

CIRCE RHONE : mise en place d'une grille de transformation altimétrique entre les altitudes orthométriques (NGF/Lallemand) et normales (NGF/IGN69)

■ Paul-Henri FAURE - Gilles CANAUD - Alain COULOMB - Pierre LARDEUX

La concession de la Compagnie Nationale du Rhône (CNR) couvre le parcours français du fleuve Rhône. L'ensemble des données géographiques décrivant la concession et l'ensemble des données altimétriques d'exploitation sont référencées dans les systèmes historiques NTF Lambert Zone et NGF/Lallemand (orthométrique). Afin de pouvoir diffuser ses données dans les systèmes légaux, la CNR a commandé au Service de géodésie et nivellement (SGN) de l'Institut de l'information géographique et forestière (IGN) de créer un outil performant de conversion altimétrique pour l'ensemble des services. A partir de ses données historiques, le SGN a développé Circé Rhône, dérivé de Circé France. Ce logiciel permet, via deux grilles de transformation altimétriques spécifiques au Rhône, d'obtenir en tout point de la concession CNR les valeurs de correction entre les altitudes orthométriques, les altitudes normales et les hauteurs ellipsoïdales. La précision de la grille Ortho/Normale est infra centimétrique sur la vallée du Rhône.

MOTS-CLÉS

NGF/LALLEMAND
NGF/IGN69 -CIRCE
Rhône - Grille de
Transformation
altimétrique

Créée en 1933, la Compagnie Nationale du Rhône est concessionnaire de l'exploitation du Rhône et remplit trois missions : la gestion de la navigation, l'irrigation et la production d'électricité.

Le domaine concédé, couvrant de l'ordre de 500 km de fleuve, s'étend de la sortie du Lac Léman à l'écluse de Port-Saint-Louis-du-Rhône. Entre 1948 et 1986, la CNR a modelé le Rhône en réalisant 19 aménagements hydroélectriques (usines et barrages), 14 écluses à grand gabarit et près de 400 km de digues de retenues.

Ce patrimoine est décrit par un ensemble de données géographiques exprimées dans les systèmes historiques : NTF Lambert Zone II et III et NGF/Lallemand (altitudes orthométriques) (cf. *lexique*).

Suite à une expertise réalisée en 2008 sur ses activités de géopositionnement, plusieurs scénarii ont été proposés à la CNR pour la gestion et la production de ses données géographiques dans les systèmes légaux français RGF93 et NGF/IGN9. Sans obligation légale de s'y conformer, la CNR doit, *a minima*, se doter d'outils permettant de fournir ses données dans les systèmes légaux. Le choix de transformer toutes les don-

nées de la CNR (archives, calculateurs de conduite, courbes d'exploitation des retenues, cotes définies dans le cahier des charges, gestion des crues, etc.) n'a pas été retenu face au risque industriel et de sûreté hydraulique.

Les transformations planimétriques des fichiers numériques ne posent pas de difficulté avec les logiciels du marché. Pour l'altimétrie, la CNR s'est attachée à la connaissance fine des valeurs de correction à appliquer sur l'ensemble de la concession afin de disposer d'un outil unique de transformation pour l'ensemble de ses services et prestataires.

Etat des lieux

Depuis 1979, la CNR dispose de trois sources différentes pour la connaissance des corrections entre les altitudes NGF/Lallemand et NGF/IGN69 : les valeurs par feuille au 1/50 000^e, une carte iso-corrections établie en 1979 par l'IGN et dans le cadre de ses modélisations mathématiques, de corrections moyennes calculées par bief.

■ Corrections par feuilles au 1/50 000^e

Les producteurs et utilisateurs de la donnée altimétrique disposent, via

l'IGN, de valeurs de correction moyenne par feuille au 1/50 000^e, arrondies au centimètre (http://geodesie.ign.fr/index.php?page=precision_altitudes).

Celles-ci ont été obtenues à partir des écarts constatés sur cinq points de chaque feuille : un point au centre et quatre points dans les angles. Sur certaines zones géographiques, les écarts entre les valeurs de deux feuilles contigües peuvent atteindre plusieurs centimètres. La grille de conversion fabricable à partir de cet outil est donc assez grossière.

■ Carte iso-corrections

La carte iso-corrections a été établie en 1979 par l'IGN pour le compte de la CNR et de l'Agence de l'eau Rhône-Méditerranée Corse. Etablie au 1/500 000^e, elle couvre l'ensemble du bassin versant de la Saône et du Rhône ainsi que celui de la Corse. Elle représente les corrections par des courbes iso-corrections centimétriques. Cette carte présente l'avantage d'avoir des corrections sensiblement continues mais l'échelle du document ne permet que de connaître approximativement les valeurs en fonction de la position géographique.

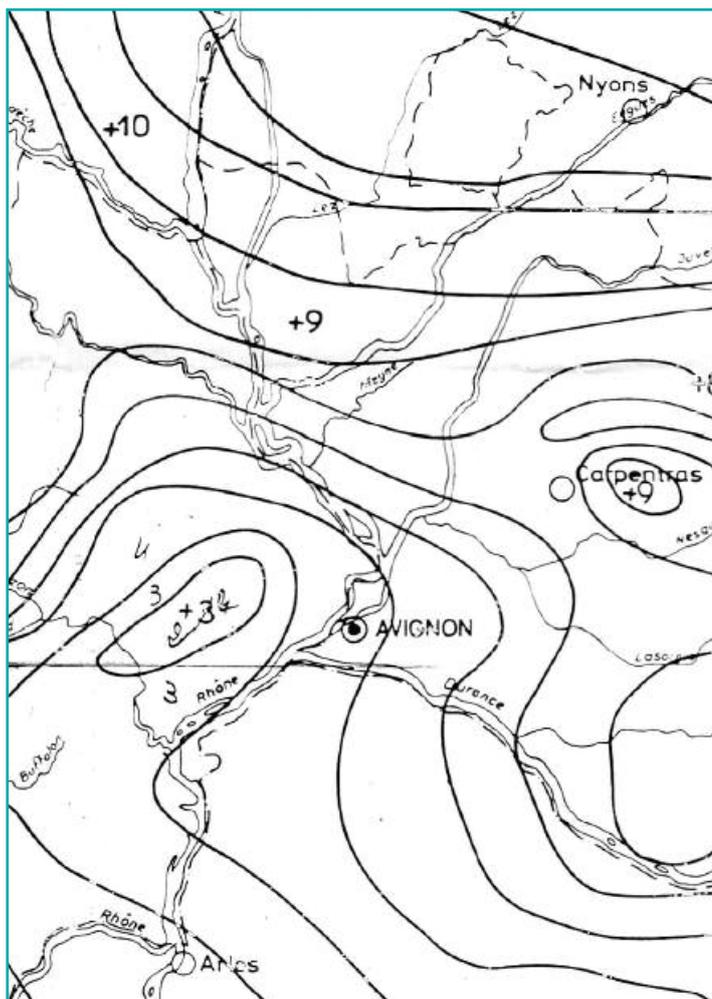


Figure 1. Extrait de la carte iso-corrrection de 1979.

■ Solution retenue

La solution retenue a été d'adapter le logiciel Circé sur la concession CNR en y implémentant deux grilles de conversion spécifiques, le logiciel Circé Rhône ainsi développé étant libre d'utilisation. Le modèle retenu se présente sous la forme de deux grilles (format Circé, extension .mnt) ayant la même emprise de 2.2° en longitude et 3.1° en latitude avec un pas de 0.005°.

La première grille permet le passage entre des altitudes orthométriques NGF-Lallemand et des altitudes normales NGF/IGN69. Cette formulation étant relativement longue, le terme de correction ortho/normale sera utilisé dans la suite de cet article.

La deuxième grille permet le passage direct entre des altitudes orthométriques et des hauteurs au-dessus de l'ellipsoïde IAG-GRS80.

Données

Les données utiles pour la constitution des grilles ont été les coordonnées planes (décamétriques) des repères de nivellement (RN) avec l'altitude orthométrique et l'altitude normale associées.

■ Collecte

L'emprise de la zone de travail a été fournie par la CNR, celle-ci correspondant au majeur du Rhône. La collecte des informations sur les RN a été effectuée dans cette zone, étendue de 1 km. Pour chacun des 6 500 repères de nivellement ayant été implantés dans la zone (y compris pour des repères aujourd'hui détruits), l'écart ortho/normale a été établi. Pour cela, des recherches, quelquefois fastidieuses, ont été effectuées dans des registres de calcul manuscrits de plusieurs types. Pour un repère de nivellement donné, les altitudes orthométriques et normales retenues correspondent à une seule année d'observation, variable d'un repère à l'autre. Par exemple, l'écart ortho/normale n'a pas été établi entre une altitude orthométrique de 1910 et une altitude normale de 1970. En effet cette comparaison aurait pu être faussée par le déplacement éventuel du repère entre 1910 et 1970. 6 500 repères ont été analysés et un écart a

► ■ Corrections moyennes par bief⁽¹⁾

Ces corrections sont appliquées dans le cadre spécifique des modèles hydrauliques mathématiques ou de l'établissement de cartes de navigation. Ce découpage permet de s'affranchir d'effets de marche ou de perte de précision lors de l'application d'une correction sur un bief hydraulique. Pour chaque bief, la valeur est choisie arbitrairement par rapport aux valeurs disponibles sur la carte iso-corrrection.

■ Ecart entre les différentes sources de correction

Les différentes sources disponibles affichent bien évidemment un certain nombre d'écarts plus ou moins importants selon les zones. On constate ainsi des différences de 3 à 4 cm entre les données issues de la carte de 1979 et

(1) Bief : portion de voie navigable située entre deux écluses. Un bief va de l'aval de l'usine amont à l'amont de l'usine aval.

les corrections moyennes par bief. De la même manière, certaines corrections associées aux feuilles au 1/50 000° peuvent différer de 5 cm des corrections de la carte.

Besoins et solution retenue

■ Besoins de la CNR

La CNR est confrontée à deux besoins :

- pouvoir diffuser des données altimétriques rattachées au système légal.
- utiliser des données produites par des prestataires ou partenaires externes à la CNR, référencées en NGF/IGN69.

Pour répondre à ces deux besoins, la compagnie devait se doter d'un outil commun et précis permettant de connaître la correction altimétrique en tout point de sa concession. Elle a donc commandé au SGN de l'IGN, sur sa concession (le Rhône), un modèle de correction permettant de répondre aux deux objectifs précédents.

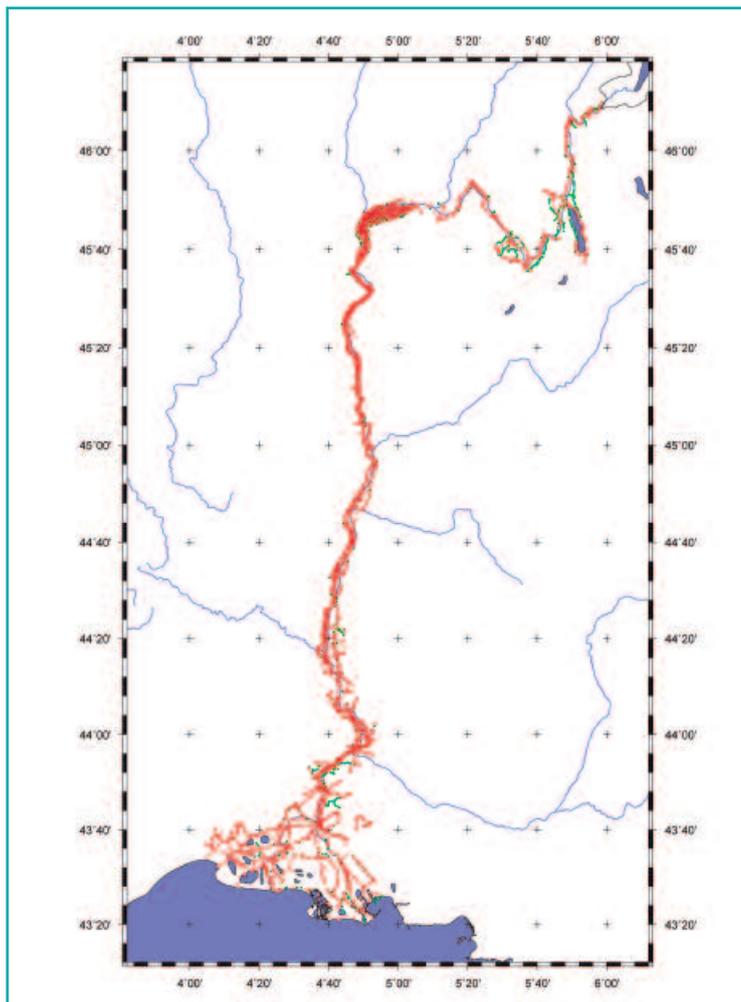


Figure 2.
Carte de répartition

l'altitude normale :

$$C = \text{Alti}_{\text{Normale}} - \text{Alti}_{\text{ortho}}$$

■ Grille de correction ortho/normale

La grille de correction ortho/normale a été calculée à l'aide d'un logiciel interne à l'IGN. Ce dernier utilise un algorithme de krigeage universel incluant une régression linéaire d'ordre 1, ce qui permet d'interpoler une valeur à chaque nœud de la grille.

Une grille de travail élargie a été utilisée pour effectuer les tests et analyses. L'emprise de cette grille est la suivante :

- longitude minimum = 1.84° E
- longitude maximum = 7.76° E
- latitude minimum = 42.8° N
- latitude maximum = 47.28° N

Cette grille de travail a ensuite été redimensionnée à une emprise "raisonnable" par rapport aux coordonnées extrêmes des RN utilisés. Ceci a permis d'éliminer totalement les effets de bord dus au krigeage. L'emprise de la grille finale est donc :

- longitude minimum = 3.9° E
- longitude maximum = 6.1° E
- latitude minimum = 43.2° N
- latitude maximum = 46.3° N

Le pas de la grille est d'environ 550 m.

Les coordonnées mini-maxi en Lambert 93 sont :

- coordonnée X minimum = 720 190 E
 - coordonnée X maximum = 906 488 E
 - coordonnée Y maximum = 2 151 649 N
 - coordonnée Y minimum = 1 800 703 N
- soit une emprise d'environ 170 par 340 km.

■ Grille de conversion altitude orthométrique/hauteur ellipsoïdale

En ce qui concerne la grille de conversion ortho/hauteur, sa constitution peut être résumée en deux grandes étapes :

1. Interpolation dans la grille nationale RAF09 de l'anomalie d'altitude (cf. lexique) pour chaque nœud de la grille ortho/normale.
2. Addition de la correction ortho/normale à l'anomalie d'altitude.

pu être calculé pour environ 5 000 d'entre eux.

■ Validation

La collecte et la saisie des informations étant entièrement manuelles (utilisation de tableaux Excel partagés), il était d'autant plus important de mettre en place un protocole de contrôle et de validation. Dans un premier temps, les fautes ont été éliminées par des tris et des macros Visual Basic dans Excel. Ensuite, grâce à un logiciel interne au SGN, les erreurs moins flagrantes (confusion de colonnes dans les registres, datation douteuse, etc.) ont pu être détectées. Ensuite, en utilisant un algorithme de krigeage (cf. lexique), la valeur en chaque point (RN) a été interpolée en fonction des valeurs de ses voisins et l'écart (résidu) par rapport à la "vraie" valeur a été calculé afin de déterminer si elle présentait un problème.

Les quelques RN qui n'ont pu être corrigés ont été exclus du calcul. Une fois ces corrections effectuées, un jeu de 4 344

points a été considéré comme valide et pouvant servir pour la suite du calcul. La répartition des RN le long du Rhône (cf. figure 2) :

- En vert les 6 500 repères répertoriés
- En rouge les 4 344 repères retenus.

■ Choix

Sur les 4 344 points retenus pour le calcul, un sur cinq (867) a été volontairement écarté afin de servir de point de contrôle et de validation externe à la grille.

Aux 3 477 points de calcul ont été ajoutés 315 points issus des abaquages par feuille au 1/50 000^e, afin d'éviter les effets de bord au niveau des limites de la grille (total 3 792 points).

Processus de mise en place des grilles de correction

■ Définition de la correction ortho/normale

La correction ortho/normale est la différence entre l'altitude orthométrique et

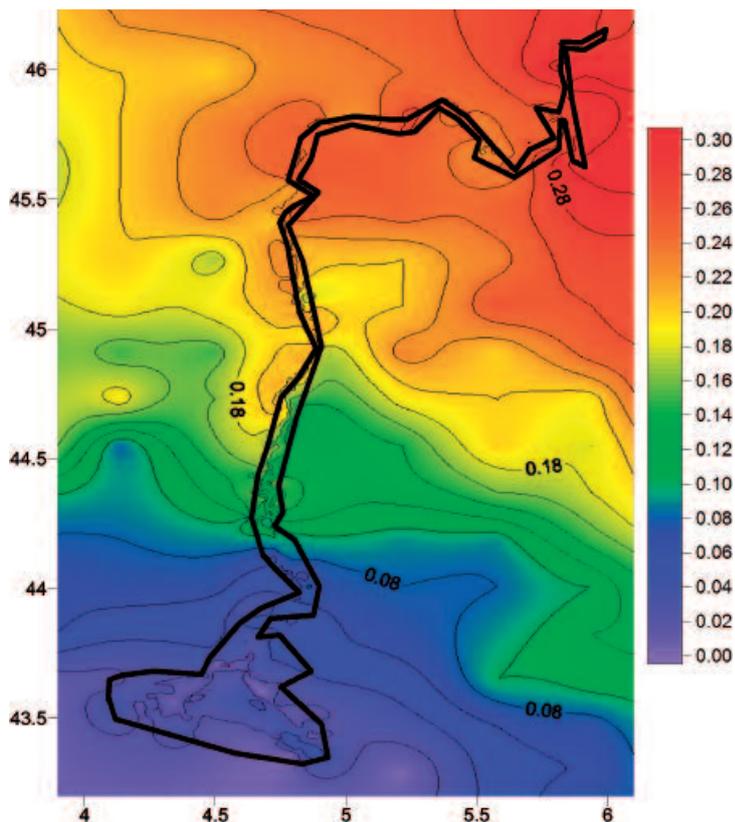


Figure 3. Visualisation de la grille de correction ortho/normale (gONRhône11) avec la zone (simplifiée) d'extraction des RN. Les valeurs sont exprimées en mètre. L'espacement des courbes est de 0,02 m.

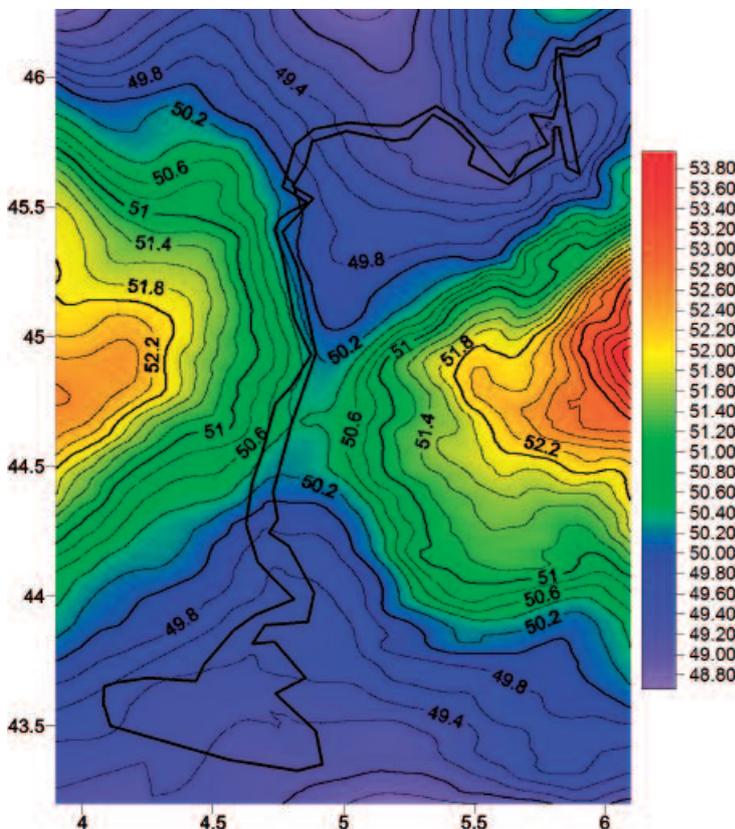


Figure 4. Visualisation de la grille de correction ortho/hauteur (gOHeRhône11) avec la zone (simplifiée) d'extraction des RN. Les valeurs sont exprimées en mètre. L'espacement des courbes est de 0,02 m.

La grille ortho/hauteur a la même emprise et le même pas que la grille ortho/normale.

■ Calculs des résidus et analyse de la grille

Calcul des résidus

Sur les 4 344 points retenus pour le calcul, un sur cinq (867) a été écarté afin de servir de point de contrôle et de validation de la grille. Ces points ont été interpolés dans la grille de travail et la valeur de cette interpolation a été comparée à la valeur réelle de la correction ortho/normale au niveau du point afin d'en calculer le résidu. Cette procédure a aussi été appliquée sur les points de calcul.

Après analyse fine des résidus sur cette grille, sa précision globale a été estimée comme étant infracentimétrique (0,5 à 1 cm) à 2σ (95 % des résultats). Ci-dessous un tableau récapitulatif :

Pour la grille ortho/hauteur ellipsoïdale, la précision tient compte de celle du RAF09 (centimétrique), et donc elle est centimétrique (1 à 5 cm).

La précision infracentimétrique est localisée dans un rayon d'environ 5 km (9 fois le pas de la grille) autour des points de calcul et de contrôle. En dehors de ce "buffer", la précision est centimétrique car l'information provient principalement des abaques.

Analyse de la forme de la grille

Cette analyse a porté sur la géométrie et les dimensions des mailles de la grille. Pour mémoire, la grille de travail servant de référence a un pas de $0,005^\circ$ aussi bien en longitude qu'en latitude. Ce pas a été choisi car il correspond à environ un point par maille de grille (tout du moins dans la direction nord-sud). Pour donner un ordre de grandeur, à la latitude moyenne du chantier, $0,005^\circ$ correspond à environ 550 m et cette distance est, à peu de chose près, l'espacement de deux RN consécutifs sur le terrain.

Les tests ont principalement consisté à faire varier la taille du pas et à observer le comportement des résidus sur les points de contrôle. Ci-dessous les différents tests menés :

- un pas plus grand ($0,01^\circ$) où il y a plusieurs RN par mailles ;

Résidus	Point de contrôle (867) – Contrôle externe	Point de calcul (3477) – Contrôle interne
entre -0,5 et 0,5 cm	772 (89,04 %)	3330 (95,77 %)
entre -1,0 et 1,0 cm	839 (96,77 %)	3441 (98,96 %)
Minimum	- 3,3 cm	- 2,7 cm
Maximum	1,8 cm	1,8 cm
Ecart-type	0,4 cm	0,2 cm

Figure 5. Carte de répartition des codes de précision de la grille ortho/normale.



- un pas plus petit (0,0025°) où un RN influence plusieurs mailles ;
- un pas différent en longitude et en latitude (0,005° x 0,007°) pour tenir compte de la forme globale du chantier.

Les deux premiers tests détérioraient les résidus aussi bien sur les points de contrôle que sur les points de calcul. Le dernier test n'améliorait pas significativement les résultats donc, pour des raisons de simplicité, les mailles carrées de 0,005° par 0,005° ont été conservées.

CIRCE RHONE

■ Conditions de diffusion et d'utilisation

La mise en place du logiciel CIRCE Rhône étant le fruit d'une commande spécifique de la CNR auprès de l'IGN, l'utilisation et la diffusion des grilles élaborées sont soumises à l'approbation des services de la Compagnie nationale du Rhône. Celle-ci n'a cependant pas volonté, de part sa structure et sa vocation, de restreindre l'utilisation de cet

outil. L'IGN pourra donc diffuser Circé Rhône via son site de téléchargement ou dans le cadre de demandes spécifiques. En interne CNR, l'utilisation de cet outil est préconisé dès que des transformations sont à appliquer sur de la donnée venant de partenaires extérieurs ou dès que des informations sont à diffuser vers l'externe.

Lors de passation de marchés de prestations topographiques, Circé Rhône est fourni par CNR au prestataire retenu afin que celui-ci puisse effectuer une double livraison dans le système NGF/IGN69 et dans le système NGF/Lallemand.

■ Fonctions et limites géographiques

Circé Rhône est une adaptation de Circé France orientée en particulier vers les conversions d'altitudes. Il reprend la plupart des mécanismes du Circé France et est en outre paramétré pour lire les différentes grilles de conversions permettant de passer d'une composante verticale à une autre.



Figure 6. Fenêtre d'accueil de Circé Rhône.

Circé Rhône convertit des coordonnées géographiques, cartographiques ou verticales d'un système de coordonnées dans un autre. Il permet l'accès aux systèmes RGF93 et NTF et aux références d'altitudes NGF/IGN69 et NGF/IGN78 (Corse) et NGF/Lallemand (CNR) Circé Rhône propose des conversions au moyen :

- de grilles de transformation de coordonnées fournissant les paramètres TX, TY, TZ entre le système légal RGF93 et l'ancien système NTF. La précision de ces paramètres est estimée à quelques centimètres entre les deux systèmes ;
- de grilles de conversion d'altitudes, présentées précédemment.

Circé Rhône permet donc de réaliser la majeure partie des transformations de coordonnées sur la zone rhodanienne française. Il traite, entre autres, les coordonnées planes dans les projections Lambert93, UTM fuseaux 31 et 32, les nouvelles projections "Coniques Conformés Zones 43 à 46", les coordonnées planes Lambert (II et III) de la NTF, les coordonnées géographiques et les transformations entre les systèmes RGF93 et NTF.

Les limites d'utilisation optimale de la fonction de conversion altimétrique sont par évidence celles représentées sur la figure 4.

■ Utilisation

Circé Rhône s'utilise exactement de la même manière que Circé France. La seule différence réside dans le choix de la conversion altimétrique souhaitée via un menu.

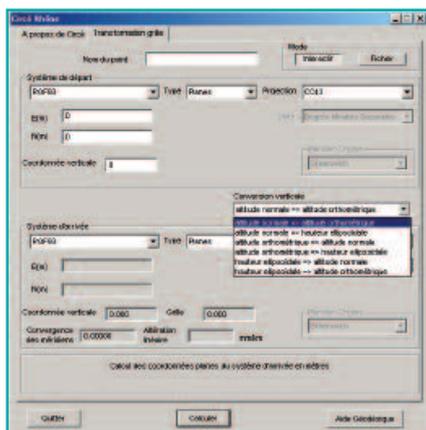


Figure 7. Fenêtre de saisie de Circé Rhône

Conclusion

Après six mois d'exploitation des archives, de saisie et de validation, le logiciel CIRCE Rhône a vu le jour fin 2011. Celui-ci permet via l'interface de Circé France de convertir des altitudes orthométriques en altitudes normales. Circé Rhône convertit des coordonnées géographiques, cartographiques ou verticales d'un système de coordonnées dans un autre et permet l'accès aux systèmes RGF93 et NTF. L'ensemble des conversions altimétriques s'appuyant sur deux grilles au format "Circé" :

- une grille de correction ortho/normale au pas de $0,005^\circ \times 0,005^\circ$ avec une précision infra-centimétrique dans la zone utile ;
- une grille de conversion ortho/hauteur au même pas avec une précision centimétrique sur son ensemble.

L'outil mis à disposition des services de la CNR et de ses prestataires, répond pleinement aux objectifs fixés en début de projet, à savoir : disposer d'un outil capable de transformer les altitudes orthométriques en altitudes normales de manière fiable, précise, facile et unique.

Pour la CNR, la suite de ce projet sera déclinée par l'intégration des grilles dans différents outils opérationnels de modélisation hydraulique, SIG ou dans les systèmes GPS des équipes topographiques et bathymétriques. D'ores et déjà, la CNR possède une version "Leica" de la grille Ortho-He pour l'utiliser dans ces GPS. Il reste cependant à valider son utilisation opérationnelle sur l'ensemble de la concession. ●

Lexique

Altitude orthométrique : altitude obtenue en divisant la cote géopotentielle d'un point par la valeur moyenne de la pesanteur réelle entre le géoïde et le point considéré, comptée le long de la ligne de force du champ de pesanteur. L'altitude orthométrique d'un point s'interprète comme la longueur de la ligne de force reliant ce point au géoïde. La surface de référence des altitudes orthométriques est donc, en théorie, le géoïde. Mais comme la variation de l'intensité de la pesanteur à l'intérieur de la croûte terrestre n'est pas mesurable en pratique, on la modélise et les altitudes orthométriques ne peuvent pas être exactement calculées.

Altitude normale : altitude obtenue en divisant la cote géopotentielle d'un point par la valeur moyenne de la pesanteur normale à mi-altitude, comptée le long de la ligne de force du champ normal du point considéré. La surface de référence théorique des altitudes normales est la quasi-géoïde. Contrairement aux altitudes orthométriques, les altitudes normales se calculent sans aucune hypothèse sur les variations de la pesanteur à l'intérieur de la croûte terrestre.

Anomalie d'altitude : différence entre la hauteur ellipsoïdale et l'altitude.

Krigeage : méthode d'interpolation permettant de calculer la valeur d'une variable en tout point, à partir de valeurs connues et irrégulièrement réparties dans l'espace. Elle repose sur l'hypothèse que la variable à interpoler est intermédiaire entre une variable véritablement aléatoire et une variable totalement déterministe en ce sens qu'elle varie continûment d'un endroit à l'autre, les points proches ayant un certain degré de corrélation spatiale, et les points éloignés étant statistiquement indépendants. L'estimation des coefficients d'interpolation utilise la connaissance a priori de l'espérance et de la variance de la donnée.

RAF09 : grille de conversion permettant de passer, sur le territoire continental (la grille spécifique RAC09 existe pour la Corse), des hauteurs ellipsoïdales (notées h) aux altitudes (notées H). Cette grille a été déduite du modèle de

quasi-géoïde français QGF98 et de points GPS nivelés.

Contacts

Paul-Henri FAURE

p.faure@cnr.tm.fr

Ingénieur Mesures Compagnie Nationale du Rhône Direction du Patrimoine Fluvial et Industriel Direction Déléguée de l'Exploitation - Centre d'Analyse Comportementale des Ouvrages Hydrauliques.

Gilles CANAUD

gilles.canaud@ign.fr

Alain COULOMB

alain.coulomb@ign.fr

Pierre LARDEUX

pierre.lardeux@ign.fr

Service de géodésie et nivellement de Contribution collective de ses départements d'Information Géodésique, des Réseaux Matérialisés de Géodésie et Nivellement, et des Produits & Développements de l'IGN

ABSTRACT

The concession of the Compagnie Nationale du Rhône (CNR) covers the French route of the River Rhone. The set of geographic data describing this concession and the altimetric data used for the River exploitation are both referenced in two historical systems: the NTF Lambert Zone system and the orthometric system NGF Lallemand. To be able to relay these data in the French legal systems, the CNR called upon the Geodesy and Levelling process Service (SGN), a special department of the National Institute of the Geographic and Forest Information (IGN), to develop an efficient and reliable altimetric conversion tool to be used by all services of the CNR.

With its historical data, the SGN developed the software "Circé Rhône", which is derived from the software "Circé France". With its two altimetric transformation grids that are specific to the River Rhone, this software enables us to obtain the correction values between the orthometric height, the normal height and the ellipsoid height anywhere in the concession. The ortho-normal grid has an infracentimetric precision in the Rhone valley.