : 30.745925480479574
	3 : 173.0590750226224	11 : 163.56524345368206
	4 : 149.263641442323	12 : 119.99155816098605
	5 : 54.65898195915111	13 : 83.68399243712729
	6 : 10.516454971237735	14 : 61.41493395793723
	7 : 154.49245335951144	15 : 160.00766378738317
	8 : 113.90717331211165	
Erreurs d'évaluation	16 : 265.0695261040714	19 : 208.44397204889313
	17 : 141.5348803873665	20 : 96.50452309907773
	18 : 52.67990678611631	

Feuille de Grenoble

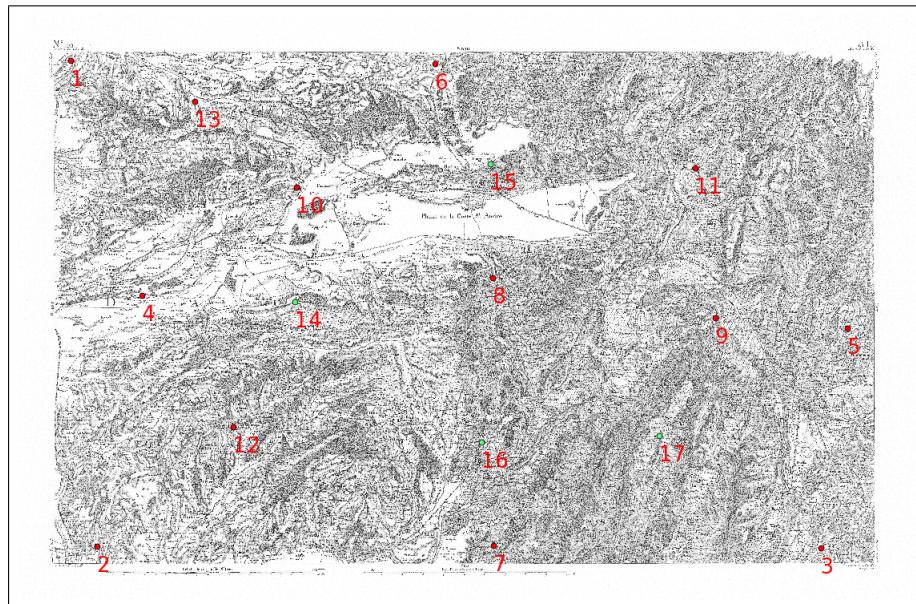


FIGURE 5 – Amers de la feuille de Grenoble

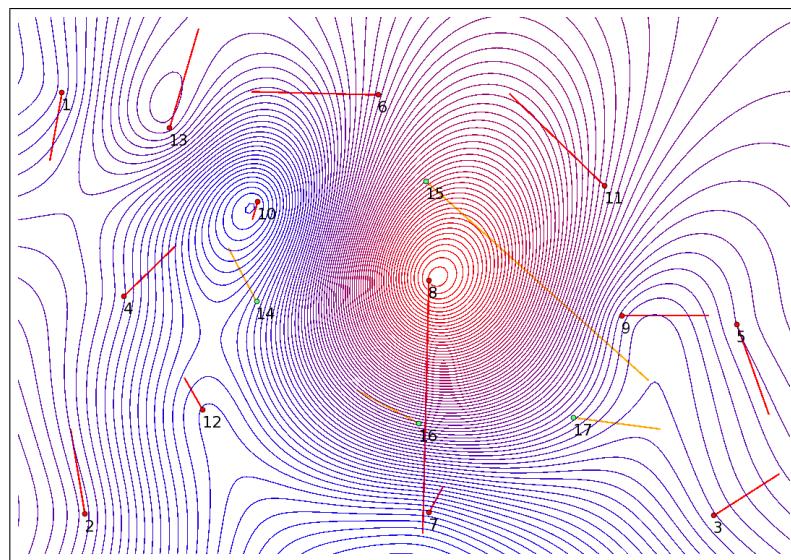


FIGURE 6 – Erreurs de la feuille de Grenoble

RMS	318.6469614515148	
Erreurs résiduelles	1 : 204.41350713959812 2 : 254.28617679821858 3 : 228.6835688974277 4 : 211.1961915994148 5 : 280.20380071176413 6 : 374.9537684132082 7 : 86.45828152965444	8 : 750.6471245101496 9 : 256.9874183843167 10 : 52.686871173961876 11 : 391.61544629466493 12 : 109.10483300249732 13 : 304.1127596536258
Erreurs d'évaluation	14 : 177.69694090134726 15 : 883.9340675295849	16 : 209.08523204473673 17 : 259.1321949012533

Feuille de Reims

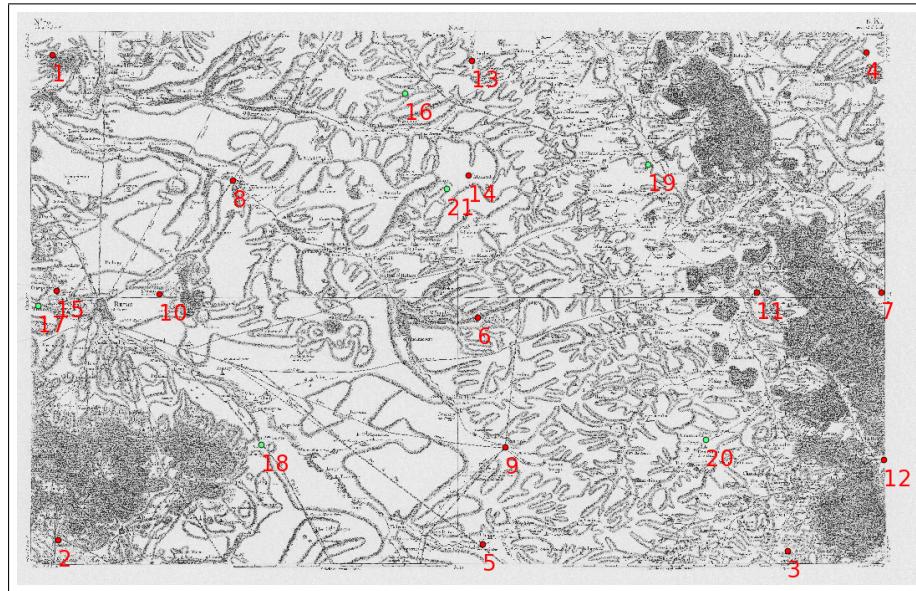


FIGURE 7 – Amers de la feuille de Reims.

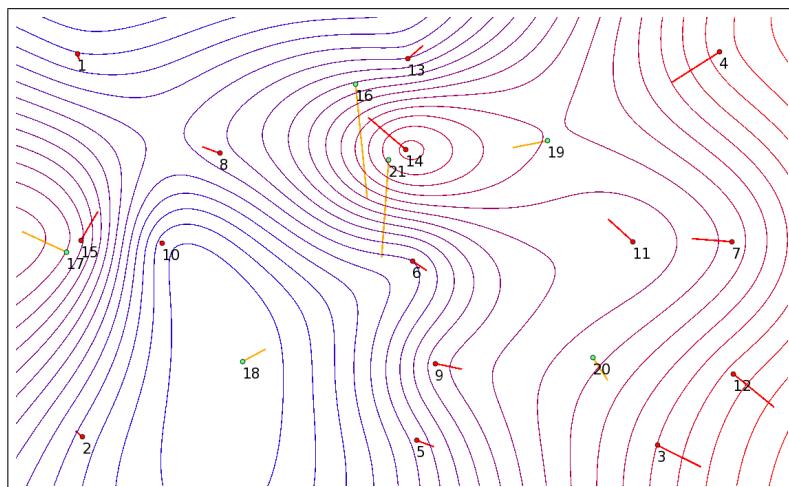


FIGURE 8 – Erreurs de la feuille de Reims

RMS	103.20841131403292	
Erreurs résiduelles	1 : 20.806225379873048 2 : 26.574692169741354 3 : 150.25700031094206 4 : 174.34624466561826 5 : 53.78416554924272 6 : 50.08945326137472 7 : 124.23706174766265 8 : 56.02648241149742	9 : 84.22646523977275 10 : 6.39731043981482 11 : 102.93069383546575 12 : 163.29632743472112 13 : 60.472590061148445 14 : 152.2911560889867 15 : 102.20701697161635
Erreurs d'évaluation	16 : 356.7212307656601 17 : 150.84124720266254 18 : 80.85105194267256	19 : 109.2839822454491 20 : 81.783548528738 21 : 304.2257974883021

Feuille de Saint-Malo

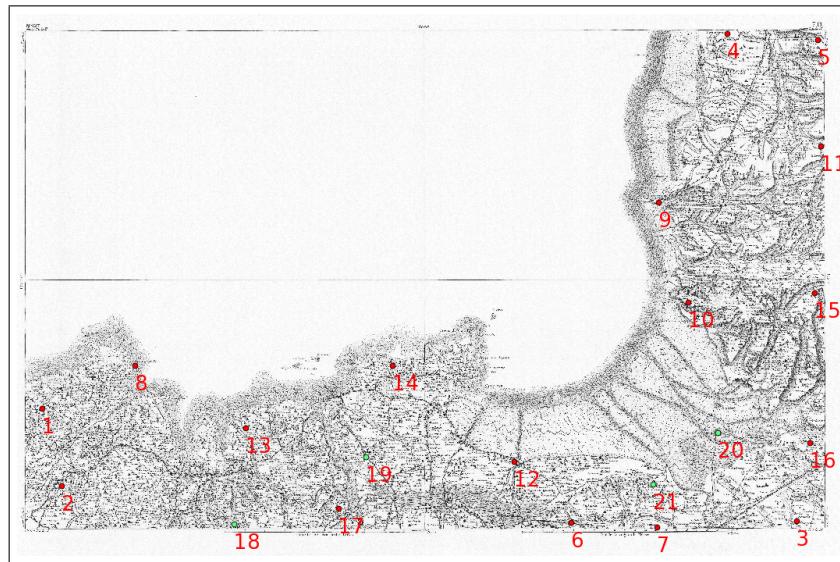


FIGURE 9 – Amers de la feuille de Saint-Malo.

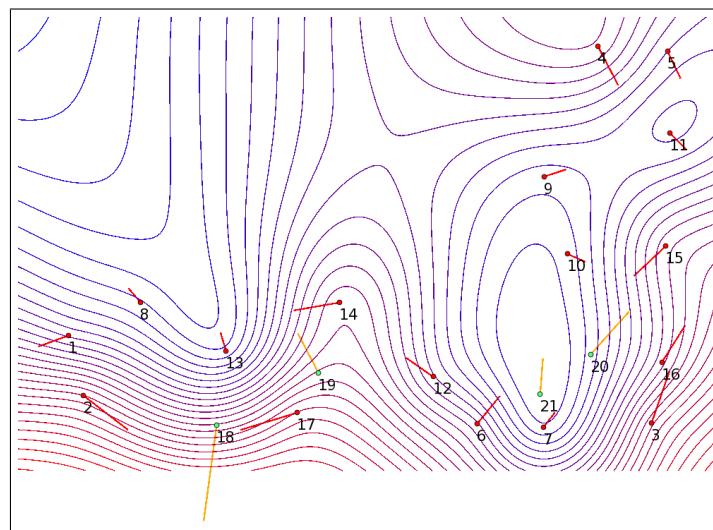


FIGURE 10 – Erreurs de la feuille de Saint-Malo

RMS	127.62357421654673	
Erreurs résiduelles	1 : 108.3090676132625 2 : 190.23986973338526 3 : 187.05312425638735 4 : 147.2863385411997 5 : 99.84157854657934 6 : 121.88817275962215 7 : 62.459113470879615 8 : 61.305754207920785 9 : 75.33234759499382	10 : 65.05238437228472 11 : 77.61606776489961 12 : 111.61824699115064 13 : 63.41711907137926 14 : 156.20444484496582 15 : 145.5627824013491 16 : 146.69250044724748 17 : 200.7111501599433
Erreurs d'évaluation	18 : 330.0242673340882 19 : 149.9850696571354	20 : 196.01803544429194 21 : 118.90887943702374

Feuille de Châlons (sud de Reims)

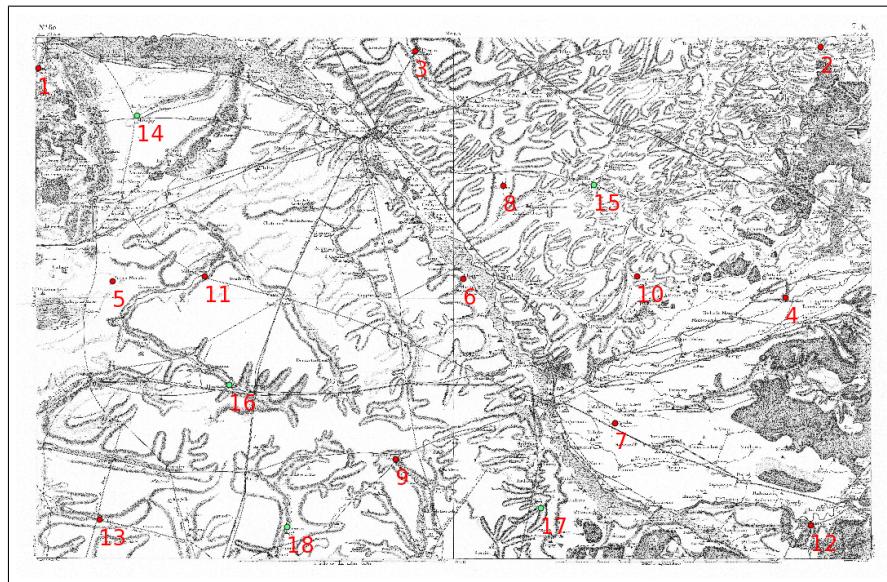


FIGURE 11 – Amers de la feuille de Châlons.

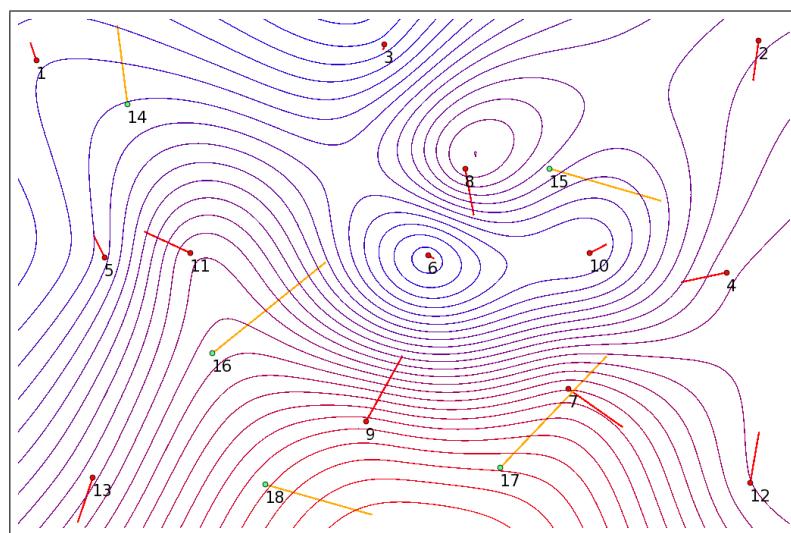


FIGURE 12 – Erreurs de la feuille de Châlons

RMS	118.241756888718		
Erreurs résiduelles	1 : 48.58970726544408	8 : 125.76121857276506	
	2 : 108.03147210953115	9 : 203.95323044585578	
	3 : 14.37819398486209	10 : 51.21777136690688	
	4 : 126.8154956980404	11 : 136.377381010058	
	5 : 67.35655800617815	12 : 140.45725895997808	
	6 : 16.060045889827677	13 : 127.1576148492865	
	7 : 179.18376839910397		
Erreurs d'évaluation	14 : 215.3833900585605	17 : 419.4306194488995	
	15 : 315.9426071738402	18 : 301.7351261182397	
	16 : 396.2395341412631		

0.1.5 Écarts entre deux feuilles voisines

Dans l'objectif de valider le choix de la méthode utilisée dans le projet (cf. 0.1.3), une étude sur le décalage entre deux feuilles voisines est réalisée. Elle consiste à évaluer les écarts entre deux feuilles adjacentes avant et après géoréférencement. Les feuilles considérées sont ici la feuille de Reims (feuille 79) et celle de Châlons (feuille 80).

Écarts avant géoréférencement

L'évaluation avant géoréférencement consiste à mettre bord à bord les feuilles de Reims et de Châlons. Cette évaluation montre que le raccord entre les deux feuilles est globalement cohérent mais que de nombreuses incohérences cartographiques demeurent néanmoins, comme l'illustre la figure 13. Deux exemples de raccords cohérents (éléments A et B de couleur verte) et 7 incohérents (éléments chiffrés de couleur rouge) sont mis en évidence à l'état original des feuilles Cassini. Les incohérences constatées sont de natures différentes :

- figure 13.1 : deux routes, l'une en pierre bordée d'arbres au sud du raccord et l'autre en pierre au nord, s'arrêtent de manière nette en bord de feuille,
- figure 13.2 : légers décalages entre des routes empierrées bordées d'arbres,
- figure 13.3 : une discontinuité relative à la route empierrée bordée d'arbres est significative au niveau du raccord alors que sur cette même zone, la continuité est assurée au niveau du cours d'eau et de la route empierrée,
- figure 13.4 : légers décalages entre la route empierrée bordée d'arbres de part et d'autre du raccord, de même pour le cours d'eau; une discontinuité d'orientation est également à noter concernant la route empierrée bordée d'arbres,
- figure 13.5 : la limite paroissiale (en pointillés) présente au sud du raccord n'est pas cartographiée au nord,
- figure 13.6 : une discontinuité est à noter concernant la route empierrée bordée d'arbres alors que sur cette même zone, la continuité est assurée au niveau du cours d'eau,
- figure 13.7 : la continuité du cours d'eau est assurée de part et d'autre du raccord à l'extrême est alors qu'elle ne l'est pas pour les autres raccords de cours d'eau.

La typologie de ces incohérences peut ainsi être décrite comme suit :

- discontinuité cartographique régulière, i.e. une erreur de relevés topographiques ou une erreur cartographique est constatée au niveau du raccord entre deux feuilles voisines, l'erreur se propageant de manière régulière sur l'ensemble d'une zone – zone à un niveau local a minima –, impliquant ainsi un décalage constant,
- discontinuité cartographique irrégulière, i.e. une erreur de relevés topographiques ou une erreur cartographique est constatée au niveau du raccord entre deux feuilles voisines, l'erreur se propageant de manière irrégulière sur l'ensemble d'une zone – zone à un niveau local a minima –,
- discontinuité cartographique d'orientation, i.e. un changement d'orientation d'un même élément de part et d'autre du raccord,
- absence d'élément en correspondance sur une feuille voisine.

Les erreurs topographiques ou/et cartographiques constatées sont de l'ordre d'une à quatre fois la largeur d'un symbole utilisé dans la légende Cassini. Dans l'exemple étudié ici, la largeur utile est généralement celle en relation avec le symbole d'une route. Cette dernière est comprise en moyenne entre 0.4mm pour les routes surfaciques ordinaires – correspondant à 35 mètres dans la réalité – et 0.5mm pour les routes empierrées bordées d'arbres – correspondant à 43 mètres dans la réalité –. L'erreur ainsi commise est comprise entre 35 mètres a minima et 172 mètres a maxima.

Ajoutons enfin que les incohérences présentées ici ne peuvent a priori pas être relatives à des problèmes temporels. En effet, les deux feuilles ont toutes deux été réalisées lors de la première phase de la

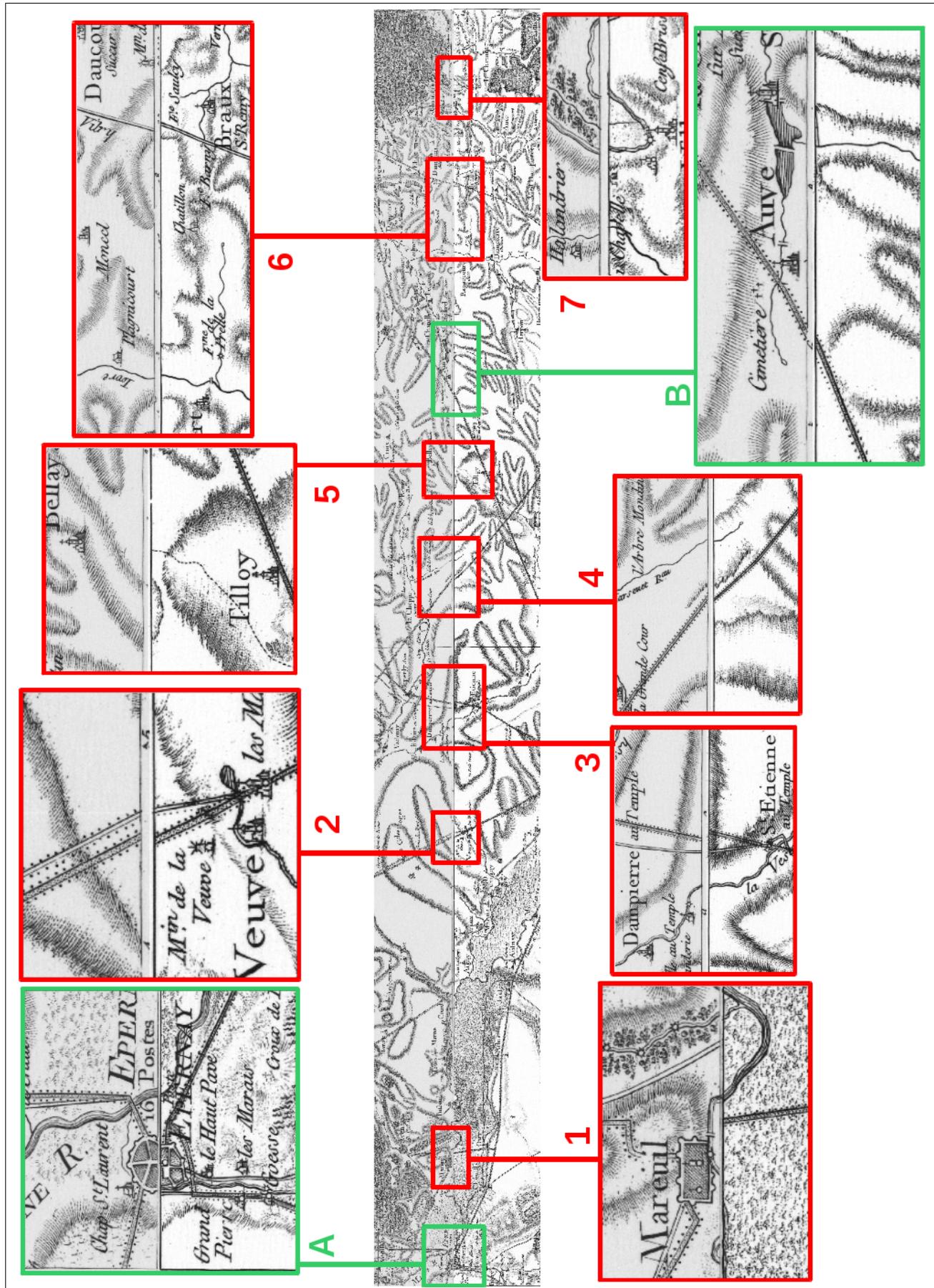


FIGURE 13 – Cohérences et incohérences entre les feuilles 79 et 80 de Cassini.

cartographie Cassini, entre 1750 et 1760, tel qu'illustré sur le tableau d'assemblage enrichi des dates de publication (cf. figure 16 en annexe).

Écarts après géoréférencement

Les écarts après géoréférencement sont maintenant étudiés. Pour ce faire, un repère relatif aux deux feuilles voisines considérées est défini. Il a pour point d'origine le point occidental communs aux deux feuilles, i.e. le point correspondant au coin sud-ouest de la feuille utile de Reims (feuille 79) et le point correspondant au nord-ouest de la feuille utile de Châlons (feuille 80). L'axe horizontal est défini par la direction ouest-est et l'axe vertical par la direction sud-nord.

Des marqueurs positionnés dans ce repère ainsi défini le long de l'axe horizontal ont été créés, espacés entre eux de 200 mètres. Chaque marqueur est représenté par un segment de direction sud-nord avec une longueur permettant de figurer sur les deux feuilles. Ces marqueurs sont ensuite géoréférencés de deux manières différentes : une première fois en utilisant la transformation relative à la feuille 79 et une seconde fois en utilisant la transformation relative à la feuille 80. L'écart après géoréférencement entre les marqueurs ainsi obtenus est ensuite étudié afin de mesurer l'écart dû au géoréférencement. Ces écarts, mesurés en valeur absolue, sont représentés sur la figure 14.

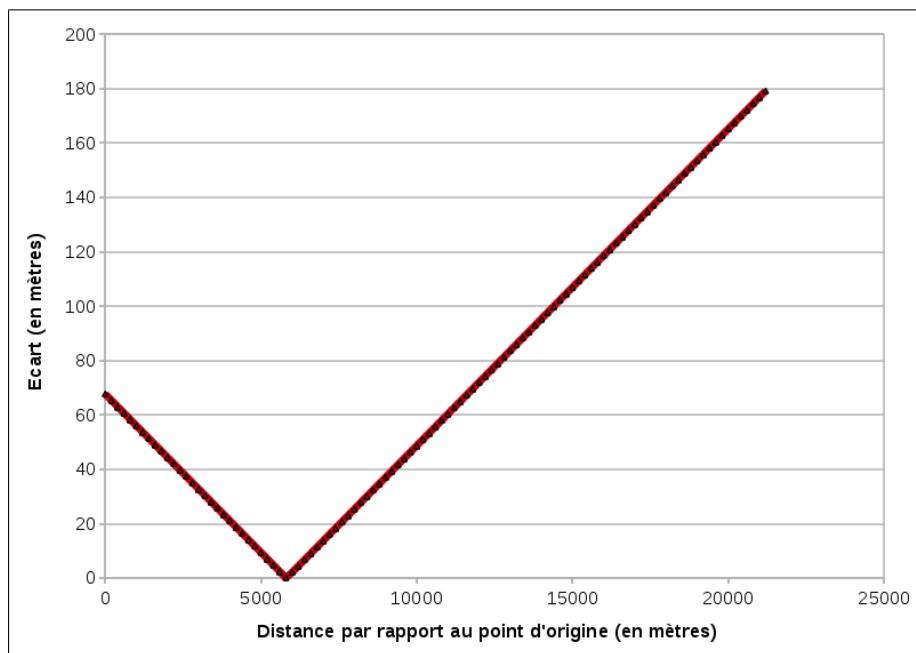


FIGURE 14 – Écarts dûs au géoréférencement.

Nous constatons que ces écarts sont compris entre 0 et 179 mètres et qu'ils évoluent logiquement de manière linéaire, en regard du type de transformation choisi pour le géoréférencement. Cet écart évolue de 1.16 centimètre par mètre.

Discussion

L'étude des écarts avant et après géoréférencement montre sur un exemple que la méthode de géoréférencement employée a pour conséquence des décalages du même ordre de grandeur que les erreurs topographiques et/ou cartographiques liées aux feuilles de Cassini telles qu'initialement conçues. De fait, le raccord "exact" entre deux zones voisines pourra être obtenu à l'aide de méthodes d'intégration qui seront basées essentiellement sur l'alignement des géométries dans les zones tampons (fixes ou mobiles) définies autour des raccords de feuilles adjacentes. Ces méthodes seront a priori efficaces pour la ma-

ajorité des feuilles traitées, à l'exception peut-être des feuilles situées dans des zones montagneuses, en regard par exemple des écarts constatés sur la feuille de Grenoble (cf. 0.1.4).

0.1.6 Action de développement informatique associée à cette étude

Suite à cette étude, une action de développement, concernant le développement d'un outil de géoréférencement, a été entreprise. Une action conjointe visant à l'extraction de vignettes à partir des données vecteur a également été réalisée. L'ensemble des développements a été centralisé via SVN² (système de gestion de versions de code).

Détail du livrable

Le livrable comporte les éléments suivants :

- un répertoire “config”,
- un fichier de démarrage Linux “geopeople_linux.sh”,
- un fichier de démarrage Windows “geopeople_windows.bat”,
- un fichier contenant l'application “geopeople-0.1.jar”.

Le seul prérequis est de disposer d'une machine virtuelle Java sur son poste de travail, a minima version 5 ou 6. Si ce prérequis n'est pas satisfait, il est possible de télécharger celle-ci sur le site d'Oracle³.

Pour lancer le programme :

- cliquez sur le fichier “geopeople_linux.sh” si vous êtes sous environnement Linux,
- cliquez sur le fichier “geopeople_windows.bat” si vous êtes sous environnement Windows.

L'interface suivante est alors affichée :

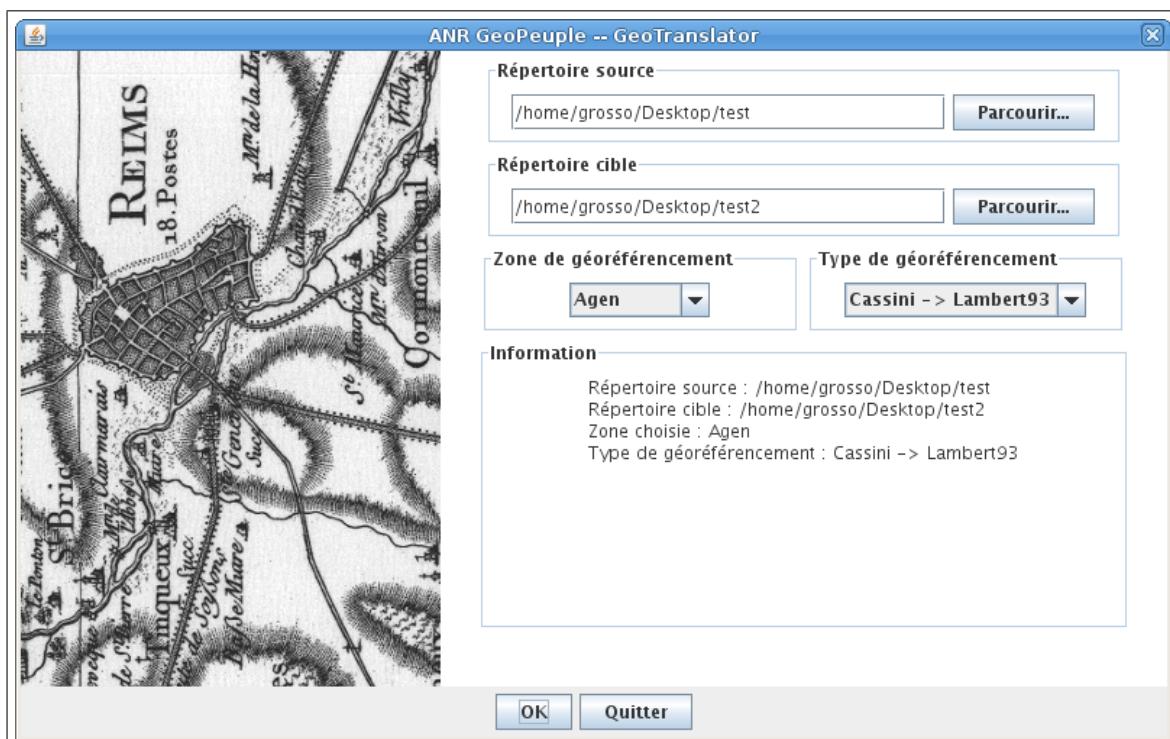


FIGURE 15 – Inteface de géoréférencement GéoPeuple.

2. URL du dépôt : <https://dionysos2.ign.fr/src/cogit-depot> – seul le personnel COGIT peut pour l'instant y accéder –
 3. Site de téléchargement : <http://java.com/fr/download/index.jsp>

L'utilisateur doit d'abord choisir le **Répertoire source** qui contient les fichiers au format ESRI Shapefile à géoréférencer (les fichiers contenus dans les sous-dossiers de ce répertoire sont également considérés) et le **Répertoire cible**, répertoire d'accueil des fichiers géoréférencés. Le répertoire cible ne peut-être, pour des raisons de sécurisation des données source, ni identique au répertoire source ni un sous-répertoire de ce dernier.

L'utilisateur doit ensuite choisir la **Zone de géoréférencement** relative aux données à géoréférencer puis le **Type de géoréférencement** désiré, à savoir soit un géoréférencement direct, i.e. un géoréférencement des données Cassini vectorisées pour les intégrer dans les données actuelles – option **Cassini -> Lambert93 -**, soit un géoréférencement inverse, i.e. un géoréférencement des données actuelles vers les données Cassini – option **Lambert93 -> Cassini -**.

Enfin, précisons que l'utilisation d'un géoréférencement suivi de son géoréférencement inverse de manière répétée (ou *vice versa*) – tel que défini en [0.1.3](#) – a un effet quasi nul sur la qualité des données en terme de précision. En effet, les tests réalisés dans le cadre de cette étude ont montré des erreurs dans la précision des coordonnées de l'ordre de 10^{-9} unité après usage répété du mécanisme (test avec un milliard de répétitions).

Ajout de zones de travail

S'il le souhaite, un utilisateur peut ajouter des zones de travail à celles déjà existantes. Pour ce faire, il doit ajouter un élément dans le fichier *georeferencing-zones.xml* contenu dans le répertoire *config*. Ce fichier contient en effet les zones disponibles pour réaliser le géoréférencement. Le fichier actuel est ainsi le suivant :

```
<georeferencing-zones>
  <zone>Agen</zone>
  <zone>Grenoble</zone>
  <zone>Reims</zone>
  <zone>Saint-Malo</zone>
  <zone>Reims-Sud</zone>
</georeferencing-zones>
```

Pour chaque ajout de zone, deux autres fichiers de paramètres doivent être ajoutés dans le répertoire *config* ; l'un définit les paramètres de la transformation de Helmert liés au géoréférencement direct, le second définit ceux liés au géoréférencement indirect. Ces fichiers sont définis de la façon suivante, les paramètres *a*, *b*, *c* et *d* étant les paramètres relatifs à l'équation [2](#) :

```
<helmert-4-parameters>
  <a>3.6887007424493277</a>
  <b>0.043965128082163574</b>
  <c>447116.8326973846</c>
  <d>6356718.4084592275</d>
</helmert-4-parameters>
```

Enfin, le nom du fichier relatif aux paramètres du géoréférencement direct est défini comme le nom en minuscule de la zone ajoutée dans le fichier *georeferencing-zones.xml* suivi de l'extension *.xml*, celui relatif aux paramètres du géoréférencement inverse est défini comme le nom en minuscule de la zone ajoutée dans le fichier *georeferencing-zones.xml* suivi de *-inverse* puis de l'extension *.xml*.

Pour illustration, si l'utilisateur désire ajouter la possibilité de géoréférencer les données de la feuille Cassini de Paris, il doit ajouter l'élément *<zone>Paris</zone>* dans le fichier *georeferencing-zones.xml* et ajouter les fichiers *paris.xml* et *paris-inverse.xml* dans le répertoire *config* avec les paramètres correspondants.

0.2 Annexes

0.2.1 Annexe A : tableau d'assemblage de la carte de Cassini

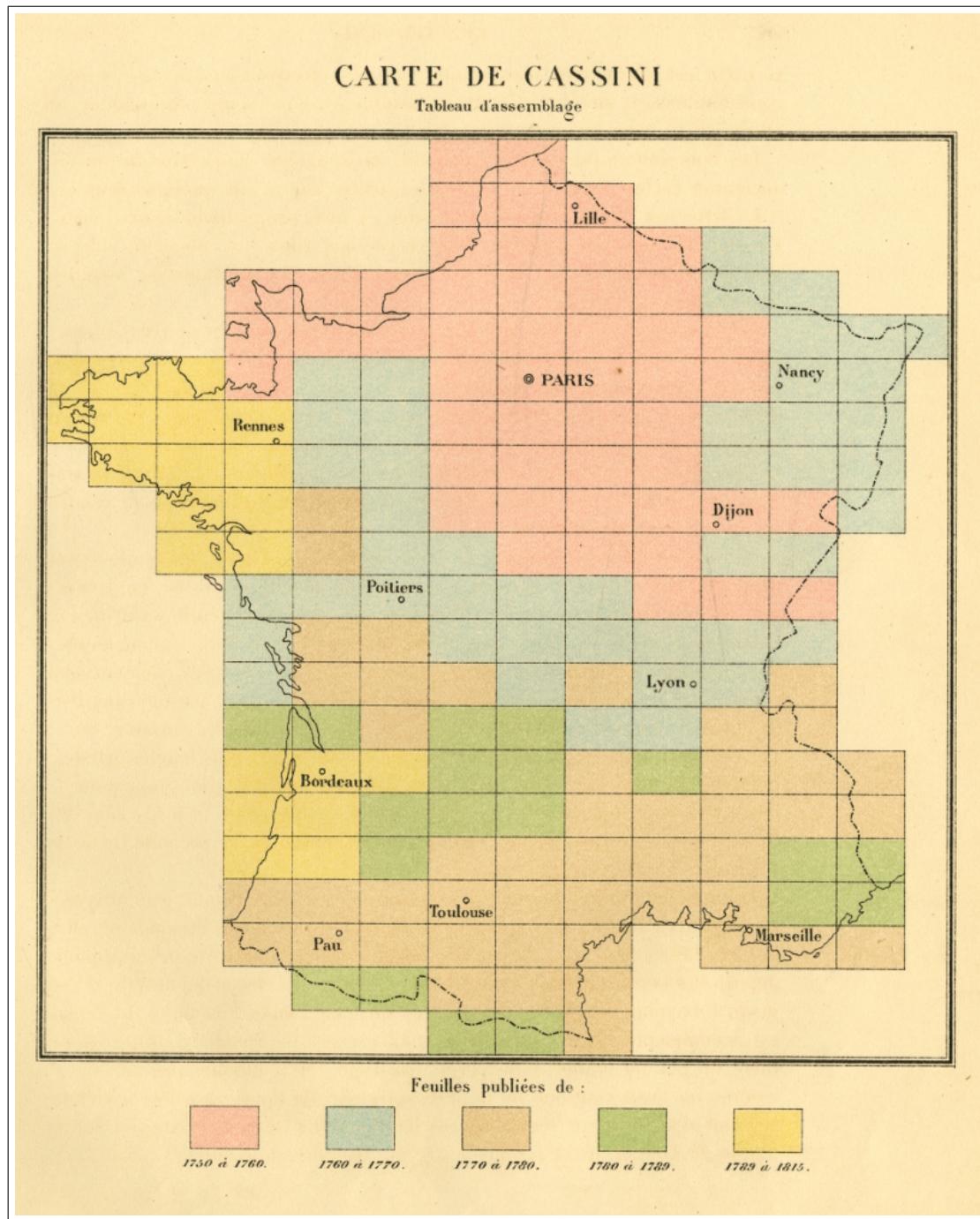


FIGURE 16 – Tableau d'assemblage de la carte de Cassini enrichi des dates de publication.