

# Rapport de Synthèse de la Phase III – Étude de la configuration du réseau géodésique modernisé

MODERNISATION DES INFRASTRUCTURES GEODESIQUES DANS LE CADRE DU PROJET CADASTRE ET SECURISATION FONCIERE (PROCASEF) | ETUDE DE FAISABILITE

184453\_REP04\_01\_01 | 16 février 2022

Pour Commentaire Client

**Projet Cadastre et Sécurisation Foncière**

REPUBLIQUE DU SENEGAL

Un Peuple - Un But - Une Foi



# Contrôle Documentaire

## Information Documentaire

|                    |  |
|--------------------|--|
| Titre Projet       | MODERNISATION DES INFRASTRUCTURES GEODESIQUES DANS LE CADRE DU PROJET CADASTRE ET SECURISATION FONCIERE (PROCASEF) |
| Titre Document     | Rapport de Synthèse de la Phase III – Étude de la configuration du réseau géodésique modernisé                     |
| N° Projet          | 184453   |
| N° Document        | 184453_REP04_01  |
| Révision           | 1  |
| Statut             | Pour Commentaire Client  |
| Fugro Legal Entity | FUGRO GEOID  |
| Adresse            | 115 avenue de la Capelado 34160 Castries - France  |

## Information Client

|                |   |
|----------------|---|
| Client         | Projet Cadastre et Sécurisation Foncière  |
| Adresse Client | Ministère des Finances et du Budget, 5, Avenue Carde x rue René NDIAYE, Immeuble Peytavin Porte A, 1er étage à gauche République du Sénégal |
| Contact Client | Le Secrétaire exécutif : M. Mor DIOUF   |
| N° Marché      | C1436/21-DK   |

## Historique des Révisions

| Issue | Date       | Statut | Commentaire             | Préparé par | Approuvé par |
|-------|------------|--------|-------------------------|-------------|--------------|
| 01    | 16/02/2022 | PCC    | Pour Commentaire Client | DD/HM/JLC   | JF           |

## Equipe Projet

| Initiales | Nom              | Fonction  | Rôle sur le projet   |
|-----------|------------------|---|--|
| JLC       | Jean-Louis CARME | Expert en géodésie  | Chef de mission  |
| JF        | Julien FRAU      | Ingénieur géomètre topographe hydrographe                 | Chef de projet administratif et financier  |
| OG        | Olivier GROULT   | Ingénieur géomètre topographe hydrographe géodésien       | Ingénieur d'étude (scenarios et configuration de l'infrastructure géodésique modernisée) |
| DD        | Diogoye DIOUF    | Ingénieur géomètre topographe géodésien                   | Ingénieur de reconnaissance terrain  |
| HM        | Hamza MAZIH      | Ingénieur hydrographe océanographe géophysicien géodésien | Ingénieur d'étude (scenarios et configuration de l'infrastructure géodésique modernisée) |

## Table des matières

|  |            |
|--|------------|
| <b>Contrôle Documentaire</b>   | <b>ii</b>  |
| Information Documentaire   | ii         |
| Information Client   | ii         |
| Historique des Révisions   | ii         |
| Equipe Projet  | ii         |
| <b>Table des matières</b>  | <b>iii</b> |
| <b>Tables des figures</b>  | <b>iv</b>  |
| <b>Tables des Tableaux</b>   | <b>v</b>   |
| <b>Acronymes et abréviations</b>   | <b>vi</b>  |
| <b>1. Introduction</b>   | <b>1</b>   |
| 1.1 Mission  | 1          |
| 1.2 Phase 3  | 1          |
| <b>2. Spécifications techniques et meilleures pratiques pour la mise en œuvre des opérations de modernisation de l'infrastructure géodésique</b> | <b>2</b>   |
| 2.1 Mise en place du réseau de CORS  | 2          |
| 2.1.1 Étape 1 : Évaluation et validation du système : Centre de Contrôle du Réseau et première CORS  | 2          |
| 2.1.2 Étape 2 : Mise en place de toutes les CORS et calcul du réseau   | 4          |
| 2.1.3 Étape 3 : Exploitation et maintenance du réseau  | 5          |
| 2.2 Communication et transmission de données   | 6          |
| 2.2.1 Connexions entre les CORS et le Centre de Contrôle du Réseau   | 6          |
| 2.2.2 Connexion entre le Centre de Contrôle du Réseau et les utilisateurs GNSS   | 9          |
| 2.2.3 Robustesse du réseau de CORS   | 10         |
| 2.3 Contrôle d'intégrité du réseau de CORS   | 11         |
| 2.3.1 Surveillance en temps réel   | 12         |
| 2.3.2 Surveillance en post-traitement  | 13         |
| 2.3.3 Gestion du réseau et système d'alarmes   | 14         |
| <b>3. Maintenance du réseau des CORS</b>   | <b>15</b>  |
| 3.1 Financement de la maintenance du réseau de stations GNSS permanentes   | 15         |
| 3.2 Formation  | 16         |
| 3.2.1 Formation à destination du commanditaire du projet et de l'organisme responsable du réseau   | 17         |
| 3.2.2 Formation à destination des utilisateurs du réseau   | 17         |
| 3.3 Autres coûts de maintenance à prendre en compte  | 18         |

|  |           |
|--|-----------|
| <b>4. Méthodologies envisageables pour déterminer les algorithmes de transformation depuis les référentiels géodésiques historiques vers le référentiel géodésique en vigueur ou son successeur éventuel</b> | <b>19</b> |
| 4.1 Introduction : de la nécessité de disposer de transformations géodésiques  | 19        |
| 4.2 Transformations géodésiques envisageables  | 20        |
| 4.2.1 Les différents types de transformations géodésiques existants  | 20        |
| 4.2.2 Approche recommandée   | 21        |
| 4.3 Référentiels géodésiques historiques concernés   | 24        |
| 4.4 Référentiel géodésique en vigueur  | 25        |
| 4.5 Étude des différents modèles de transformation envisageables   | 26        |
| 4.5.1 Modèles de transformation simples  | 26        |
| 4.5.2 Grilles de transformations (combinaison de translations ou très rarement de similitudes spatiales)   | 29        |
| 4.5.3 Transformations géodésiques (translations ou similitudes spatiales) avec changement d'époque de référence  | 30        |
| 4.5.4 Contexte des référentiels historiques identifiés   | 31        |
| <b>5. Système de modélisation de la base de données géoréférencée normalisée</b>   | <b>34</b> |
| 5.1 Analyse de l'existant  | 34        |
| 5.2 Structuration de la base de données  | 34        |
| 5.2.1 Introduction   | 34        |
| 5.2.2 Codification des noms de points  | 36        |
| 5.2.3 Schéma conceptuel de la base donnée.   | 39        |
| 5.2.4 Tables attributaires   | 40        |
| 5.2.5 Liste de valeurs des tables attributaires des réseaux géodésiques et de nivellement  | 55        |
| 5.2.6 Requêtes   | 57        |
| 5.3 Préconisation pour l'affichage en ligne  | 60        |
| 5.3.1 Introduction   | 60        |
| 5.3.2 Serveur de fiches géodésiques et de portail d'accès aux CORS   | 60        |
| 5.3.3 Solutions existantes de SIG pour cartographie en ligne   | 63        |
| <b>6. Conclusion</b>   | <b>65</b> |
| <b>7. Annexes : exemple de log sheet de CORS (Source IGN)</b>  | <b>67</b> |

## Tables des figures

|   |    |
|---|----|
| Figure 5.1: Diagnostic des fiches signalétiques des points de densification du cadastre (Bureau des études du cadastre, 2016)                                 | 36 |
| Figure 5.2: Modèle conceptuel de la base de données géographiques   | 39 |
| Figure 5.3: Processus de requêtes   | 59 |
| Figure 5.4: Exemple de portail cartographique pour la visualisation et interrogation d'un serveur de fiche d'un réseau géodésique et nivellement (IGN France) | 60 |

|  |    |
|--|----|
| Figure 5.5: Exemple de portail cartographique pour la fourniture de données brutes CORS (IGN France) | 61 |
| Figure 5.6: Fiche de station CORS (IGN France)   | 62 |
| Figure 5.7: Outil d'accès aux données brutes CORS (IGN France)                                       | 62 |

## Tables des Tableaux

|  |    |
|--|----|
| Table 5.1: Classification des stations GNSS permanentes  | 37 |
| Table 5.2 : Liste descriptive des champs de la table des points appartenant à un réseau CORS                         | 40 |
| Table 5.3 : Liste descriptive des champs de la table des points appartenant à un réseau géodésique                   | 45 |
| Table 5.4: Liste descriptive des champs de la table des points appartenant à un réseau de nivellement                | 48 |
| Table 5.5: Liste descriptive des champs d'un réseau géodésique   | 51 |
| Table 5.6: Liste descriptive des champs de la table pour définir un référentiel vertical                             | 52 |
| Table 5.7: Liste descriptive des champs de la table descriptive d'un fichier RINEX                                   | 53 |
| Table 5.8: Liste descriptive des champs de la table descriptive d'une fiche d'intervenant                            | 54 |
| Table 5.9: Liste des réseaux du Référentiel géodésique RRS04 (réalisation particulière de l'ITRF2000 Époque 2004.56) | 55 |
| Table 5.10: Liste des réseaux des autres référentiels géodésiques  | 56 |
| Table 5.11: Liste des gestionnaires du RGPS  | 56 |
| Table 5.12: Liste des réseaux du Référentiel altimétrique NGA043   | 56 |

## Acronymes et abréviations

|          |  |
|----------|--|
| ANAT     | Agence nationale pour l'Aménagement du territoire                                |
| ASECNA   | Agence pour la sécurité de la navigation aérienne en Afrique et à Madagascar     |
| CORS     | Continuous Operating Reference Stations  |
| DGNSS    | Differential Global Navigation Satellite System                                  |
| IGS      | International GNSS Service   |
| ITRF     | International Terrestrial Reference Frame  |
| ITRS     | International Terrestrial Reference System                                       |
| GNSS     | Global Navigation Satellite System   |
| ISO      | International Organization for Standardization                                   |
| PEP      | Plan d'Exécution Projet  |
| PROCASEF | Projet Cadastre et Sécurisation Foncière   |
| ITRS     | Receiver Independent Exchange format   |
| RRS04    | Réseau de Référence du Sénégal 2004  |
| SINEX    | Solution INdependent Exchange format   |
| SPEBTPS  | Syndicat Professionnel des Entrepreneurs de Bâtiments Travaux Publics du Sénégal |
| SSE      | Santé, Sécurité et Environnement   |

---

# 1. Introduction

## 1.1 Mission

La mission objet du présent contrat consiste en l'étude de faisabilité de la modernisation des infrastructures géodésiques prévue dans le cadre du Projet Cadastre et Sécurisation Foncière (PROCASEF).

L'objectif principal de la mission est d'évaluer la qualité du référentiel géospatial au Sénégal, d'en dégager les éléments significatifs, de recommander les solutions technologiques et stratégies de mise à niveau les plus pertinentes, de façon à permettre à l'ANAT (Agence nationale pour l'Aménagement du territoire) et à la Direction du Cadastre de disposer d'une infrastructure géodésique de référence performante – réseau intégré de stations GNSS permanentes, de points géodésiques matérialisés, et d'une base de données géographiques liée à un géo-portail en libre accès –, une telle infrastructure étant indispensable pour garantir l'intégrité géospatiale des travaux de positionnement et de géoréférencement au Sénégal, qu'ils soient effectués au moyen de récepteurs GNSS ou d'instruments topographiques traditionnels.

## 1.2 Phase 3

La phase 3 de l'étude de faisabilité, objet de ce rapport, correspond à l'étude de la mise en place, de la gestion et de la maintenance du réseau géodésique modernisé et de la base de données géographiques associée, ainsi qu'à l'étude des transformations géodésiques envisageables pour convertir les coordonnées des points géodésiques depuis les référentiels historiques vers le référentiel en vigueur. Cette phase découle directement des résultats des Phases 1 et 2, de l'état de l'art des bases de données géographiques, de la gestion et la maintenance des CORS, et des méthodes de détermination et d'application de transformation géodésiques.

Les objectifs spécifiques de cette phase étaient les suivants :

- Système de modélisation de la base de données géoréférencée normalisée, dont le modèle de base de données géodésiques proposé.
- Description des solutions techniques permettant de définir un algorithme de transformation des systèmes locaux existants vers le système de référence national en vigueur (RRS04 jusqu'ici).
- Documentation précise sur les modalités de maintenance des stations.
- Cahier de charges pour la mise en œuvre des opérations de modernisation et d'amélioration de l'infrastructure géodésique nationale.

---

## 2. Spécifications techniques et meilleures pratiques pour la mise en œuvre des opérations de modernisation de l'infrastructure géodésique

### 2.1 Mise en place du réseau de CORS

#### 2.1.1 Étape 1 : Évaluation et validation du système : Centre de Contrôle du Réseau et première CORS

Cette étape consiste, d'une part, en une revue des sites de mise en place du Centre de Contrôle du Réseau et des différentes CORS, et d'autre part, en l'évaluation des procédures et la réalisation de tests de bon fonctionnement et de performance à l'issue de la mise en place du Centre de Contrôle du Réseau et d'une première station GNSS permanente (CORS) à Dakar.

Durant cette première étape, le prestataire en charge de l'installation du réseau proposera d'abord au PROCASEF les sites d'implantation des différentes CORS avec leurs descriptifs complets : matérialisation des points géodésiques, installation des antennes GNSS, localisation des autres équipements (dont les récepteurs GNSS), schémas d'alimentation électrique, de protection et de communication de données de la station GNSS permanente et du Centre de Contrôle du Réseau.

Le prestataire est tenu d'avoir effectué une reconnaissance approfondie des sites de mise en place du Centre de Contrôle du Réseau et de chacune des CORS. Entre autres vérifications (cf. rapport de Phase 2), rappelons que cette reconnaissance doit permettre de vérifier l'absence d'interférences sur les sites choisis suffisamment en amont. En cas de fortes interférences (et autres perturbations), il est nécessaire de prévoir un site alternatif. Si les perturbations demeurent à un niveau acceptable, il est possible d'utiliser des antennes avec module de mitigation des interférences. Ces modules permettent, à travers des techniques de filtrage, d'atténuer les interférences et restaurer le signal GNSS avec une qualité suffisante pour le fonctionnement normale de la CORS. La plupart des récepteurs GNSS récents ont désormais la possibilité d'analyser le spectre de fréquences le long de la bande L, de détecter les interférences et de les atténuer. La possibilité d'activer les filtres à distance, via une interface web par exemple, permet d'assurer une grande réactivité et ainsi atténuer les interférences sporadiques dès leur détection.

Les emplacements définitifs du centre et de cette première CORS, à l'instar des autres CORS du réseau, seront définis en concertation avec PROCASEF en tenant compte des différentes contraintes techniques et administratives.

Pour valider le choix du site d'implantation de la première CORS, il est recommandé qu'une session d'observation GNSS soit enregistrée sur le site prévu avant l'installation complète et définitive de la CORS, afin de valider la qualité de données attendues. L'antenne doit être

placée suffisamment près de la station afin d'éviter d'avoir à utiliser un câble coaxial d'antenne trop long, sujet de possibles pertes de signal excédant les capacités du préamplificateur intégré à l'antenne.

En ce qui concerne la configuration du système en post-traitement, la validation consiste pour l'utilisateur chargé du test à enregistrer une série de sessions d'observations en modes statique et cinématique post traité (PPK) avec une station GNSS mobile mise en place sur plusieurs points géodésiques connus (par exemple, trois) situés à des distances permettant la résolution des ambiguïtés entières, dont l'une non loin de la distance maximale théorique de mise en œuvre du mode PPK. Un minimum de 72 heures d'observations GNSS à 1Hz avec un masque d'élévation fixé à 0° est recommandé. Toutes les observables brutes doivent être enregistrées (vérifier que le récepteur ne lisse pas les observations de code – pseudo-distances).

S'agissant de la configuration du système en mode temps réel RTK, la validation consiste pour l'utilisateur chargé du test à effectuer une série d'observations en modes temps réel RTK et simultanément PPK avec une station GNSS mobile mise en place sur et entre plusieurs points géodésiques connus, situé à différentes distances dans la zone de couverture RTK (dont l'une non loin de la limite de couverture théorique RTK). Il est recommandé d'effectuer plusieurs série d'observations GNSS à différentes heures de la journée (matin, journée, soirée) avec lors de chaque série une réinitialisation systématique des ambiguïtés entières (par exemple en éteignant et rallumant le récepteur GNSS). Lors de ces séries de mesures, toutes les configurations disponibles de communication (NTRIP et radio UHF<sup>1</sup>) doivent être testées.

Cette étape permettra donc de tester le service complet (Centre de Contrôle du Réseau, première CORS utilisée en modes temps réel RTK et post-traité), à l'exclusion du mode temps réel en réseau (NRTK) : solution RTK à différentes distances, sur point connu et trajectoire mobile, solution post-traitée en modes statique, stop and go et PPK, génération des fichiers de données brutes au format RINEX, sauvegarde des données, gestion du réseau.

Une analyse des données acquises, avec un logiciel d'évaluation de la qualité GNSS approprié, est requise pour évaluer la réception du signal et les paramètres de qualité sur toutes les fréquences et observables. L'analyse recommandée comprend :

- Multi-trajet par rapport à l'élévation.
- Rapport entre les observations enregistrées et les observations disponibles.
- Le nombre, l'altitude et la durée des événements de perte de cycle.
- Variation du signal sur bruit (SNR) avec l'élévation du satellite.
- Identification de l'existence de biais systématiques.

---

<sup>1</sup> Ultra-High Frequency

## 2.1.2 Étape 2 : Mise en place de toutes les CORS et calcul du réseau

À l'issue de l'étape de validation, le prestataire en charge de la mise en place du réseau déploiera l'ensemble des stations GNSS permanentes.

Ce déploiement ne pourra intervenir qu'après accord du PROCASEF, obtenu après la fourniture du rapport de reconnaissance démontrant que le site sélectionné satisfait à l'ensemble des conditions requises, en particulier l'analyse des interférences (réseaux de télécommunication) et autres perturbations (transformateurs électriques...).

Après l'installation de chacune des stations, un test de fonctionnement complet sera réalisé afin de valider la station (analyse du ratio signal sur bruit, simulation de coupure d'alimentation, communication avec le Centre de Contrôle du Réseau, fonctionnement avec les différents modes de transmission prévus (NTRIP et radio UHF), solution RTK à différentes distances, solution NRTK dès lors qu'un tel sous-réseau de CORS a été mis en place – trois (3) CORS a minima –, génération des fichiers RINEX pour utilisation en modes statique et cinématique post-traité, gestion des données...).

La session d'enregistrement des données GNSS des CORS qui va permettre la détermination de leurs coordonnées ne doit commencer qu'un fois l'ensemble des CORS mises en place et validées, afin de permettre un calcul complet en réseau avec la meilleure géométrie d'acquisition possible. Il est recommandé que cette session d'enregistrement soit la plus longue possible, et dans tous les cas excède trois semaines, de sorte que l'influence d'un épisode météorologique exceptionnel n'affecte pas leur précision (période prolongée de scintillement ionosphérique, succession de dépressions etc.).

Enfin, il est fortement recommandé, au moment de la réobservation de tout ou partie (sous-réseau stratégique) des réseaux de 1<sup>er</sup> et 2<sup>ème</sup> ordres (RRS1 et RRS2) dans le cadre des opérations de réhabilitation et de maintenance du réseau géodésique, d'intégrer dans le calcul des sessions d'observations toutes les CORS existantes. **Il est donc nécessaire de prévoir un phasage des opération de telle sorte que la mise en place du réseau de CORS soit terminée au moment de la réobservation du réseau géodésique passif.**

Les calculs nécessaires à la détermination des coordonnées des CORS du réseau doivent d'abord être réalisés dans la dernière réalisation de l'ITRS (ITRF2014 ou ITRF2020 si cette réalisation a été publiée au moment des mesures) à l'époque moyenne ou finale des mesures (2022.NN, valeur fonction de la date réelle de mise en service du réseau de CORS), puis selon le choix de conserver le référentiel RRS04 ou de définir un nouveau référentiel RRS22, de transformer ces coordonnées en ITRF2000 à l'Époque 2004.56, au moyen d'un ou de plusieurs modèles de mouvement de plaque et de la position moyenne du réseau d'après les coordonnées établies en 2004.

L'ensemble du réseau sera ensuite validé (fonctionnement du système principal, des solutions de secours, vérification de précision en regard des incertitudes attendues pour les différents modes et configurations d'utilisation) au moyen de la réobservation par l'équipe en charge

de la validation d'un sous-réseau de points connus judicieusement répartis sur le territoire en fonction de la géométrie du réseau.

La validation du mode NRTK peut intervenir dès lors qu'un nombre minimal de CORS a été mis en place dans une région donnée. Dans le cas d'un réseau hybride constitué de CORS publiques et privées, il faut noter que la solution NRTK sera conditionnée par le récepteur GNSS le moins performant du réseau. Typiquement, si l'un des récepteur GNSS ne peut recevoir que les constellations GPS et GLONASS, alors la solution NRTK aura la même limitation. Cette limitation n'est vraiment contraignante que dans les zones comportant de nombreux masques vis-à-vis des signaux GNSS (végétation importante...).

### 2.1.3 Étape 3 : Exploitation et maintenance du réseau

Le réseau de CORS représentant un investissement substantiel, il ne doit être conçu que pour une exploitation à long terme. Par conséquent, le prestataire en charge de la mise en place du réseau doit proposer des solutions concrètes afin de garantir le bon fonctionnement du réseau dans le temps. Le plan de maintenance du réseau doit donc être partie intégrante de la solution proposée.

Ici, le PROCASEF devra faire un choix important et stratégique en matière d'exploitation et de maintenance du réseau. Deux solutions sont possibles, la gestion en interne du réseau, ou son externalisation. Les avantages et inconvénients de ces deux solutions sont décrits ci-après.

Il faut noter que, dans nombre de pays, le réseau de CORS a vu son utilisation peu à peu décroître jusqu'à n'être plus utilisé autrement qu'à la marge, au fur et à mesure de l'augmentation du nombre de CORS non opérationnelles du fait de trop nombreuses pannes, conjuguée à une réactivité insuffisante du gestionnaire du réseau pour les résoudre. Une telle situation, extrêmement regrettable, résulte toujours de l'absence d'un plan de pérennisation du financement de la maintenance du réseau en amont de sa mise en place.

#### 2.1.3.1 Gestion en interne du réseau

##### Avantages

- Ne pas complètement dépendre d'un prestataire extérieur qui gère l'ensemble du système ;
- Garder la maîtrise du budget de maintenance (si les abonnements des utilisateurs couvrent bien les frais de maintenance).

##### Inconvénients

Les contraintes (opérationnelles, techniques, financières) peuvent varier au cours du temps, ce qui constitue autant d'impondérables :

- Formation du personnel en charge avec les risques correspondants de départ (et besoin de remplacement) ;
- Maintenance des équipements (stations, serveur) ;
- Pleine responsabilité de la qualité des données et de la qualité du service (assurance et contrôle de qualité, continuité du service) ;
- Pleine responsabilité du budget de maintenance même si les abonnements utilisateurs ne couvrent pas les frais de maintenance.

### 2.1.3.2 Gestion externe du réseau

#### Avantages

La responsabilité du système repose sur le prestataire (assurance et contrôle de qualité des données, continuité du service) ;

Le budget est alloué et défini par marché au prestataire qui propose un modèle économique réaliste qui peut intégrer plusieurs options :

- Gestion des équipements sur site par des partenaires locaux ou non (rythme d'intervention à définir sur chaque station par exemple) ;
- Hébergement à distance ou non des données ;
- Financement privé ou partenariat public-privé.

#### Inconvénients

Le système est dépendant du prestataire qui doit par conséquent avoir prouvé d'une part son expérience en la matière et d'autre part sa solvabilité au moins à moyen terme.

## 2.2 Communication et transmission de données

### 2.2.1 Connexions entre les CORS et le Centre de Contrôle du Réseau

Les CORS du réseau transmettent leurs données d'observation GNSS brutes au Centre de Contrôle du Réseau (CCR, *Network Control Centre* ou NCC en anglais) en temps réel, généralement à une cadence de 1 Hz.

Le CCR peut alors, selon la configuration, soit transmettre ces données (données GNSS brutes d'une CORS en particulier, en mode RTK) à l'utilisateur équipé d'un récepteur GNSS mobile,

soit déterminer une solution réseau à partir des données de plusieurs CORS (les différents modes NRTK) et transmettre ces données de synthèse à l'utilisateur GNSS.

Il existe plusieurs méthodes pour transmettre les données GNSS brutes des CORS au CCR avec une faible latence :

- Unidirectionnel

Chacune des CORS peut simplement transmettre les données d'observation GNSS (trame RTCM) au CCR, permettant ainsi à celui-ci, soit de les transmettre aux utilisateurs GNSS (mode RTK), soit de calculer une solution réseau (VRS/PRS, MRS/FKP, MAC/MAX) et de la transmettre aux utilisateurs GNSS (modes NRTK), soit de générer des fichiers statiques horaires ou/et journaliers et de les mettre à disposition des utilisateurs GNSS pour leurs post-traitements. Cette connexion unidirectionnelle n'autorise pas le contrôle, la configuration et le paramétrage des CORS à distance. En revanche elle permet d'assurer une plus grande protection des CORS.

- Bidirectionnel

Il est cependant plus habituel d'utiliser une communication bidirectionnelle, qui permet le contrôle, la configuration et le paramétrage des CORS à distance, depuis le CCR, et pas seulement la transmission des données GNSS depuis les CORS (trame RTCM). La plupart des récepteurs récents équipant les CORS disposent d'interfaces internet pour effectuer le paramétrage et les opérations de gestion à distance. Même si la plupart de ces récepteurs sont équipés d'un filtrage intégré pour les connexions entrantes, il est recommandé de sécuriser la connexion au serveur du CCR au moyen de réglages supplémentaires (filtrage, pare-feu).

- Internet

Le transport en réseau des trames RTCM via le protocole Internet (*Networked Transport of RTCM via Internet Protocol*, NTRIP) est particulièrement commode pour diffuser des données GNSS brutes à haute fréquence (flux RTK et a fortiori NRTK). Le NTRIP, compatible HTTP, permet un accès authentifié pour la transmission et la réception de flux de données tout en limitant le nombre d'adresses Internet impliquées, facilitant ainsi la gestion de la sécurité du système.

Compte tenu de sa flexibilité (on peut facilement ajouter des CORS supplémentaires dans le réseau), il est donc recommandé d'utiliser une telle connexion IP (*Internet Protocol*). Généralement, la connexion est établie à travers un réseau plus large, un intranet ou l'Internet public. Les observations GNSS brutes représentent un flux de données d'environ 500 octets par seconde. Cela ne représente pas un débit important, toutefois la latence du réseau reste l'élément critique. En mode NRTK en particulier, pour que le logiciel de calcul de la solution NRTK installé au RCR assure la synchronisation des données issues de plusieurs CORS, la latence de transmission d'une station au CCR doit être inférieure à 1 seconde.

Les modes de connexion à faible latence incluent :

- Les réseaux étendus (*Wide Area Networks, WAN*), comme internet ou les intranets des organisations multisites, peuvent offrir une faible latence, mais aussi subir des défaillances liés à l'utilisation d'un seul point d'accès ou à la saturation de la bande passante en cas de partage du réseau avec d'autres utilisateurs.
- Les réseaux de lignes fixes par câble en cuivre (ADSL ou VDSL) ou fibre optique, fonctionnent assez bien en termes de latence et de fiabilité. Les contrôles de sécurité peuvent être limités à ceux disponibles sur les récepteurs GNSS, mais pour des raisons de sécurité, l'utilisation d'une connexion unidirectionnelle peut alors être préférable.
- Les réseaux mobiles (sans fil/cellulaire) GSM à haut débit sont caractérisés par une qualité et une couverture très variable et qui évolue rapidement. Il est donc nécessaire d'évaluer précisément la qualité des réseaux disponibles pour chacune des CORS.
- Les liaisons satellitaires se sont largement améliorées, mais restent toujours exposées à un risque de latences plus élevées et surtout entraînent des frais plus importants. Leur qualité varie selon l'installation au sol et le prestataire. Cependant, dans les zones reculées ou les zones dans lesquelles les réseaux mobiles ne sont pas suffisamment fiables, l'utilisation d'une liaison satellitaire peut être la seule option réellement fonctionnelle.
- Les liaisons radio, sont généralement utilisées comme le dernier lien entre la station et la source IP la plus proche. Même si elles sont parfois appelées « les radios du dernier kilomètre », dans nombre de cas de figure – en particulier en zone rurale –, leur portée peut être étendue à quelques dizaines de kilomètres (~30 km), avec une configuration adéquate (puissance d'émission, type d'antenne et hauteur d'antenne appropriés). Ceux-ci peuvent envoyer des données en série ou Ethernet. Il existe des cas où une paire radio peut être utilisée à de telles fins jusqu'à 30km. Bien qu'il existe des solutions utilisant des fréquence radio sur un large bande, il peut y avoir des problèmes de sécurité et d'interférence, voir des fréquences sous licence.

La communication entre les CORS et le CCR est un élément clé du système. Les solutions techniques disponibles sont, dans l'ordre des débits disponibles et de la stabilité : 1- le réseau de fibres optiques, 2- le réseau par câble cuivré (DSL), 3- les réseaux GSM de téléphonie mobile, et 4- les solutions de transferts de données par liaison satellitaire. Les liaisons radio ne sont pas utilisées comme une méthode à part entière mais plutôt comme la partie terminale de la connexion dans les cas de figure les plus défavorables. Comme la plupart des périodes de non-disponibilité du service de positionnement précis RTK, et plus encore NRTK, sont dues à des dysfonctionnements de cette communication entre les CORS et le CCR, il est recommandé, d'une part de s'appuyer autant que faire se peut sur le réseau par fibre optique ou le réseau par câble cuivré (DSL), et d'autre part, lorsque l'infrastructure

de communication est insuffisamment stable, de doubler le flux de connexion entre les CORS et le Centre de Contrôle du réseau.

## 2.2.2 Connexion entre le Centre de Contrôle du Réseau et les utilisateurs GNSS

Vis-à-vis de l'utilisateur GNSS, le Centre de Contrôle du Réseau (CCR) d'un réseau de CORS effectue trois tâches principales : générer des fichiers de données brutes au format RINEX et les stocker – auquel cas l'utilisateur peut les télécharger à des fins de post-traitement –, calculer une solution réseau (NRTK) et diffuser le flux correspondant en temps réel à l'utilisateur GNSS, ou relayer le flux d'observations GNSS d'un sous-ensemble de CORS en temps réel à l'utilisateur GNSS. Dans les deux derniers cas, l'utilisateur GNSS mobile effectue le calcul de la solution NRTK ou RTK ou NRTK.

Le flux des données GNSS brutes (mode RTK) ou calculées (NRTK) est le plus souvent diffusé depuis le CCR via une connexion de type IP (*Internet Protocol*). À l'instar des communications entre les CORS et le RCR, les communications par IP entre le RCR (ou directement depuis les CORS lorsque la configuration le permet) et les utilisateurs GNSS peuvent s'appuyer sur différents types d'infrastructure de communication : la mise en place d'une liaison radio dédiée, (ii) l'utilisation d'un réseau mobile GSM<sup>2</sup> haut débit (iii) une combinaison des deux méthodes quand la couverture du réseau téléphonique est insuffisante, ou (iv) l'abonnement à un service de communication par satellite.

Concernant l'utilisation d'un réseau téléphonique mobile, il faut noter que, suivant la technologie du réseau en question (2G/GSM, 2.5G/GPRS, 2.75G/EDGE, 3G/UMTS, 3G+/HSDPA, 3GH+/HSPA+, 4G/LTE Advanced, et à l'avenir 5G) donc des débits disponibles, et selon le nombre d'utilisateurs qui partagent le réseau et de leur type d'utilisation, la connexion au RCR via IP peut être plus ou moins opérationnelle pour un positionnement précis RTK ou NRTK, en particulier pendant les périodes d'affluence (nombreuses utilisations simultanément).

Les utilisateurs GNSS peuvent récupérer le flux de données GNSS brutes (mode RTK) ou réseau (modes NRTK) via :

- Un modem et antenne GSM permettant de recevoir les trames RTCM SC 104 bidirectionnelles NTRIP (10.1) diffusées par internet par le RCR : Comme décrit dans le paragraphe précédent, NTRIP est un protocole particulièrement commode pour accéder aux données GNSS brutes issues d'un sous-ensemble de CORS ou aux données de synthèse (VRS/PRS, MRS/PKP ou MAC/MAX) une fois la connexion internet établie, partout où une connexion Internet ou des sources mobiles d'IP sont disponibles.

<sup>2</sup> Global System for Mobile Communications

- Un modem et antenne radio UHF dédié (ou intégré au récepteur GNSS) permettant de recevoir les trames RTCM SC 104 unidirectionnelles (2.3) ou bidirectionnelles (3.1, 3.2 ou 3.3) diffusées par radio (ou par radio combinée avec un pont internet à travers un serveur de relais) par le RCR : Les utilisateurs peuvent utiliser des radios mobiles pour recueillir les données issues du RCR dès lors la zone d'intérêt est équipée d'un nombre suffisant de radios, dans la limite de distance à la plus proche CORS (mode RTK) ou du réseau de CORS (modes NRTK) permettant la résolution des ambiguïtés entières de la solution. L'utilisation d'une liaison radio doit tenir compte des limitations de licence d'utilisation de plages de fréquences particulières, de la présence d'éventuelles interférences ou de l'incompatibilités avec certains types de récepteurs mobiles.
- Un modem et antenne satellitaire : cette option est cependant nettement plus chère. À l'instar des modes PPP et PPP-IAR temps réel, il est peu probable que le volume d'activité nécessitant un positionnement précis par GNSS temps réel justifie cette option dans les zones concernées, donc situées en dehors de la zone de couverture radio UHF de la CORS la plus proche et ne disposant pas d'un réseau de téléphone mobile GSM haut débit suffisant. Dans ce cas, il est plus probable que les géomètres établissent des triplets de points d'appui en mode GNSS post-traité, puis soit effectuent leurs travaux topographiques par tachéométrie au moyen d'une station totale, soit mettent en place leur propre station de base RTK.

En pratique, alors que dans les zones largement couvertes par le réseau de CORS, dans lesquelles les réseaux mobiles GSM haut débit seront aussi souvent les plus fiables (dimensionnement prévu pour une bande passante suffisamment grande compte tenu du nombre important d'utilisateurs), le positionnement GNSS précis en temps réel (RTK et NRTK) devrait pouvoir fonctionner exclusivement par internet, dans les zones isolées avec des CORS plus espacées, le positionnement pourra plus sûrement s'appuyer sur la combinaison d'un réseau téléphonique mobile et d'une liaison radio UHF.

## 2.2.3 Robustesse du réseau de CORS

### 2.2.3.1 Centre de Contrôle du Réseau (CCR)

Compte tenu du rôle stratégique du CCR, il est essentiel que la configuration mise en place puisse pallier les défaillances éventuelles de l'un des éléments-clés qui le constituent.

Ainsi, il est recommandé de prévoir un CCR miroir dont les serveurs peuvent être installés sur le même site (solution a minima) ou, bien mieux, à un emplacement physique différent de celui du CCR principal.

Une telle redondance permet non seulement d'augmenter largement la fiabilité du système en permettant de maintenir un service pleinement opérationnel en cas de défaillance du CCR principal mais aussi de permettre d'assurer une redondance indispensable du stockage et de

l'archivage des données, indispensables pour toutes les applications en post-traitement, qu'il s'agisse de levés topographiques ou de calculs scientifiques.

Même si le besoin d'effectuer des interventions sur site n'est jamais exclu, les deux CCR (principal et miroir) peuvent faire l'objet d'une gestion en parallèle (au moyen d'un paramétrage approprié et d'une stratégie adéquate de synchronisation) et d'une maintenance à distance par le même personnel.

### 2.2.3.2 Liaison entre les CORS et le CCR

Les pannes affectant des CORS sont beaucoup moins fréquentes que les problèmes de communication entre les CORS et le CCR. Aussi est-il recommandé d'établir a minima deux flux de connexion (voire plus pour les CORS situées dans des zones dans lesquelles l'infrastructure de communication n'est pas fiable) depuis chacune des CORS vers le CCR. Contrairement aux apparences, cette option est en fait la moins coûteuse pour assurer la continuité du service de positionnement précis (RTK ou NRTK) dans les cas relativement fréquents où les communications sont interrompues – donc les données sont perdues, du moins pour les applications temps réel pour lesquelles une faible latence est requise – pour une ou plusieurs CORS. En effet, l'alternative à cette solution consiste à augmenter le nombre de CORS dans toutes les zones, ce qui est beaucoup plus coûteux.

La meilleure communication redondante repose sur l'utilisation d'au moins deux modes complémentaires (Internet – ou WAN dédié – et DSL par exemple), ce qui permet par exemple de diviser le flux de données GNSS pour alimenter à la fois le CCR principal et un CCR miroir. Ainsi, une station permanente du réseau peut avoir quatre connexions discrètes ou plus (deux vers le CCR principal et deux vers un CRC miroir).

La conception initiale du réseau doit donc mobiliser des personnels experts en (i) informatique réseau, (ii) communications de données, et (iii) informatique métier connaissant parfaitement tous les paramètres du logiciel de gestion du réseau de CORS (personnel du constructeur des CORS).

## 2.3 Contrôle d'intégrité du réseau de CORS

La valeur d'un réseau de CORS réside dans sa capacité à fournir en temps réel des données de levé et positionnement précis (RTK et NRTK) fiables et cohérentes. Pour produire un tel service, l'intégrité et la fiabilité de la position de chacune des stations par rapport aux autres doivent être vérifiées et garanties pendant toute la période d'utilisation.

Même si le plus grand soin a été apporté au choix des sites puis à la configuration de chacune des CORS, les stations du réseau ne sont pas complètement à l'abri des risques de perturbation du signal GNSS, voire d'un possible mouvement de l'antenne GNSS – soudain

ou progressif –, que ce soit à cause d'un phénomène naturel (tassement du bâtiment support, épisode météorologique extrême, séisme, mouvement de terrain etc.) ou à l'activité humaine (mouvement du bâtiment support dû à des travaux proches, *jamming*, *spoofing*, etc.). Pour garantir l'intégrité du positionnement précis, il est donc recommandé d'intégrer dans la configuration une solution de monitoring – ou auscultation – des CORS. Cette surveillance peut être effectuée au moyen de deux composantes :

- Une surveillance en temps réel pour détecter instantanément tout déplacement de l'antenne GNSS ou perturbation du signal GNSS, et générer une alarme.
- Une surveillance à moyen terme pour évaluer la déformation du réseau des stations au cours du temps, afin de mettre à jour les coordonnées des stations, le cas échéant.

La surveillance en temps réel permet de prévenir les erreurs grossières de positionnement en cas d'anomalie soudaine (dégradations volontaires, déplacement soudain du support, perturbations GNSS sévère). La surveillance à moyen terme permet de tenir compte des déformations à long terme de l'écorce terrestre (mouvement de failles, pompage de la nappe phréatique etc.).

### 2.3.1 Surveillance en temps réel

Plusieurs solutions temps réel existent pour surveiller l'intégrité des données GNSS recueillies sur les CORS ainsi que la stabilité des stations. La méthode la plus simple – et la plus courante – repose sur l'utilisation du RTK. Elle consiste à calculer la position de la station en mode RTK et de la comparer à sa position théorique.

Cela nécessite de diffuser des données GNSS en temps réel de chaque CORS vers le Centre de Contrôle du Réseau, ou, alternativement de diffuser les données GNSS des CORS situées dans une zone donnée vers une CORS de cette zone agissant comme un utilisateur GNSS mobile. L'initialisation puis le calcul de la position RTK peuvent être réalisés au niveau de la CORS contrôlée ou du CCR, ce qui est préférable pour déterminer plusieurs solutions RTK à partir de différentes CORS simultanément.

La vérification de toutes les CORS sélectionnées s'effectue en configurant pour chacune d'entre elles un sous-ensemble de surveillance constitué des stations environnantes les plus proches, chacune à son tour vérifiée par rapport aux CORS partagées entre chaque sous-réseau. Des seuils d'alarme peuvent être définis pour avertir les opérateurs.

Cette méthode fonctionne bien si les lignes de base sont relativement courtes (quelques dizaines de kilomètres). Cependant, le streaming de données GNSS en temps réel nécessite une voie de communication permanente à faible latence et grande fiabilité, ce qui, selon le type de communication en question, peut générer des frais de communication à ne pas négliger.

Dans le cas de distances inter-CORS un peu longues, une alternative serait de mettre en place un calcul PPK en quasi-temps réel – ou léger temps différé –, qui permettrait de valider l'intégrité des données GNSS et la stabilité des stations sans attendre le calcul de validation périodique effectué dans le cadre de la maintenance du réseau, dans le cas où ce calcul serait effectué peu souvent (intervalle annuel ou pluriannuel et non pas hebdomadaire, par exemple).

Une autre alternative peut être l'utilisation d'un service de positionnement PPP ou PPP-IAR temps réel avec réception des corrections PPP (orbites, horloges, modèles) à travers une liaison satellitaire en bande L. Du fait de la couverture régionale de la solution, cette alternative permettrait une surveillance sans contrainte de localisation des CORS. Cependant, cette solution nécessite, d'une part, que le service ait été mis en place pour le Sénégal – ce qui, selon les opérateurs, peut représenter un coût substantiel –, et d'autre part, de souscrire à un abonnement au service – d'où un coût récurrent. En outre, la méthodologie PPP ne permet pas d'atteindre le même niveau de précision que ses homologues RTK et PPK, donc elle est moins appropriée à une utilisation en monitoring –auscultation.

### 2.3.2 Surveillance en post-traitement

Le post-traitement de données GNSS des CORS à intervalle régulier permet d'assurer une surveillance à moyen et long terme. Un logiciel de calcul des positions des stations GNSS permanentes peut également fournir des résultats de contrôle de qualité sous forme de statistiques et de graphiques permettant :

- D'évaluer la répétabilité de la solution (coordonnées et vitesses) sur les différentes CORS, par exemple pour les 90 derniers jours par rapport à la position actuelle publiée (corrigée de l'effet de la vitesse publiée). Ces tracés peuvent être mis à jour quotidiennement.
- De mettre en évidence les erreurs résiduelles à chaque calcul par rapport aux coordonnées théoriques déterminées à l'origine.

Le post-traitement peut être automatisé pour fournir des résultats à une fréquence prédéfinie (hebdomadaire, mensuelle, etc.). Plusieurs suites logicielles de gestion de CORS prévoient le stockage automatisé de fichiers statiques, et certaines fournissent des outils de post-traitement automatisés à des fins de surveillance, des tâches prédéfinies de traitement de base, de production de rapports, et peuvent intégrer des options de pondération ou d'ajustement des données.

Il existe également un certain nombre de logiciels tiers de post-traitement (commerciaux ou *open-source*) qui peuvent être configurés pour s'exécuter automatiquement avec des fichiers statiques régulièrement exportés.

Cependant, il est important de noter que ces logiciels – intégrés dans certaines suites de gestion des CORS ou tiers commerciaux ou open-source – sont adaptés à une surveillance en première approximation du réseau de CORS mais pas à son auscultation et à la détermination à intervalle régulier de coordonnées précises, qui elles nécessitent de mettre en œuvre une méthode de traitement spécifique (logiciel et méthodologie scientifiques).

### 2.3.3 Gestion du réseau et système d’alarmes

#### 2.3.3.1 Gestion du réseau

Les fournisseurs consultés dans le cadre de cette étude de faisabilité (Topcon, Trimble, Leica, Teria, CHCNAV et Stonex) proposent tous des solutions logicielles de gestion de réseaux de CORS. Ces solutions permettent de surveiller en continu les stations du réseau, générer et enregistrer des fichiers GNSS horaires ou journaliers au format RINEX et les stocker, calculer les solutions réseau (plus-proche, FKP/MRS, VRS/PRS ou MAC/MAX) et les diffuser dans un des format standards RTCM SC104 (*Radio Technical Commission for Maritime Services, Special Committee 104*), en vérifiant l'intégralité (observables GNSS) et la qualité des données (rapport signal sur bruit etc.), et en estimant les ambiguïtés de la phase en temps réel et les erreurs des mesures de phase et de code, à partir des coordonnées connues des stations.

Pour le post-traitement, les données GNSS peuvent être mises à disposition en ligne au format RINEX à une cadence de 1, 5, ou 30 secondes. Ces données peuvent être stockées sur le serveur du centre et mis à disposition des utilisateurs en téléchargement dès lors qu'ils en font la requête.

Les métadonnées de chaque station doivent être disponibles dans un *station log* qui doit décrire au minimum les équipements de la station (types et modèles d'antenne et de récepteur), la hauteur d'antenne, les interventions effectuées au cours du temps (changement de matériel ou de support...), la description du point et sa position approximative, l'organisme propriétaire et l'opérateur de la station.

#### 2.3.3.2 Systèmes d'alarme et de notification

La plupart des suites logicielles de gestion de réseau de CORS permettent la configuration de nombreux états d'alarme (par exemple, stations en panne, seuils de qualité, services hors ligne) et peuvent être fournies par des alertes sur le site internet du réseau, des e-mails, des SMS et d'autres méthodes automatisées. Les opérateurs peuvent ainsi se connecter au système à travers des interfaces internet sécurisées ou connexions VPN<sup>3</sup>. Un système d'alarme à distance est recommandé pour surveiller le bon fonctionnement du réseau et pour optimiser la réactivité en cas de défaillance.

---

<sup>3</sup> Virtual Private Network

## 3. Maintenance du réseau des CORS

### 3.1 Financement de la maintenance du réseau de stations GNSS permanentes

Le coût et l'organisation de la maintenance du réseau de CORS est une problématique majeure qui déterminera la durée de vie de ce réseau.

La mise en place d'un réseau GNSS permanent national sur le territoire du Sénégal est de nature à encourager de nombreux acteurs économiques utilisateurs ou non de technologie GNSS à acquérir des matériels supplémentaires, en particulier des radios ou même des récepteurs GNSS qui soient compatibles avec une utilisation en NTRIP (RTK ou NRTK).

Comme l'utilisation de CORS non seulement facilite les travaux de positionnement précis mais permet d'en améliorer la qualité, il peut être intéressant de proposer aux utilisateurs un abonnement à prix réduit, et ainsi encourager l'utilisation de GNSS à partir de CORS à grande échelle. Ainsi, s'agissant de la composante publique du réseau national de CORS (public ou mixte public-privé), il n'est pas forcément nécessaire de faire contribuer les utilisateurs au-delà du coût de gestion (qui incluent les coûts de fonctionnement du CCR et des CORS ainsi que les coûts de transmission de données liées à l'utilisation des réseaux de communication existants) et de maintenance du réseau (coûts de réparation et de mise à jour), le coût de sa mise en place étant quant à lui déjà pris en charge par l'État du Sénégal en tant que projet structurant pour le pays.

Un tel modèle de financement est plus facile à mettre en œuvre si l'exploitation et la maintenance de cette composante publique sont prise en charge par un organisme public tel que l'ANAT-DTGC mais peut aussi être appliqué si la gestion du réseau est sous-traitée à un prestataire privé. Dans tous les cas, il est nécessaire de mettre au point un mécanisme qui tienne compte de l'utilisation combinée de CORS publiques et privées par les mêmes utilisateurs, selon leur zone d'intervention.

Compte tenu des volumes de données échangés, le gestionnaire du réseau de CORS – qu'il soit public ou privé – a fortement intérêt à négocier des tarifs de transmission de données adaptés avec les différents fournisseurs de téléphonie mobile et Internet, a fortiori si la configuration retenue intègre une composante satellitaire entre certaines CORS et le CCR.

À titre d'information, un réseau national de ce type, Teria (en France), demande un abonnement inférieur à 50 € par mois par récepteur, pour un total d'environ 5 000 abonnés ; un tel montant permettant la maintenance du réseau (réparations et mises à jour). La décision de mise à disposition gratuite du service de positionnement précis (et donc de prise en charge totale de la maintenance si le gestionnaire du réseau est public) ou payante (et donc de la prise en charge partielle ou totale de la maintenance par les utilisateurs eux-mêmes) devra être prise par le PROCASEF en concertation avec les utilisateurs et les

organismes partenaires du projet. Un équilibre devra être trouvé, de manière collégiale, afin de permettre au plus grand nombre d'accéder au réseau, tout en garantissant sa pérennité.

Il est recommandé de considérer le réseau de CORS comme une infrastructure nationale d'intérêt public au même titre que les réseaux de communication. En tant que tel, il doit être entretenu de la même manière que les autres infrastructures nationales, la question de la prise en charge du financement de cet entretien (par l'État ou par JE me demandes utilisateurs en totalité ou en partie) étant ouverte.

## 3.2 Formation

Plusieurs types de formations peuvent être envisagées dans le cadre de la mise en œuvre des opérations de modernisation de l'infrastructure géodésique.

- Une formation de présentation du réseau à destination du commanditaire du projet (PROCASEF) et de l'organisme partenaire qui sera responsable du réseau (ANAT-DTGC a priori).
  - Cette formation peut être approfondie dans le cas où cet organisme responsable du réseau (ANAT-DTGC a priori) aurait effectivement la charge de sa gestion (exploitation et maintenance) qui ne serait donc pas sous-traitée à une société tierce.
- Une formation des utilisateurs potentiels du réseau (personnels techniques de l'ANAT-DTGC, des Services du Cadastre, des géomètres de l'ONGES, des personnels des bureaux de topographie et sociétés disposants de département de topographie etc.) destinée à (i) appréhender correctement toutes les utilisations possibles du réseau de CORS, et (ii) entraîner ces utilisateurs à l'utilisation optimale d'un tel réseau hybride actif et passif.
  - Cette formation des utilisateurs peut intégrer un module optionnel consacré aux applications complexes.

Cette proposition de formations correspond aux résultats de l'étude des besoins en formation qui ont été identifiés au cours de l'étude de faisabilité, en particulier lors de nos échanges avec les différentes parties prenantes du projet ainsi qu'avec les interlocuteurs que nous avons rencontrés au cours des différentes phases. En particulier, les différents protagonistes ont mis l'accent sur le besoin d'une formation de base à l'utilisation du réseau de CORS et d'une formation avancée sur les transformations et contrôles de qualité inhérente à cette utilisation.

### 3.2.1 Formation à destination du commanditaire du projet et de l'organisme responsable du réseau

Il s'agit de la formation qui sera dispensée sur le site du CCR (et de la CORS la plus proche (qui peut être colocalisée avec le CCR) par le prestataire en charge de l'installation du réseau de CORS et de sa mise en service.

La formation portera sur la matérialisation des stations (points géodésiques de référence) , l'installation des équipements et matériels, la réalisation des tests de bon fonctionnement, de performance et de qualité, l'installation des logiciels, l'utilisation des logiciels, le contrôle et la surveillance du réseau de CORS, ainsi que la manière d'effectuer des inspections de routine et la maintenance du système.

Cette formation concerne peut en premier lieu le personnel clé de l'organisme responsable du réseau (ANAT-DTGC a priori), susceptible par la suite de transmettre les connaissances et savoir-faire acquis pendant les formations aux autres parties prenantes intéressées. L'ANAT a exprimé sa volonté de prendre en charge ces formations en les intégrant dans son plan de développement.

Les prestataires Teria, ComNav, Leica, Topcon et Stonex ont estimé le coût d'une telle formation. Les prix s'échelonnent de 1 800 à 26 000 euros sur la base de durées allant de 3 à 5 jours.

Dans le cas où l'organisme responsable du réseau aurait effectivement la charge de sa gestion (exploitation et maintenance), il serait recommandé d'intégrer un module d'approfondissement permettant aux personnels formés d'être ensuite suffisamment autonomes.

### 3.2.2 Formation à destination des utilisateurs du réseau

Cette formation étant destinée à étudier l'ensemble des applications possibles d'un réseau géodésique hybride composé d'un réseau de stations GNSS permanentes et de bornes géodésiques et repères de nivellement passifs, elle est préférablement dispensée par une institution ou une société experte du domaine, en particulier les établissements d'enseignement supérieur ou les entreprises spécialisées en géodésie.

Le programme de cette formation devrait contenir :

- L'étude de toutes les utilisations possibles du réseau de CORS : RTK, NRTK, statique, statique rapide, Stop-and-go, PPK, ainsi que les incertitudes et risques associés.
- L'utilisation optimale d'un réseau hybride actif (CORS) et passif (bornes géodésiques et repères de nivellement), ce qui comprend :
  1. la préparation des opérations.

2. La mise en place de canevas d'appui complémentaires lorsque nécessaire (par exemple, triplets).
3. L'acquisition de données au moyen de récepteurs GNSS.
4. L'utilisation combinée de récepteurs GNSS et stations totales.
5. L'utilisation combinée de récepteurs GNSS et niveaux.
6. Le post-traitement (modes statique, statique rapide, stop-and-go, PPK).
7. Les transformations géodésiques (changement de référentiel, changement de réalisations ITRS et d'époques de référence).
8. Les contrôle de qualité.
9. La documentation.

Dans le cas où l'organisme responsable du réseau (ANAT6DTGC a priori) prévoirait également de prendre en charge des applications supplémentaires (calcul périodique des coordonnées des stations permanentes et bornes géodésiques du réseau, développement d'une solution de calcul en ligne etc.), il serait recommandé d'intégrer un module d'approfondissement en géodésie.

### 3.3 Autres coûts de maintenance à prendre en compte

Outre la livraison et la mise en place du réseau de CORS et du Centre de Contrôle du Réseau et la détermination des coordonnées de l'ensemble des stations du réseau complet (constitué des nouvelles CORS et des CORS existantes), dans le cadre de la maintenance de l'infrastructure géodésique nationale, il est essentiel d'intégrer aux opérations de modernisation la réhabilitation (ou la reconstruction) des bornes des réseaux géodésiques de 1<sup>er</sup> et 2<sup>ème</sup> ordres qui le justifieraient, puis l'observation, le calcul et la compensation de sous-ensembles judicieusement choisis ou de l'ensemble de ces réseaux géodésiques.

## 4. Méthodologies envisageables pour déterminer les algorithmes de transformation depuis les référentiels géodésiques historiques vers le référentiel géodésique en vigueur ou son successeur éventuel

### 4.1 Introduction : de la nécessité de disposer de transformations géodésiques

Un certain nombre de référentiels géodésiques ont été utilisés au cours du temps au Sénégal.

En 2004, un nouveau référentiel, compatible avec le système géodésique mondial WGS84 / ITRS<sup>4</sup>, les systèmes de positionnement GNSS et les réseaux permanents de l'IGS<sup>5</sup>, a été mis en place : RRS04 correspond à la réalisation de l'ITRS2000 à l'Époque 2004.56 établie par IGN France sur le territoire du Sénégal.

Si ce référentiel a peu à peu remplacé la plupart des référentiels géodésiques historiques dans la plupart des secteurs d'activités, ce n'est pas encore le cas pour toutes les applications, notamment dans les zones où il existe encore des bornes et repères des réseaux historiques, mais pas encore de points RRS04 de 3<sup>ème</sup> ordre (RRUS ou RRCS régionaux).

Ainsi, le référentiel de Hatt est semble-t-il encore utilisé pour certaines applications cadastrales ; de même, les travaux topographiques en lien avec la navigation aérienne (infrastructures et aides radioélectriques) utilisent le référentiel WGS84-ASECNA, qui correspond à la réalisation particulière de l'ITRS96 à l'Époque 1998.5 établie par l'ASECNA. En effet, l'ASECNA<sup>6</sup> a procédé à plusieurs campagnes "WGS-84" en 1996, 1998, 2004, 2007/2008 et 2013/2014 – et s'apprête à le faire à nouveau en 2022 – pour la mise aux normes "WGS-84" de ses installations dans les 17 États membres d'Afrique (Benin, Burkina Faso, Cameroun, Centrafrique, Comores, Congo, Côte d'Ivoire, Gabon, Guinée Bissau, Guinée Équatoriale, Mali, Mauritanie, Niger, Sénégal, Tchad, Togo et Madagascar), et cette réalisation risque d'être utilisée tant qu'un référentiel géodésique unique AFREF<sup>7</sup> n'aura pas été adopté par tous les pays Africains (voir rapport de Phase 2).

Par ailleurs, dans un certain nombre de secteurs d'activité dont les travaux topographiques sont désormais géoréférencés dans le RRS04, il existe encore de nombreux documents d'arpentages, plans, cartes, rapports, fiches etc. relatifs à des éléments qui ont été géoréférencés dans un référentiel géodésique historique (par exemple OMVS79).

<sup>4</sup> World Geodetic System 1984 / International Terrestrial Reference System

<sup>5</sup> International GNSS Service

<sup>6</sup> Agence pour la Sécurité de la Navigation Aérienne en Afrique et à Madagascar

<sup>7</sup> Le Référentiel Géodésique Africain (AFREF) est conçu pour unifier la multitude de référentiels géodésiques et de référentiels verticaux dans les 54 pays d'Afrique existants

Pour toutes ces raisons, il est essentiel de pouvoir disposer d'outils permettant de transformer les coordonnées de points depuis les différents référentiels géodésiques historiques vers le nouveau référentiel RRS04 ou son successeur.

L'utilisation de données ayant une composante géospatiale (donc pas uniquement des données géodésiques) géoréférencées dans des systèmes de coordonnées géographiques (les **GCS** – *Geographic Coordinate Systems* – ou **CRS** – *Coordinate Reference Systems* – des SIG et autres logiciels de cartographie) différents du RRS04 nécessite de pouvoir disposer d'outils de transformations géodésiques, c'est-à-dire d'algorithmes de transformation et de logiciels pour les mettre en œuvre. Ces transformations géographiques sont toujours définies pour un sens particulier (depuis le GCS de départ vers le GCS d'arrivée) mais sont réversibles (pour passer du GCS d'arrivée au GCS de départ).

## 4.2 Transformations géodésiques envisageables

### 4.2.1 Les différents types de transformations géodésiques existants

Selon les référentiels géodésiques – et surtout selon la qualité de leur réalisation à travers un territoire –, il existe plusieurs types de transformations géodésiques disponibles, dénommées [1], [2], [3] et [4] dans ce rapport :

- **Les translations** (3 paramètres) – accompagnées ou non d'un changement d'ellipsoïde de référence (2 paramètres) –, qui correspondent donc à des transformations à 3 ou  $3+2=5$  paramètres ;
- **Les similitudes spatiales**, également nommées transformations de Helmert (combinaison de translations, rotations et facteur d'échelle) – accompagnées ou non d'un changement d'ellipsoïde de référence – donc des transformations de  $4+2=6$  à  $7+2=9$  paramètres – et les transformations apparentées (transformation de Molodensky-Badekas, avec utilisation d'un point fondamental) – donc des transformations à 10 ou  $10+2=12$  paramètres ;
- **Les grilles de transformations**, qui correspondent le plus souvent à la combinaison de translations, plus rarement de similitudes spatiales. Il s'agit donc le plus souvent d'un modèle de  $n$  (nombre de lignes)  $\times$   $m$  (nombre de colonnes) transformations à 3 paramètres ( $n$  et  $m$  représentant les variations de la translation selon l'axe Y-Nord et l'axe X-Est) – accompagnées ou non d'un changement d'ellipsoïde de référence (2 paramètres) –, ou plus rarement d'un nombre  $n$  de transformations à 7 paramètres ( $n$  correspondant aux différentes régions dans lesquelles les similitudes spatiales sont homogènes en première approximation) – là aussi accompagnées ou non d'un changement d'ellipsoïde de référence (2 paramètres) –;
- **Les transformations géodésiques (translations ou similitudes spatiales) avec changement d'époque de référence**, donc des transformations de 3 ou  $3+2$  à 7 ou  $7+2$  paramètres et utilisation d'un modèle de mouvement de plaque.

Le choix d'une transformation particulière plutôt qu'une autre dépend de plusieurs paramètres : (i) **la taille de la zone d'intérêt** – locale, régionale ou nationale –, (ii) **la précision**

**recherchée** – maximale ou juste acceptable pour un certain type d'applications –, **(iii) le nombre de points géodésiques disponibles** connus dans le référentiel historique en question, **(iv) la précision des réalisations des référentiels de départ et d'arrivée** – si les points du réseau de départ (référéncé dans le GCS1) sont connus avec une faible précision, il n'y a pas de transformation précise qui tienne, les coordonnées des points du réseau dans le référentiel d'arrivée (GCS2) seront nécessairement imprécises –, et **(v) des outils disponibles pour l'appliquer** – tous les logiciels ne comportent pas une fonctionnalité d'application d'une grille de paramètres de translation, par exemple.

S'agissant des similitudes spatiales, il faut noter que l'algorithme de transformation le plus commode est celui qui s'applique aux coordonnées géocentriques cartésiennes (X, Y, Z), car il est facilement réversible (pour être utilisé dans les deux sens).

Il est possible de calculer un modèle équivalent – formules de Molodensky – utilisable avec des coordonnées géographiques (latitude et longitude) ou un modèle équivalent – transformations polynomiales – utilisable avec des coordonnées planes (Coordonnées Est et Nord), mais tous les deux sont déconseillés :

- Outre leur non-réversibilité, les formules de Molodensky sont des développements limités (en général aux premiers ordres) qui ne sont valides qu'en première approximation (c'est le modèle qui était utilisé avant l'avènement du GNSS, les calculs géodésiques étant alors réalisés sur l'ellipsoïde, et la précision requise n'était pas très élevée).
- Outre leur non-réversibilité, les transformations polynomiales ne sont utilisables que sur des zones peu étendues.

## 4.2.2 Approche recommandée

### 4.2.2.1 Préambule

Historiquement, deux types d'organisations sont à l'origine de la plupart de l'établissement de réalisations géodésiques à travers le monde, les Instituts Géographiques Nationaux (et leurs homologues : instituts de Cartographie et télédétection, Bureaux du Cadastre et de la Gestion des Territoires...), et surtout les compagnies pétrolières et minières. Celles-ci opérant la plupart du temps dans un très grand nombre de pays (et pas leur seul pays d'origine, comme les Instituts Géographiques, et dans plusieurs régions de ces pays, ce sont elles qui ont – de très loin – l'expérience la plus grande en la matière. Logiquement, ce sont donc également ces deux types d'organisations qui sont à l'origine de la détermination de la plupart des paramètres des transformations géodésiques correspondants, et là encore, ce sont les compagnies pétrolières et minières qui ont de loin l'expérience la plus significative en la matière. C'est d'ailleurs là la raison de l'existence de la plus grande base de données

géodésiques existante – EPSG<sup>8</sup> – qui a servi de base à de nombreux éditeurs de logiciels (dont les éditeurs de SIG, de logiciels de cartographie et de traitements géomatiques). Ainsi, quels que soit le référentiel géodésique en vigueur, ces compagnies déterminent toujours leurs propres réalisations géodésiques et transformations correspondantes.

En l'occurrence, l'approche recommandée s'appuie sur notre expérience de plus de 30 ans des transformations géodésiques à travers le monde, y compris dans des pays avec de multiples référentiels géodésiques et systèmes de projection du fait de la présence de nombreuses compagnies pétrolières et minières, qui sont, avant même les Instituts Géographiques Nationaux et leurs homologues, nos clients historiques.

#### 4.2.2.2 Transformations géodésiques depuis les référentiels géodésiques historiques vers une réalisation de l'ITRS à un Époque de référence donnée (RRS04)

Pour pouvoir déterminer la transformation géodésique optimale depuis chacun des référentiels géodésiques historiques vers le référentiel géodésique de référence (RRS04 ou son successeur éventuel, par exemple RRS22), il est nécessaire d'identifier les points géodésiques de ces différentes réalisations historiques toujours utilisables en 2022.

Dans le cadre de la Phase 1, nous avons reconnu pour chacun des référentiels historiques un échantillon des points géodésiques identifiés, puis avons tenté d'extrapoler ce résultat à l'ensemble du territoire, à partir des informations recueillies dans la documentation fournie, ainsi qu'à travers les échanges avec les géomètres dans les différentes régions. Nous avons ainsi obtenu des estimations pour chacun des réseaux géodésiques historiques. Cependant, l'objectif principal de la reconnaissance n'était pas le recherche de points historiques, mais l'inspection des points de 1<sup>er</sup> et de 2<sup>ème</sup> ordres ainsi que les CORS existantes. C'est pourquoi, au début de la phase de réalisation du projet, ces estimations devront-elles d'abord être affinées et consolidées avec une reconnaissance complémentaire.

Ensuite, pour chacun des référentiels géodésiques historiques, la détermination de la transformation géodésique optimale procède d'une analyse de la précision (ordre de grandeurs des erreurs, représenté par l'erreur moyenne quadratique des résidus de la transformation calculée sur les points géodésiques historiques validés, ainsi que par le nombre de résidus hors tolérances correspondant à des coordonnées manifestement erronées) et des distorsions géodésiques – et de leur variation géospatiale – des réalisations des référentiels historiques, effectuée à l'issue de la réobservation et du calcul des coordonnées des réseaux des bornes et repères toujours utilisables dans le nouveau référentiel (RRS04 ou son successeur, par exemple RRS22).

En fonction des paramètres de distorsion (translations horizontales et verticales, facteurs d'échelle, rotations azimutales, déflections verticales) et leur variation géospatiale (homogène

<sup>8</sup> *European Petroleum Survey Group*

à travers le territoire ou variant progressivement d'une région à l'autre) et du niveau de précision de la réalisation (erreur moyenne quadratique une fois les valeurs hors tolérance écartées) des différents réseaux historiques, il est possible de proposer une ou plusieurs méthode(s) de transformation possible(s).

La meilleur modèle de transformation est celui qui permet d'obtenir des résidus sur les points géodésiques historiques – utilisés pour la détermination des paramètres de transformation ou non – les plus petits, et en corollaire les incertitudes sur les paramètres de transformation calculés les plus petites.

Lorsque plusieurs modèles de transformation fournissent des résidus acceptables, le choix du modèle le plus approprié résulte d'une analyse des bénéfices apportés par le modèle le plus précis (ordre de grandeur du gain en précision) au regard de sa commodité de mise en œuvre (applicabilité au moyen des logiciels de transformation géodésique disponibles, des modules de transformation des SIG utilisés – en tenant compte de leurs extensions ou *plug-ins* –, le cas échéant au moyen d'une application dédiée).

Pour que cette analyse soit significative, il est essentiel de disposer d'un nombre de points géodésiques historiques (connus dans chacun des référentiels historiques) suffisant, de sorte que les résultats issus de l'analyse statistique soient représentatifs a minima.

Ainsi, il est nécessaire de sélectionner un jeu de points géodésiques historiques stratégique et représentatif de l'ensemble du territoire (c'est-à-dire équitablement répartis dans les différentes régions et en proportion de l'intérêt économique des différentes zones).

Idéalement, le jeu de points sélectionné doit être scindé en plusieurs sous-jeux (deux ou trois), dont le premier est destiné à déterminer les paramètres d'une première transformation, et les autres à évaluer sa précision au moyen de données rigoureusement indépendantes.

Le calcul de transformation est réitéré en intervertissant les sous-jeux (calcul et évaluation indépendante). Pour chaque calcul de transformation, une évaluation pessimiste de la précision de la transformation calculée est effectuée au moyen de la moyenne des résidus obtenus sur les sous-jeux non utilisées pour le calcul.

La transformation optimale est finalement calculée au moyen de l'ensemble du jeu de points, mais sa précision est calculée au moyen de la moyenne des précisions des transformations calculées à partir des différents sous-jeux. La précision de la transformation optimale est évaluée au moyen de la moyenne des précisions de ces transformations.

#### 4.2.2.3 Transformation géodésique faisant intervenir une réalisation de l'ITRS et un changement d'époque de référence

Dès lors que des mesures GNSS sont effectuées dans un référentiel global (comme ITRS/WGS84), on ne peut pas considérer que les stations de référence utilisées sont fixes, (elles sont situées sur des plaques tectoniques en mouvement), donc leurs coordonnées

doivent être connues à l'Époque des mesures (soit extrapolées à l'aide de leur vitesses connues, soit déterminées à intervalle régulier – par exemple hebdomadaire – par un organisme de calcul). Par conséquent, les coordonnées des nouveaux points qui résultent de ces mesures sont référencées elles aussi à l'Époque des mesures.

Dès lors que le référentiel en vigueur correspond à une réalisation de l'ITRS à une Époque de référence donnée, nécessairement antérieur aux mesures (comme 2004.56 pour RRS04), il peut donc être nécessaire de transformer des coordonnées déterminées dans la dernière réalisation de l'ITRS à l'Époque des mesures (par exemple ITRF2014 à l'Époque 2022.5) dans une réalisation précédente (par exemple ITRF2000 pour RRS04) à l'Époque de référence (2004.56 pour RRS04).

En toute rigueur, il n'est possible de réaliser un changement d'époque de référence que dans une zone où la dynamique terrestre (plaque ou sous plaque tectonique, bassin géologique contrôlé par une faille active...) est parfaitement connue, au moyen de mesures GNSS continues (CORS) ou à tout le moins effectuées régulièrement (campagnes GNSS).

Cependant, pour la plupart des applications, il est possible – et d'usage – de considérer que les plaques et sous plaques tectoniques sont rigides en première approximation. Il est donc possible d'appliquer un modèle de mouvement de plaque (*plate motion model*), ou, en l'absence d'un tel modèle suffisamment précis dans la zone d'intérêt, d'en déterminer un nouveau (représenté par son vecteur d'Euler : pôle de rotation et vitesse angulaire).

Ensuite, la transformation géodésique est effectuée par combinaison d'un modèle de transformation géodésique (typiquement, une similitude spatiale à 7 ou 7+2=9 paramètres) et le modèle de mouvement de plaque sélectionné ou déterminé pour la zone d'intérêt.

### 4.3 Référentiels géodésiques historiques concernés

Les référentiels géodésiques historiques ont été identifiés au cours de la phase 1 de cette étude de faisabilité (cf rapport de Phase 1). Ils ont chacun des caractéristiques particulières, par conséquent il est possible que la méthode de transformation optimale soit différente pour chacun d'eux. Il s'agit :

- Référentiel de Hatt : le réseau correspondant contient en principe ~630 points, mais nous avons estimé que seuls 5% d'entre eux étaient encore utilisables ;
- Référentiel Datum Point 58, alias du 12<sup>ème</sup> Parallèle, alias Adindan, alias Yoff Datum, alias Yoff 200 : le réseau correspondant (en réalité, il s'agit de plusieurs sous-réseaux, chacun identifiés sous un nom différent) contient en principe ~46 points, mais nous avons estimé que seuls 20% d'entre eux étaient encore utilisables ;
- Référentiel ADOS NWC9Z2, alias WGS72 : le réseau contient en principe ~10 points, mais nous avons estimé que seuls 20% d'entre eux étaient encore utilisables ;

- Référentiel OMVS1979 : le réseau contient en principe ~125 points, mais nous avons estimés que seuls 30% d'entre eux étaient encore utilisables ;
- Référentiel WGS84-ASECNA, correspondant à la réalisation de l'ITRS96 à l'Époque 1998.5 établie par l'ASECNA : le réseau correspondant contient en principe ~33 points (points d'appui uniquement), mais ce nombre est susceptible de varier du fait de la campagne prévue en 2022.
- Non inclu dans la reconnaissance de la Phase 1, on peut ajouter le référentiel OMVG-78 dont la réalisation s'étendait dans les différentes zones du bassin versant du fleuve Gambie.

#### 4.4 Référentiel géodésique en vigueur

Le référentiel en vigueur sur le territoire du Sénégal est le RRS04, correspondant à la réalisation de l'ITRS2000 à l'Époque 2004.56 établie par la DTGC en partenariat avec IGN France.

Cependant, l'utilisation de ce référentiel n'a pas été rendue obligatoire par un décret de loi portant adoption d'un référentiel géodésique et altimétrique au Sénégal. Si l'on se place sur le seul plan de la réglementation (la problématique des conséquences pratiques a été abordée dans le rapport de phase 2), il est donc envisageable que le système géodésique du Sénégal puisse être mis à jour, par exemple avec une réalisation de l'ITRS2014 – ou de l'ITRS2020 lorsqu'il sera disponible – à une époque de référence récente comme 2022.0 (cette question a été abordée dans le rapport de phase 2). Dans ce cas, il serait judicieux de s'efforcer que ces réalisation et époque de référence puissent également être celles de l'AREF, de sorte que les pays Africains s'appuient sur le même système géodésique. L'homogénéité des systèmes géodésiques serait évidemment d'un grand intérêt, particulièrement s'agissant de pays voisins, car il facilite la réalisation de projets communs (par exemple, s'agissant de la Mauritanie, les projets d'aménagement du fleuve Sénégal ou le projet d'extraction d'hydrocarbures en mer Tortue).

On peut noter qu'un calcul initial de l'AFREF a été effectué en 2012 sur un sous-réseau de 50 stations GNSS permanentes situées en Afrique. Les coordonnées de ces stations ont été exprimées dans l'ITRF2008 à l'Époque 2012.93<sup>9</sup>. Cependant, il ne semble pas que ce calcul initial ait été suivi d'actions, par exemple, d'une part, intégrer l'ensemble des stations GNSS permanentes disponibles sur le continent (plaques de Nubie et Somalie, voire sous-plaques de Lwandle, Victoria, et Rovuma), et, d'autre part, s'accorder sur une réalisation de l'ITRS et une époque de référence de l'AREF à partir de laquelle le futur ATRS (*African Terrestrial Reference System*) divergerait de l'ITRS.

<sup>9</sup> ftp.afrefdata.org

Quoi qu'il en soit, la question du système géodésique de l'infrastructure géodésique modernisée est posée, et s'agissant des transformations géodésiques, si la transformation de coordonnées depuis un référentiel géodésique historique vers un référentiel qui correspond à une réalisation particulière de l'ITRS à une certaine époque de référence (en l'occurrence RRS04, mais ce serait la même chose avec un éventuel RRS22) peut être simplement effectuée au moyen des 3 premiers modèles de transformation présentés au paragraphe 4.2, la transformation vers une réalisation de l'ITRS quelle qu'elle soit (la même ou un autre) à une autre Époque de référence requiert nécessairement l'utilisation d'un modèle de vitesses de plaques.

## 4.5 Étude des différents modèles de transformation envisageables

### 4.5.1 Modèles de transformation simples

Ces modèles sont recommandés lorsqu'on se trouve dans l'un des cas de figure suivants [a], [b] ou [c]:

- a. La zone d'intérêt est peu étendue,
- b. La précision relative de la réalisation du référentiel historique concerné n'est pas très élevée,
- c. Les distorsions de la réalisation du référentiel historique concerné sont homogènes sur l'ensemble de la zone d'intérêt.

#### 4.5.1.1 Translations avec ou sans changement d'ellipsoïde (méthodes à 3 ou 3+2 paramètres)

Ce modèle de transformation (type [1] présenté au paragraphe 4.2.1) est le plus courant dès lors que l'on se trouve dans les cas de figure [a] ou [b].

Dans ce cas, la précision de la transformation, limitée par la faible précision du canevas géodésique dans le référentiel historique quelle que soit la précision de ce canevas dans le nouveau référentiel, est relativement faible.

L'adéquation d'un modèle de transformation au moyen d'une ou de plusieurs translations est peu probable si la triangulation originale a été effectuée selon les règles de l'art de la géodésie (bonne qualité). Typiquement, un tel modèle est optimal dans le cas d'un canevas astro-géodésique (dont la précision est beaucoup plus faible).

Lorsque la zone d'intérêt peut être scindée en sous-zones clairement circonscrites ou en tout cas distinctes au plan géodésique, le modèle de transformation optimal peut être constitué de plusieurs translations, qui varient donc légèrement en fonction des sous-zones (c'est souvent le cas lorsque les canevas d'appui locaux s'appuient chacun sur des bornes astro-géodésiques différentes).

Pour chaque translation, la formule de transformation peut s'écrire comme suit :

$$\begin{bmatrix} X_2 \\ Y_2 \\ Z_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_1 \\ Y_1 \\ Z_1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} T_x \\ T_y \\ T_z \end{bmatrix}$$

Avec  $X_2, Y_2, et Z_2$  coordonnées géocentriques cartésiennes du point dans le référentiel 2,  $X_1, Y_1, et Z_1$  coordonnées géocentriques cartésiennes du point dans le référentiel 1, et  $T_x, T_y, et T_z$  paramètres de translation suivant les axes  $X, Y, et Z$ .

Lorsque le modèle de transformation consiste en plusieurs translations correspondant aux différentes sous-zones, on détermine un jeu de paramètres pour chacune d'elles.

En cas de transformation avec changement d'ellipsoïde, les 2 paramètres supplémentaires que sont les variations du demi-grand axe et de l'aplatissement de l'ellipsoïde associé sont plus commodément pris en compte lors de la transformation entre les coordonnées géographiques (ou les coordonnées planes) et les coordonnées géocentriques cartésiennes du référentiel 1 puis de la transformation entre les coordonnées géocentriques cartésiennes et les coordonnées géographiques (ou les coordonnées planes) du référentiel 2.

Pour passer des coordonnées géographiques aux coordonnées géocentriques cartésiennes, on applique les formules classiques, disponibles sur le site de l'IGN<sup>10</sup>.

Inversement, pour passer des coordonnées géocentriques cartésiennes aux coordonnées géographiques, on applique les formules classiques inverses, disponibles sur le site de l'IGN<sup>11</sup>.

#### 4.5.1.2 Similitudes spatiales avec ou changement d'ellipsoïde (méthode à 4, 5, 6, 7 ou 10 ou 4+2, 5+2, 5+2, 6+2 ou 10+2 paramètres)

Ce modèle de transformation (type [2] présenté au paragraphe 4.2.1) est relativement répandu dès lors que l'on se trouve dans le cas de figure [a] avec [c].

Même s'il est souvent possible de déterminer les paramètres de tels modèles, ils ne constituent pas toujours pour autant une solution appropriée, en particulier lorsque la taille du territoire concerné est trop grande pour que les paramètres de distorsion possibles – facteur d'échelle et rotation azimutale – soient cohérents sur l'ensemble de ce territoire. Dans ce cas, les écarts types des paramètres de la transformation calculée et les résidus de la transformations sur les points d'appui utilisés sont anormalement élevés.

Lorsque la zone d'intérêt peut être scindée en sous-zones clairement circonscrites ou en tout cas distinctes au plan géodésique, le modèle de transformation optimal peut être constitué de plusieurs similitudes spatiales, qui varient donc légèrement en fonction des sous-zones

<sup>10</sup> <https://geodesie.ign.fr/> Rubrique Produits téléchargeables, Documentation, Documentation pédagogique, Documentation générale sur les coordonnées géodésiques et leurs transformations, TransformationsCoordonnéesGeodesiques.pdf, paragraphe 3.1 page 10

<sup>11</sup> <https://geodesie.ign.fr/> Rubrique Produits téléchargeables, Documentation, Documentation pédagogique, Documentation générale sur les coordonnées géodésiques et leurs transformations, TransformationsCoordonnéesGeodesiques.pdf, paragraphe 3.3 page 11

(c'est le cas lorsqu'il n'y a pas une grande triangulation mais plusieurs chaînes de triangulations reliées entre elles, comme les triangulations côtières et les îles).

Pour chaque similitude spatiale, la formule de transformation peut s'écrire comme suit :

$$\begin{bmatrix} X_2 \\ Y_2 \\ Z_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_1 \\ Y_1 \\ Z_1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} T_x \\ T_y \\ T_z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} D & -R_z & R_y \\ R_z & D & -R_x \\ -R_y & R_y & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_1 \\ Y_1 \\ Z_1 \end{bmatrix}$$

Avec  $X_2, Y_2, et Z_2$  coordonnées géocentriques cartésiennes du point dans le référentiel 2,  $X_1, Y_1, et Z_1$  coordonnées géocentriques cartésiennes du point dans le référentiel 1,  $T_x, T_y, et T_z$  paramètres de translation suivant les axes  $X, Y, et Z$ ,  $R_x, R_y, et R_z$  paramètres de rotation autour des axes  $X, Y, et Z$ , et  $D$  facteur d'échelle.

Il faut noter qu'il existe deux conventions possibles pour le signe des paramètres de rotation – *Position Vector Rotation* ou *Coordinate Frame Rotation* –, mais nous recommandons fortement l'utilisation de la seconde – **Coordinate Frame Rotation** – conformément aux préconisations de l'IERS<sup>12</sup>. Cependant, il est essentiel d'être prudent lors de l'utilisation des logiciels de transformations, car selon l'éditeur, ils s'appuient sur l'une ou l'autre convention.

On peut noter que nombre de similitudes spatiales à 6 (ou 6+2) ou 7 (ou 7+2) paramètres correspondent en fait à des transformations à 4 (ou 4+2) ou 5 (ou 5+2) paramètres, correspondant à la combinaison d'une translation tridimensionnelle (donc 3 paramètres) et d'une rotation azimutale avec le cas échéant un facteur d'échelle, le ou les deux paramètre(s) supplémentaire(s) provenant uniquement de l'expression de ces paramètres en coordonnées géocentriques cartésiennes pour des raisons de commodité des calculs de transformation (cf paragraphe 4.2.1).

Lorsque le modèle de transformation consiste en plusieurs similitudes spatiales correspondant aux différentes sous-zones, on détermine un jeu de paramètres pour chacune d'elles.

Comme pour les translations, en cas de transformation avec changement d'ellipsoïde, les 2 paramètres supplémentaires que sont les variations du demi-grand axe et de l'aplatissement de l'ellipsoïde associé sont plus commodément pris en compte lors de la transformation entre les coordonnées géographiques (ou les coordonnées planes) et les coordonnées géocentriques cartésiennes du référentiel 1 puis de la transformation entre les coordonnées géocentriques cartésiennes et les coordonnées géographiques (ou les coordonnées planes) du référentiel 2.

Les formules de passage d'un ellipsoïde à un autre mentionnées au paragraphe 4.5.1 sont inchangées.

Lorsqu'il n'est pas possible de calculer un ou plusieurs jeu(x) de paramètres fiables avec 5 paramètres (3 translations, un facteur d'échelle et une rotation azimutale), 6 paramètres (3

<sup>12</sup> International Earth Rotation Service

translations et 3 rotations) ou 7 paramètres (3 translations, un facteur d'échelle et 3 rotations) parce que ces paramètres varient à travers la zone d'intérêt, alors il est nécessaire de déterminer un grille de transformations.

#### 4.5.2 Grilles de transformations (combinaison de translations ou très rarement de similitudes spatiales)

Ces modèles sont recommandés lorsqu'on se trouve dans l'un des cas de figure suivants [a], [b] ou [c]:

- a. La zone d'intérêt est relativement étendue,
- b. La précision relative de la réalisation du référentiel historique concerné est relativement élevée (de  $\sim 1$  à  $\sim 5$  ppm<sup>13</sup>),
- c. Les distorsions de la réalisation du référentiel historique concerné varient spatialement (et progressivement) à travers la zone d'intérêt.

En pratique, ces modèles sont pertinents lorsque l'analyse des résidus planimétriques (vecteurs) issus de l'application d'un simple modèle de translation fait apparaître un schéma de distorsions spatialement corrélé (rotation azimutale et facteur d'échelle variant progressivement).

Il est nécessaire d'effectuer une analyse géostatistique afin de visualiser la carte de la répartition des erreurs en coordonnées Est et Nord. Cette répartition est ensuite interpolée en grill au moyen d'une méthode de krigeage. Les modèles de covariance sont estimés séparément pour les différentes composantes (Est, Nord et hauteur ellipsoïdale). La distance de corrélation est déterminée par essai-erreur à partir de la distance moyenne du plus proche voisin.

Pour chaque composante, une fonction de covariance est déterminée par essai-erreur sur une zone couvrant l'ensemble des points du réseau. L'étape principale consiste à calculer une fonction de covariance isotrope, dépendant uniquement de la distance, dont le comportement est ajusté à l'aide de deux variables principales :

- D'abord, la distance de corrélation, qui affecte la « rigidité » de la surface calculée ;
- Ensuite, le niveau de bruit (ou d'incertitude) contrôle le niveau de fidélité de la surface calculée aux données source d'origine.

Un compromis doit être recherché. L'étude géostatistique permet également de détecter toutes les valeurs aberrantes (valeurs hors tolérance) et de mettre en évidence les zones de distorsions similaires.

<sup>13</sup> Parties par millions, équivalentes à mm par km

Les résidus d'interpolation en grille ne doivent normalement pas excéder ~5 cm sur chacune des composantes Est et Nord.

A partir de ces valeurs d'interpolation en grille, il est alors simple de déterminer une grille de transformation utilisable avec des coordonnées géographiques. Une telle grille peut être utilisée avec n'importe quel logiciel de transformations géodésiques utilisant des coordonnées géographiques, donc peut être à la base de tous les formats correspondants (typiquement, le format normalisé NTV2 ou équivalent).

Pour des raisons de commodité, il est cependant recommandé de déterminer également une grille de transformation utilisable avec des coordonnées planes, donc de type étiré (*stretched grid* en anglais) intégrant l'altération linéaire et la convergence des méridiens des projections des coordonnées planes, donc sans avoir besoin de passer par des coordonnées géocentriques cartésiennes ou géographiques (à l'image de la transformation OSTN02/15 utilisé au Royaume Uni).

Une telle grille permet aux utilisateurs de convertir toutes les coordonnées planes exprimées dans un référentiel historique en coordonnées planes exprimées dans le référentiel en vigueur, sans avoir besoin d'un logiciel de transformations géodésiques.

Normalement, cette grille est calculée avec une résolution suffisamment petite (par exemple, 1 km). Cependant, dans le cas où il y a des variations significatives entre les nœuds consécutifs de la grille, il est usage d'utiliser une interpolation bilinéaire.

De manière générale, la formule de l'interpolation bilinéaire s'écrit :

$$f(x, y) = [f(x_1, y_1) * (x_2 - x) * (y_2 - y) + f(x_2, y_1) * (x - x_1) * (y_2 - y) + f(x_1, y_2) * (x_2 - x) * (y - y_1) + f(x_2, y_2) * (x - x_1) * (y - y_1)] * \frac{1}{(x_2 - x_1)(y_2 - y_1)}$$

Avec  $(x, y)$  les coordonnées du point pour lequel on peut déterminer la translation par interpolation,  $f(x, y)$  la valeur recherchée,  $(x_i, y_i)$  les coordonnées des nœuds de la grille avec  $i = 1$  ou  $i = 2$ , et  $f(x_i, y_i)$  les valeurs aux nœuds de la grille.

#### 4.5.3 Transformations géodésiques (translations ou similitudes spatiales) avec changement d'époque de référence

Ce modèle de transformation (type [4] présenté au paragraphe 2.2.1) consiste en une combinaison d'un des trois modèles précédents ([1], [2] ou [3]) et d'un changement d'époque de référence.

Dans ce cas, on utilise les formules de transformation du modèle approprié (par exemple [1] avec une similitude spatiale) et un modèle de mouvement de plaque tectonique.

Typiquement, on a besoin d'utiliser un tel modèle de transformation dans le cas d'une transformation de coordonnées déterminées dans l'ITRF2014 (dernière réalisation de l'ITRS à ce jour) à l'Époque des mesures (par exemple 2022.25 pour le 1<sup>er</sup> avril 2022) – ce qui est le cas lorsqu'on utilise un service de positionnement en ligne global (comme SCRS-PPP de Ressources Naturelles Canada) – vers le référentiel ITRF2000 à l'Époque 2004.56 (réalisation utilisée par le RRS04).

Parmi les modèles de mouvement de plaque recommandés, on peut citer GEODVEL<sup>14</sup>, MORVEL56<sup>15</sup>, ITRF2014 NNR<sup>16</sup>, ITRF2008 NNR<sup>17</sup>, et GSRM v2.1<sup>18</sup>. Il est également envisageable de déterminer un modèle régional (en l'occurrence national), qui peut être calculé pour une zone donnée à partir de données GNSS enregistrées sur sous-réseau bien choisi de stations GNSS permanentes pendant une durée suffisante (au minimum 2.5 à 3 ans). Dans ce cas, les paramètres à déterminer (dit vecteur d'Euler) sont les coordonnées du pôle de rotation (latitude et longitude) et la vitesse angulaire de la plaque considérée.

#### 4.5.4 Contexte des référentiels historiques identifiés

Même si, pour chacun des référentiels historiques, le modèle de transformation optimal ne pourra réellement être déterminé que lorsque les campagnes de reconnaissance complémentaire et d'observations GNSS puis l'analyse géostatistique de la cohérence des points géodésiques réobservés auront été effectuées au début de la phase de réalisation du projet, on peut anticiper quelques résultats :

- **Les modèles de type [1]** (translations avec changement d'ellipsoïde ou transformations de Helmert à 3+2 paramètres) sont peu probables si la triangulation originale a été effectuée selon les règles de l'art de la géodésie (bonne qualité), donc réservé aux cas des canevas imprécis (astro-géodésique, Transit Doppler, ou GPS non rattaché rigoureusement à l'IGS).
- **Les modèles de type [2]** (similitudes spatiales avec changement d'ellipsoïde ou transformations de Helmert à 7+2 paramètres) sont probables dès lors que le canevas original a été établi selon les règles de l'art de la géodésie (triangulation ou chaînes de polygonation) mais que la zone d'intérêt n'est pas trop étendue, de sorte que les distorsions géodésiques restent homogènes sur l'ensemble de la zone considérée. Ils sont d'autant moins probables que la taille de celle-ci augmente, sauf à la scinder en plusieurs sous-zones.
- **Les modèles de type [2] plus complexes** (transformations de Molodensky-Badekas avec changement d'ellipsoïde à 10+2 paramètres) sont probables pour les zones pas

<sup>14</sup> Argus, Gordon, Heflin, Ma, Eanes, Willis, Peltier, et Owen [2010]

<sup>15</sup> Argus, Gordon, et DeMets [2011]

<sup>16</sup> Altamimi, Rebischung, Métivier, et Collilieux [2016]

<sup>17</sup> Altamimi, Métivier, et Collilieux [2012]

<sup>18</sup> Kreemer, Blewitt, et Klein [2014]

très étendue avec la présence combinée de distorsions géodésiques typiques des similitudes spatiales et d'un décalage du point fondamental du référentiel.

- **Les modèles de type [3]** (grille régulière à espacement régulier d'ensembles de transformations de Helmert à 3 paramètres avec changement d'ellipsoïde) sont probables si le canevas original a été réalisé selon les règles de l'art de la géodésie et la zone est très étendue. On peut noter que ce modèle a été choisi par de nombreux pays, par exemple le Royaume-Uni (avec les grilles OSTN02/15) et la France (avec la grille GR3D97A).
- **Les modèles de type [4]** (transformations géodésiques avec changement d'Époque de référence) concernent l'ensemble des modèles de transformation précédents dès lors qu'ils doivent aussi intégrer un changement d'Époque de référence (typiquement, autre que 2004.56), donc un géoréférencement effectué par rapport à des stations référencées à une autre Époque (typiquement les stations de l'IGS ou les points géodésiques de pays limitrophes, mais aussi lors de l'utilisation d'un service de positionnement global).

Ainsi, si l'on examine chacun des référentiels historiques :

- **Référentiel de Hatt** : Il est peu probable qu'un modèle de type [1] ou [2] soit optimal. Le référentiel ayant été utilisé sur la zone du Grand Dakar qui est très étendue, il est peu probable qu'une transformation de type régression polynomiale fonctionne très bien non plus. Le modèle optimal le plus probable est certainement celui de de type [3]. Lorsque la transformation doit être utilisée avec un changement d'époque (utilisation de coordonnées référencées à une autre époque que 2004.56), ce modèle doit être combiné avec un modèle de mouvement de plaque (modèle [4]).
- **Référentiel Datum Point 58, alias du 12<sup>ème</sup> Parallèle, alias Adindan, alias Yoff Datum, alias Yoff 200** : pour des raisons historiques dues à leur réalisation, il n'est pas sûr que ces différents sous réseaux soient parfaitement homogènes entre eux. Les modèles optimaux les plus probables sont ceux de type [1] et [2], compte tenu de l'étendue du réseau, peut-être avec plusieurs modèles selon les différentes sous-zones. Comme pour le réseau de Hatt, si la transformation doit être effectuée avec un changement d'époque, ce modèle doit être combiné avec un modèle de mouvement de plaque (modèle [4]).
- **Référentiel ADOS NWC9Z2, alias WGS72** : compte tenu de la précision des satellite Transit Doppler et de l'étendue du réseau (qui traverse le Sénégal d'Ouest en Est), le modèle de transformation optimal le plus probable est sans aucun doute de type [1], ou alors un modèle de type [2] mais avec, outre les paramètres de translation, les seuls paramètres de rotation  $R_z$  et facteur d'échelle  $D$  correspondant au passage entre WGS72 et WGS84.

- **Référentiel OMVS1979** : compte tenu de l'étendue du réseau, tous les modèles ([1], [2] et même [3]) sont envisageables, même si, selon la répartition des points toujours réutilisables en 2022, il est possible qu'un modèle de type [1] ou de type [2] fonctionne bien, avec cependant plusieurs translations ou similitudes spatiales possibles dans les différentes sous-zones le long du fleuve Sénégal.
- **Référentiel OMVG1978** : on peut faire les même hypothèses que pour le réseau OMVS1979 précédent, avec plusieurs translations ou similitudes possibles dans les différentes sous-zones le long du fleuve Gambie.
- **Référentiel WGS84-ASECNA** : compte tenu de l'étendue du réseau, tous les modèles ([1], [2] et même [3]) sont envisageables, même si en théorie un modèle de type [1] est le plus probable, le cas échéant avec plusieurs translations différentes dans les différentes sous-zones.

---

## 5. Système de modélisation de la base de données géoréférencée normalisée

### 5.1 Analyse de l'existant

Le PROCASEF dispose d'une base de données de visualisation du réseau géodésique développées en juin 2008 par le groupement en charge de l'Appel D'Offre International n° EuropeAid/125141/D/SER/SN. Ce SIG a été fourni sous forme de DVD et a été réalisé à l'aide de la technologie Skyline.

Nous ne connaissons pas la structure exacte de ce SIG mais pour un souci de modernisation l'usager de ce système devrait disposer de fonctionnalités d'interrogation spatiale et sémantique permettant de répondre à toute requête visant à s'informer de l'existence d'une donnée géodésique quelconque sur une région.

L'inventaire et l'analyse de l'existant nous permet de proposer un schéma conceptuel, des tables attributaires de la future base de données et un ensemble de requêtes permettant d'obtenir les informations suivantes :

- Fiche d'identité de station CORS (Affichage en ligne et/ou téléchargement).
- Journaux de station CORS (*log sheets*) (affichage en ligne et/ou téléchargement).
- Téléchargement de données brutes GNSS des CORS.
- Fiche d'identité de points géodésiques (affichage en ligne et/ou téléchargement).
- Fiche d'identité de repères de nivellement (affichage en ligne et/ou téléchargement).

### 5.2 Structuration de la base de données

#### 5.2.1 Introduction

Le fichier des points géodésiques (CORS, Géodésique et Nivellement) est la base de notre système géographique. Leur table attributaire doit lister toutes les informations nécessaires à la caractérisation de chaque point.

La base de données géoréférencée devra se structurer autour des éléments suivants :

1. Une codification univoque des noms de points
2. Un dictionnaire de données décrivant les champs des tables attributaires. Le dictionnaire de données devra comprendre a minima la structuration de données selon les champs tel que décrit ci-après et selon la structure de modèle conceptuel de BD géographiques en section 5.2.3.

- Des éléments points appartenant aux réseau CORS
  - Des éléments points appartenant aux réseaux de référence géodésiques
  - Des éléments points appartenant aux réseaux de nivellement
  - Les systèmes de coordonnées de référence (historiques et en vigueur)
  - Les systèmes de réseaux de nivellement (historiques et en vigueur)
  - Les fichiers de données GNSS brutes enregistrées par les CORS
  - Les intervenants ayant des interactions avec cette base de données
1. Des liaisons entre table attributaires en rapport avec des intervention permettant d'alimenter et/ou mettre à jour via des formulaires les tables attributaires : Levé de points géodésiques, Levé de points de nivellement, Installation d'équipement CORS, Maintenance d'équipement CORS, Retrait d'équipement CORS.
  2. Des requêtes sur les informations de cette base de façon à produire et obtenir les données nécessaires à l'utilisateur.

Cette structure pourra être aisément importée dans n'importe quel type de SGBD (Oracle, PostgreSQL, ...) et sous n'importe quel environnement SIG (ESRI ArcGIS, Mapinfo, QGIS), comme illustré en Figure 5.1 suivante.

Tous ces environnements permettent la visualisation et l'interrogation des points en utilisant les informations stockées dans la table attributaire.

The screenshot displays a software interface with three main components:

- PDF Document (Left):** A form titled 'Point géodésique SANDIARAS'. Fields include: Réseau géodésique concerné (SANDIARAS), Localité (Mbour/ Sandiara), Emplacement (En face de la station Ols qui a remplacé SAP, à droite en allant à Dakar), Coordonnées approximatives WGS84 (14.43459, -16.78947), Type de matérialisation (Piquet en fer), and Date d'observation (30 août 2021). Two photographs of the point are shown at the bottom.
- Map (Right):** A satellite map of the region with a legend for 'Réseau' including CORS, Hatt, Nouvelle CORS, RRS1, RRS2, RRS2 ign national, and Troisième ordre.
- Table (Bottom):** A table titled 'Tous\_reseaux' with columns: COORD\_X, COORD\_Y, Localite, Reseaux, Nom, Etat, Inspect, Borne\_Type, LONG, LAT, and Hyperlin. The row for 'SANDIARAS' is highlighted in blue.

| COORD_X | COORD_Y | Localite | Reseaux         | Nom       | Etat         | Inspect | Borne_Type       | LONG       | LAT       | Hyperlin            |
|---------|---------|----------|-----------------|-----------|--------------|---------|------------------|------------|-----------|---------------------|
| 267551  | 1626213 | Rufisque | Troisième ordre | RUF32     | Bon état     | OUI     |                  | -17.158733 | 14.696605 | FIGHERUF32.pdf      |
| 254313  | 1629013 | Rufisque | RRS2            | R002      | En bon état  | OUI     |                  | -17.281869 | 14.723725 | FIGHER002.pdf       |
| 244110  | 1632450 | Pikine   | RRS2            | R001      | Inutilisable | OUI     | Reperes en acier | -17.378911 | 14.753282 | FIGHER001.pdf       |
| 287747  | 1584684 | Mbour    | Nouvelle CORS   | MB01      |              |         |                  | -16.968729 | 14.416483 | FIGHEMB01.pdf       |
| 285092  | 1593988 | Mbour    | Troisième ordre | MB-04     | Bon état     | OUI     |                  | -16.965475 | 14.410111 | FIGHEMB-04.pdf      |
| 244427  | 1633786 | Boune    | Troisième ordre | DK-53     | Bon état     | OUI     |                  | -17.336964 | 14.786316 | FIGHERDK-53.pdf     |
| 236181  | 1629291 | Castor   | Troisième ordre | DK-22     | Inutilisable | OUI     |                  | -17.450156 | 14.724516 | FIGHERDK-22.pdf     |
| 259901  | 1625996 | Bargny   | Troisième ordre | BARGNY1   | Inutilisable | OUI     |                  | -17.22972  | 14.696973 | FIGHERBargny1.pdf   |
| 271520  | 1649248 | Kayar    | RRS2            | B008      | Inutilisable | OUI     | Borne            | -17.123918 | 14.90807  | FIGHERB008.pdf      |
| 341148  | 1624986 | Bambey   | RRS2            | B007      | Inutilisable | OUI     | Borne            | -16.475369 | 14.69387  | FIGHERB007.pdf      |
| 259170  | 1626775 | Bargny   | RRS2            | B003      | En bon état  | OUI     |                  | -17.236577 | 14.702945 | FIGHERB003.pdf      |
| 307103  | 1586521 | Sandiara | Troisième ordre | SANDIARAS | Bon état     | OUI     |                  | -16.789392 | 14.434403 | FIGHERSANDIARAS.pdf |

Figure 5.1: Diagnostic des fiches signalétiques des points de densification du cadastre (Bureau des études du cadastre, 2016)

## 5.2.2 Codification des noms de points

La codification géodésique consiste à déterminer les principes d'identification des objets géodésiques (réseaux, sous réseaux, mailles, points géodésiques, repères de nivellement, grilles –par exemple, géoïde). La nomenclature complète de ces objets permet leur indexation et leur adressage afin de pouvoir accéder facilement à n'importe quel objet (par exemple, liste des points de RRS2, liste des points de RRS3/RRRCS de la région de Thiès, fiches signalétiques de B024, R132 et POL02 etc.) au moyen d'une simple requête dans la base de données.

### 5.2.2.1 Codification des sites CORS

S'agissant des CORS du RGPS, nous recommandons que leur codification suive le système DOMES, utilisé par l'IGS. Historiquement, le système de numérotation DOMES « Directory of MERIT Sites », a été conçu au début des années 80 (campagne MERIT) afin de donner un identifiant sans ambiguïté à tous les repères et marqueurs instrumentaux.

Les CORS du futur réseau modernisé pourront ainsi suivre l'exemple de la station DAKR, XXXX - acronyme à 4 lettres fonction du lieu :

DAKR, numéro 34108M001 DOMES:

- Les 3 premiers chiffres indiquent la zone, généralement le pays (341=Sénégal) ;
- Les 2 chiffres suivants désignent le numéro du site dans le pays (08) ;
- La lettre suivante indique le point de suivi ("M" est un point de monument tel qu'un pilier, un poteau, une marque en laiton... ; "S" indique le point de référence d'un instrument tel que l'intersection des axes d'un télescope SLR, point de référence d'une antenne VLBI, DORIS ou GPS *Antenna Reference Point*) ;
- Les 3 derniers chiffres représentent un numéro de point séquentiel (ici 001=Pilier GNSS/repère laiton).

S'agissant de la classification des CORS, nous proposons de suivre le système en vigueur à l'IGS, présenté dans le Tableau 5.1 :

Table 5.1: Classification des stations GNSS permanentes

| Classe | Caractéristique majeure                 | Contraintes minimales   |
|--------|---|---|
| I      | Référence Internationale (IGS ou EUREF) | Antenne géodésique étalonnée IGS<br>Échantillonnage 30 s fichier 24 heures  |
| G      | Station Multi-constellation             | Enregistrement des observables GPS, Glonass, Galileo, BeiDou  |
| T      | Géophysique                             | Antenne géodésique étalonnée IGS<br>Support stable (liaison garantie avec la roche en place)<br>Échantillonnage 30 s, fichier 24 heures |
| S      | Scientifique                            | Antenne géodésique étalonnée IGS<br>Colocalisation avec d'autres instruments  |
| K      | RTK                                     | Sortie RTCM v3.1 messages 18 et 19<br>Échantillonnage 1s<br>Système de diffusion  |
| D      | DGPS                                    | Sortie RTCM v3.1 messages 1 et 3<br>Échantillonnage 1s<br>Système de diffusion  |
| C      | Stations à flux continu                 | Antenne géodésique étalonnée IGS<br>Échantillonnage 1s<br>Liaison louée ou internet continu   |
| P      | Post-traitement                         | Échantillonnage 1s<br>Fichiers 1 heure  |
| R      | Temps réel                              | La station appartient à un réseau temps réel interpolé  |
| N      | NTRIP                                   | La station fournit des données temps réel en utilisant le protocole NTRIP   |
| I      | Référence Internationale (IGS ou EUREF) | Antenne géodésique étalonnée IGS<br>Échantillonnage 30 s fichier 24 heures  |

### 5.2.2.2 Codifications des points géodésiques

La codification des points géodésiques des réseaux passifs matérialisés doit permettre d'identifier :

- La région ;
- Le département ;
- Le nom du réseau géodésique ;
- Le nom du sous-réseau géodésique ;
- Le nom du sous réseau géodésique régional.

Pour les points appartenant à un réseau géodésiques, une proposition de codification pourrait être **rrr.ddd.oo.nnnn-zz** avec

- rrr : trois lettres pour région
- ddd : trois lettres pour département
- oo : deux chiffres : ordre du réseau (01,02,03,04,...)
  - 00 : RGPS
  - 10 : 1<sup>er</sup> ordre RRS1
  - 20 : 2<sup>e</sup> ordre RRS2
  - 30 : 3<sup>e</sup> ordre RRS3
  - 31 : 3<sup>e</sup> ordre RRUS
  - 32 : 3<sup>e</sup> ordre RRCS
  - 33 : RRRCS\_Dakar
  - 34 : RRRCS\_Djourbel
  - 35 - 49.....etc pour les autres régions
  - 50-59 : RGHS - autres réseaux historiques
  - .....
- nnnn : numéro séquentiel du point dans chaque région de 00001 à 99999
- zz = numéro du rejet le cas échéant

### 5.2.2.3 Codification des points de nivellement

Pour les points appartenant à un réseau de nivellement, une proposition de codification pourrait être **cc.aa.mm.nnnnn-zz**

- cc : deux chiffres pour code du réseau de nivellement
- aa : deux chiffres pour ordre du réseau (01,02,03,...)
- mm = deux chiffres pour numéro de maille
- nnnnn : numéro séquentiel du point dans la maille de 00001 à 99999
- zz = numéro du triplet le cas échéant.

### 5.2.3 Schéma conceptuel de la base donnée.

La figure ci-dessous présente le schéma conceptuel de cette base de données géographique qui établit et caractérise les relations entre les tables attributaires :

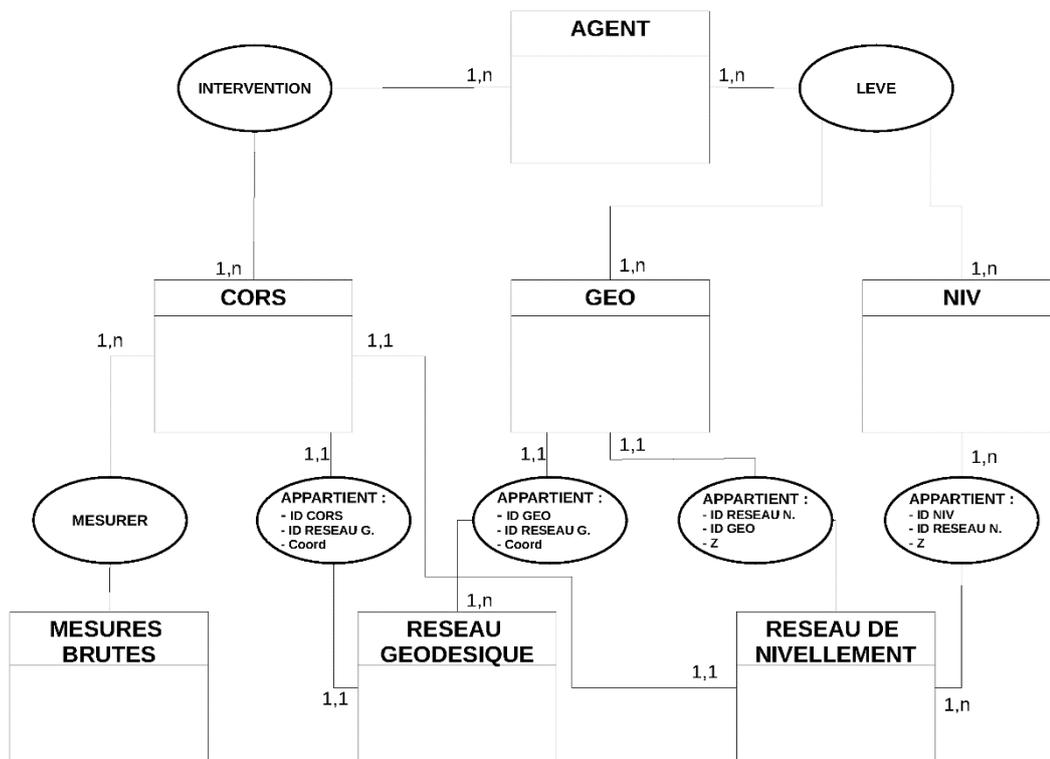


Figure 5.2: Modèle conceptuel de la base de données géographique

## 5.2.4 Tables attributaires

### 5.2.4.1 Structuration de la donnée des points appartenant au réseau CORS – Table : CORS

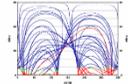
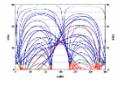
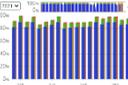
#### 5.2.4.1.1 Table attributaire

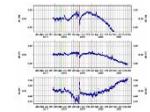
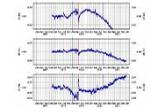
La table attributaire ci-dessous est la liste des champs descriptifs des points appartenant au réseau CORS.

Table 5.2 : Liste descriptive des champs de la table des points appartenant à un réseau CORS

| Nom du champ       | Type | Intervalle              | Format      | Critère   | Exemple    | Description   |
|--------------------|------|-------------------------|-------------|-----------|------------|---|
| PrimaryKey         | Text | 255                     | NuméroAuto. | Non vide  |            | Clé primaire  |
| Point_Name         | Text | 255                     |             | Non vide  | Bandrele   | Nom du point  |
| Point_Code         | Text | 255                     | XXXX        | Non vide  | BDRL       | Codification - Nom au format IGS de la CORS pour fichiers RINEX                             |
| IERS DOMES         | Text | 255                     | XXXXXXXXX   | Non vide  | 10014M004  | Numéro IERS DOMES   |
| Point_acronym1     | Text | 255                     |             | Non vide  | BDRL       | Nom au format IGS de la CORS pour fichiers RINEX  |
| Point_acronym2     | Text | 255                     |             |           | BDRLO0MYT  | Nom au format PROCASEF de la CORS   |
| Point_acronym3     | Text | 255                     |             |           |            | Nom historique du point   |
| GeodeticNetwork    | Text | 255                     |             | prédéfini | RGPS       | Variable selon table attributaire Réseau géodésique   |
| Order              | Text | 255                     |             | prédéfini | 0          | Ordre du réseau   |
| Stability_Status   | Text | 255                     |             | prédéfini | N          | Définir des groupes de stabilité en fonction des caractéristiques et emplacement de la CORS |
| Locality           | Text | 255                     |             | Non vide  | Rufisque   | Localité dans laquelle se situe le point  |
| Information        | Text | 64000                   |             |           |            | Descriptions complémentaires  |
| Class_CORS         | Text | 255                     |             | prédéfini |            | Classe de CORS (1,2,3...) en fonction de sa qualité   |
| Date_Commissioning | Date | 01/01/1900 - 31/12/9999 | dd/mm/yyyy  |           | 10/10/2022 | Date de mise en service de la CORS  |
| Date_LastVist      | Date | 01/01/1900 - 31/12/9999 | dd/mm/yyyy  |           | 10/10/2022 | Date de dernière maintenance  |

| Nom du champ         | Type   | Intervalle              | Format     | Critère   | Exemple    | Description   |
|----------------------|--------|-------------------------|------------|-----------|------------|---|
| Date_Decommissioning | Date   | 01/01/1900 - 31/12/9999 | dd/mm/yyyy |           | 10/10/2022 | Date de retrait de la CORS                                      |
| Logsheet             | BLOB   | <file>                  | txt        | Non vide  |            | Fiche d'information détaillée de la station CORS (logsheet)     |
| Data_LastUpdate      | Date   | 01/01/1900 - 31/12/9999 | dd/mm/yyyy |           | 10/10/2022 | Champ dynamique en fonction des dernières données reçues        |
| Constellation        | Text   | 255                     |            | prédéfini | GPS+GLO    | Constellations suivies  |
| Observables          | Text   | 255                     |            | prédéfini | L1L2C1     | Fréquences suivies :  |
| Logging_Session      | Text   | 255                     |            | prédéfini | 1h         | Durée des sessions d'enregistrement<br>1h/6h/12h/24h            |
| Rate                 | Text   | 255                     |            | prédéfini | 1s         | Cadence d'enregistrementl des données :<br>0.5s/1s/15s/30s/60s  |
| Owner                | Text   | 255                     |            |           |            | Propriétaire du Site  |
| Administrator        | Text   | 255                     |            |           |            | Gestionnaire du site  |
| CRS                  | Text   | 255                     |            | Non vide  | RRS        | Système de Coordonnées de Référence                             |
| X_CART               | Double | 255                     | [12.3]     | Non vide  |            | Coordonnées géocentriques X dans le système CRS                 |
| Y_CART               | Double | 255                     | [12.3]     | Non vide  |            | Coordonnées géocentriques Y dans le système CRS                 |
| Z_CART               | Double | 255                     | [12.3]     | Non vide  |            | Coordonnées géocentriques Z dans le système CRS                 |
| LONGITUDE            | Text   | 255                     | DDD°MM'SS  | Non vide  |            | Coordonnées géographiques longitude dans le système CRS         |
| LATITUDE             | Text   | 255                     | DDD°MM'SS  | Non vide  |            | Coordonnées géographiques latitude dans le système CRS          |
| Height               | Double | 255                     | [12.3]     | Non vide  |            | Coordonnées géographiques hauteur dans le système CRS           |
| Hyperlink1           | BLOB   | <file>                  | pdf        | Non vide  |            | Hyperlien relatif vers la fiche descriptive du point géodésique |

| Nom du champ          | Type | Intervalle              | Format     | Critère  | Exemple   | Description   |
|-----------------------|------|-------------------------|------------|----------|---|---|
| Hyperlink2            | Text | 255                     | <link>     | Non vide |   | Hyperlien vers le serveur de requêtes de données GNSS CORS        |
| Receiver_Manufacturer | Text | 255                     |            | Non vide | XYZ   | Fabricant du récepteur  |
| Receiver_Model        | Text | 255                     |            | Non vide | Model1  | Modèle du récepteur   |
| Receiver_SN           | Text | 255                     |            | Non vide | 123456  | Numéro de série du récepteur                                      |
| Receiver_StartDate    | Date | 01/01/1900 - 31/12/9999 | dd/mm/yyyy |          | 10/10/2022  | Date d'installation du récepteur                                  |
| Receiver_EndDate      | Date | 01/01/1900 - 31/12/9999 | dd/mm/yyyy |          | 10/10/2022  | Date de retrait du récepteur                                      |
| Antenna_Manufacturer  | Text | 255                     |            | Non vide | XYZ   | Fabricant de l'antenne  |
| Antenna_Model         | Text | 255                     |            | Non vide | Zephyr Radome 2   | Nom fabricant de l'antenne  |
| Antenna_IGSName       | Text | 255                     |            | Non vide | TRM5990.00  | Nom IGS du modèle d'antenne                                       |
| Antenna_SN            | Text | 255                     |            | Non vide | SN  | Numéro de série de l'antenne                                      |
| Antenna_StartDate     | Date | 01/01/1900 - 31/12/9999 | dd/mm/yyyy |          | 10/10/2022  | Date d'installation de l'antenne                                  |
| Antenna_EndDate       | Date | 01/01/1900 - 31/12/9999 | dd/mm/yyyy |          | 10/10/2022  | Date de retrait de l'antenne                                      |
| Antenna_Calibration   | Date | 01/01/1900 - 31/12/9999 | dd/mm/yyyy |          | 10/10/2022  | Date de calibration de l'antenne                                  |
| Antenna_File          | BLOB | <file>                  | Jpg        |          |   | Fichier de calibration de l'antenne                               |
| Antenna_Diagram       | BLOB | <file>                  | Jpg        | Non vide | <image>   | Diagramme antenne construction                                    |
| Image_site            | BLOB | <file>                  | Jpg        |          | <image>   | Photo du site   |
| Image_antenna         | BLOB | <file>                  | Jpg        |          | <image>   | Photo de l'antenne  |
| SiteReferenceQuality  | BLOB | <file>                  | Jpg        |          |  | Représentation de référence de la qualité du site                 |
| SiteCurrentQuality    | BLOB | <file>                  | Jpg        |          |  | Représentation récente de la qualité du site                      |
| DataDailyQuality      | BLOB | <file>                  | Jpg        |          |  | Représentation interactive de la qualité des données (année/jour) |

| Nom du champ      | Type | Intervalle              | Format                       | Critère  | Exemple   | Description   |
|-------------------|------|-------------------------|------------------------------|----------|---|---|
| DataHourlyQuality | BLOB | <file>                  | Jpg                          |          |  | Représentation interactive de la qualité des données (horaires/jour)            |
| TimeSeriesWeekly  | BLOB | <file>                  | Jpg                          |          |  | Séries temporelles (année/semaine) de la stabilité de la coordonnées E,N,H/ CRS |
| TimesSeriesDaily  | BLOB | <file>                  | Jpg                          |          |  | Séries temporelles (horaire/jour) de la stabilité de la coordonnées / CRS       |
| Table_originator  | Text | 255                     |                              |          | JFR   | Nom de l'opérateur ayant créé la base   |
| Table_update      | Date | 01/01/1900 - 31/12/9999 | dd/mm/yyyy                   |          | 10/10/2022  | Date de mise à jour de la base SIG  |
| Logsheet          | BLOB | <file>                  | Point_Name-<br>Date_LastVist | Non Vide | Bdlr-211203   | Fichier du journal d'intervention de la station CORS                            |

### 5.2.4.1.2 Log sheet

Outre les informations issues de la table attributaire qui seront soit affichées en ligne, soit téléchargées sous forme d'une fiche, l'utilisateur aura accès aux différents journaux d'intervention de la CORS (basés sur des formulaires types remplis par des « AGENTS » lors d'« INTERVENTIONS ») qui contiendront des données permettant la traçabilité des changements sur les CORS tout au long de la durée de vie de la station, elles contiendront a minima :

- NOM du site CORS
- Information de la mise à jour du journal (Date, Agent, Type intervention)
- Identification du site du monument GNSS
- Information de lieu du site
- Information détaillée de l'équipement GNSS
- Information détaillée de l'antenne GNSS
- Méthode de rattachement du monument
- Informations sur les fréquences et le type d'installation
- Informations sur les instruments météorologiques (Capteur d'humidité, de pression, de température, de vapeur d'eau,
- Conditions locales pouvant affecter le calcul de la position du point (Interférence radio/ Multi trajet/Obstruction aux signaux GNSS/ Épisodes locaux (végétation / Construction)
- Local Ongoing Conditions Possibly Affecting Computed Position
- Contact et agent local

Un exemple de fiche de journal (modèle IGN France) est joint en annexe 7.

Ces fichiers journaux peuvent aussi le résultat de requêtes sur des champs des tables attributaires CORS et AGENT.

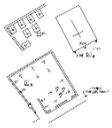
## 5.2.4.2 Structuration de la donnée des points appartenant au réseau géodésique – Table : GEO

La Table 5.3 liste des champs descriptives d'un point appartenant à un réseau géodésique.

Table 5.3 : Liste descriptive des champs de la table des points appartenant à un réseau géodésique

| Nom du champ      | Type | Intervalle              | Format                 | Critère  | Exemple               | Description   |
|-------------------|------|-------------------------|------------------------|----------|-----------------------|---|
| PrimaryKey        | Text | 255                     | NuméroAuto             | Non vide |                       | Clé primaire  |
| Point_Name        | Text | 255                     |                        |          | Bandrele              | Nom du point  |
| Point_Code        | Text | 255                     | rrr.ddd.oo.n<br>nnn-zz | Non vide | 901.031.MM.0<br>01-02 | Codification  |
| Point_acronym1    | Text | 255                     |                        |          | BDRL                  | Nom au format IGS (uniquement ordre 0)              |
| Point_acronym2    | Text | 255                     |                        |          | BDRL00MYT             | Nom au format PROCASEF du point                     |
| Point_acronym3    | Text | 255                     |                        |          |                       | Nom historique du point                             |
| GeodeticNetwork   | Text | 255                     |                        | Non vide | RRS1                  | Variable selon table attributaire Réseau géodésique |
| Order             | Text | 255                     |                        | Non vide | 1                     | Ordre du réseau Géodésiques                         |
| CRS               | Text | 255                     |                        | Non vide |                       | Système de Coordonnées                              |
| LevellingNetwork  | Text | 255                     |                        | Non vide | NGAO                  | Réseau de nivellement le cas échéant                |
| Adress            | Text | 255                     |                        |          | Rue                   | Adresse du point                                    |
| Locality          | Text | 255                     |                        |          | Ville                 | Localité dans laquelle se situe le point            |
| Area              | Text | 255                     |                        |          | Région                | Région dans laquelle se situe le site CORS          |
| Information       | Text | 64000                   |                        |          |                       | Descriptions complémentaires                        |
| Date_Installation | Date | 01/01/1900 - 31/12/9999 | dd/mm/yyyy             |          | 10/10/2022            | Date de mise en service                             |
| Date_LastVist     | Date | 01/01/1900 - 31/12/9999 | dd/mm/yyyy             |          | 10/10/2022            | Date de dernière visite                             |
| Date_Destruction  | Date | 01/01/1900 - 31/12/9999 | dd/mm/yyyy             |          | 10/10/2022            | Date de retrait de la CORS                          |
| Owner             | Text | 255                     |                        |          |                       | Propriétaire du Site                                |

| Nom du champ      | Type   | Intervalle | Format    | Critère  | Exemple   | Description   |
|-------------------|--------|------------|-----------|----------|---|---|
| Administrator     | Text   | 255        |           |          |   | Gestionnaire du site  |
| CRS               | Text   | 255        |           | Non vide | RRS   | Système de Coordonnées de Référence   |
| X_CART            | Double | 255        | [12.3]    | Non vide |   | Coordonnées géocentriques X dans le système CRS   |
| Y_CART            | Double | 255        | [12.3]    | Non vide |   | Coordonnées géocentriques Y dans le système CRS   |
| Z_CART            | Double | 255        | [12.3]    | Non vide |   | Coordonnées géocentriques Z dans le système CRS   |
| LONGITUDE         | Text   | 255        | DDD°MM'SS | Non vide |   | Coordonnées géographiques longitude dans le système CRS   |
| LATITUDE          | Text   | 255        | DDD°MM'SS | Non vide |   | Coordonnées géographiques latitude dans le système CRS  |
| Height            | Double | 255        | [12.3]    | Non vide |   | Coordonnées géographiques hauteur dans le système CRS   |
| Easting           | Text   | 255        | [12.3]    | Non vide |   | Coordonnées en projection Est dans le CRS   |
| Northing          | Text   | 255        | [12.3]    | Non vide |   | Coordonnées en projection Nord dans le CRS  |
| Elevation         | Text   | 255        | [12.3]    | Non vide |   | Hauteur du point  |
| Hyperlink1        | BLOB   | <file>     | pdf       | Non vide | <file>  | Hyperlien relatif vers la fiche descriptive du point géodésique                                       |
| Image_site        | BLOB   | <file>     | Jpg       |          |  | Photo de l'environnement du point pour faciliter son identification, préciser azimuth de prise de vue |
| Image_point       | BLOB   | <file>     | Jpg       |          |  | Photo de près du point géodésique   |
| Image_LocationMap | BLOB   | <file>     | Jpg       |          |  | Plan de localisation du point   |

| Nom du champ     | Type    | Intervalle              | Format     | Critère | Exemple   | Description   |
|------------------|---------|-------------------------|------------|---------|---|---|
| Image_Sketche    | BLOB    | <file>                  | Jpg        |         |  | Croquis de situation du point   |
| MarkerType       | Texte   | 255                     |            |         | Repère en acier   | Type de matérialisation   |
| Point_use        | Boolean | [0 – 1]                 |            |         | OUI   | Utilisation du point en GPS   |
| Point_status     | Text    | 255                     |            |         | N   | Etat du point   |
| Point_access     | Texte   | 64000                   |            |         |   | Description des accès, préciser si soumis à des horaires d'ouverture, contact sur place |
| Point_offset1    | Texte   | 255                     |            | Nonvide |   | Nom du Rejet 1  |
| Point_offset2    | Texte   | 255                     |            | Nonvide |   | Nom du Rejet 2  |
| Point_offset3    | Texte   | 255                     |            | Nonvide |   | Nom du Rejet 3  |
| Survey_method    | Text    | 255                     |            |         | GNSS Static   | Méthode d'observation pour détermination  |
| Image_Mask       | BLOB    | <file>                  | Jpg        |         | <image>   | Représentation des masques du site  |
| Table_originator | Text    | 255                     |            |         | JFR   | Nom de l'opérateur ayant créé la base   |
| Table_update     | Date    | 01/01/1900 - 31/12/9999 | dd/mm/yyyy |         | 10/10/2022  | Date de mise à jour de la base SIG  |

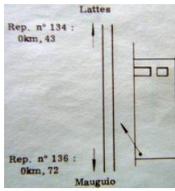
### 5.2.4.3 Structuration de la donnée des points appartenant au réseau de nivellement - Table : NIV

Ayant des caractéristiques différentes et une finalité différente d'un point géodésiques, une table attributaire des points de nivellement est proposée dans cette section. La Table 5.4 liste des champs descriptives d'un point appartenant à un réseau de nivellement.

Table 5.4: Liste descriptive des champs de la table des points appartenant à un réseau de nivellement

| Nom du champ     | Type   | Intervalle | Format               | Critère  | Exemple        | Description  |
|------------------|--------|------------|----------------------|----------|----------------|--|
| PrimaryKey       | Text   | 255        | NuméroAuto           | Non vide |                | Clé primaire   |
| Point_Name       | Text   | 255        |                      | Non vide | Bandrele       | Nom du point   |
| Point_Code       | Text   | 255        | cc.aa.mm.nn<br>nnn-z | Non vide | 90103M001      | Codification   |
| Point_acronym1   | Text   | 255        |                      | vide     | BDRL           | Nom au format IGS  |
| Point_acronym2   | Text   | 255        |                      |          | BDRL00MYT      | Nom au format PROCASEF   |
| Point_acronym3   | Text   | 255        |                      |          |                | Nom historique du point  |
| Altitude         | Double | 255        |                      | Non vide | 123.456m       | Coordonnées Altitude normale/orthométrique dans le système altimétrique (3chiffres après la virgule) |
| LevellingNetwork | Text   | 255        |                      | Non vide | RNGS1          | Réseau de nivellement  |
| LevellingOrder   | Text   | 255        |                      | Non vide |                | Variable : Précisez l'ordre à lequel le repère de nivellement appartient (1 à 4)                     |
| LevellingLoop    | Text   | 255        |                      | Non vide |                | Maille de nivellement  |
| MarkerType       | Texte  |            |                      |          | Repère console | Type de matérialisation  |
| MarkerSupport    | Texte  |            |                      |          | Aqueduc        | Précisez sur quel élément le repère de nivellement est fixé  |
| Adress           | Text   | 255        |                      |          | Rue            | Adresse du point   |
| Locality         | Text   | 255        |                      |          | Ville          | Localité dans laquelle se situe le point   |

| Nom du champ      | Type  | Intervalle              | Format     | Critère  | Exemple   | Description  |
|-------------------|-------|-------------------------|------------|----------|---|--|
| Area              | Text  | 255                     |            |          | Région  | Région dans laquelle se situe le site CORS   |
| Direction         | Texte |                         |            |          | D27 - De Castries à Montpellier   | Description de la voie suivie et du sens - Préciser sur quel côté de la voie par exemple le repère de nivellement se situe (à droite ou gauche) ou si il est situé sur un bâtiment dire par ex à droite de la porte. |
| Information       | Text  | 64000                   |            |          |   | Descriptions complémentaires   |
| Date_Installation | Date  | 01/01/1900 - 31/12/9999 | dd/mm/yyyy |          | 10/10/2022  | Date de mise en service  |
| Date_LastVist     | Date  | 01/01/1900 - 31/12/9999 | dd/mm/yyyy |          | 10/10/2022  | Date de dernière visite  |
| Date_LastMeasure  | Date  | 01/01/1900 - 31/12/9999 | dd/mm/yyyy |          | 10/10/2022  | Date de dernière mesure  |
| Date_Destruction  | Date  | 01/01/1900 - 31/12/9999 | dd/mm/yyyy |          | 10/10/2022  | Date de retrait de la CORS   |
| Longitude         | Text  | 255                     | DDD°MM'SS  | Non vide |   | Coordonnées géographiques longitude dans le système CRS  |
| Latitude          | Text  | 255                     | DDD°MM'SS  | Non vide |   | Coordonnées géographiques latitude dans le système CRS   |
| Easting           | Text  | 255                     | [12.3]     | Non vide |   | Coordonnées en projection Est dans le CRS  |
| Northing          | Text  | 255                     | [12.3]     | Non vide |   | Coordonnées en projection Nord dans le CRS   |
| Image_site        | BLOB  | <file>                  | Jpg        |          |  | Photo de l'environnement du point pour faciliter son identification, préciser azimuth de prise de vue  |
| Image_point       | BLOB  | <file>                  | Jpg        |          |  | Photo de près du repère  |
| Image_LocationMap | BLOB  | <file>                  | Jpg        |          |  | Plan de localisation   |

| Nom du champ     | Type    | Intervalle              | Format     | Critère  | Exemple   | Description   |
|------------------|---------|-------------------------|------------|----------|---|---|
| Image_Sketche1   | BLOB    | <file>                  | Jpg        |          |  | Croquis de situation – vue élévation  |
| Point_use        | Boolean | [0 – 1]                 |            |          | OUI   | Utilisation du point en GPS   |
| Point_status     | Text    | 255                     |            |          | N   | Etat de conservation du point   |
| Point_access     | Texte   | 64000                   |            |          |   | Description des accès, préciser si soumis à des horaires d'ouverture, contact sur place |
| Point_offset1    | Texte   | 255                     |            | Non vide |   | Nom du Triplet 1  |
| Point_offset2    | Texte   | 255                     |            | Non vide |   | Nom du Triplet 2  |
| Point_offset3    | Texte   | 255                     |            | Non vide |   | Nom du Triplet 3  |
| Survey_method    | Text    | 255                     |            |          | Nivellement simple  | Méthode d'observation pour détermination  |
| Table_originator | Text    | 255                     |            | XXX      | JFR   | Nom de l'opérateur ayant créé la base   |
| Table_update     | Date    | 01/01/1900 - 31/12/9999 | dd/mm/yyyy |          | 10/10/2022  | Date de mise à jour de la base SIG  |

#### 5.2.4.4 Structuration de la donnée des réseaux géodésiques - Table : RESEAU GEODESIQUE

La table ci-dessous présente les principaux attributs permettant de définir un réseau géodésique.

Table 5.5: Liste descriptive des champs d'un réseau géodésique

| Nom du champ      | Type   | Intervalle | Format     | Critère  | Exemple     | Description   |
|-------------------|--------|------------|------------|----------|-------------|---|
| PrimaryKey        | Text   | 255        | NuméroAuto | Non vide |             | Clé primaire  |
| Geodetic_network  | Texte  | 255        |            | Non vide | RRS3        | Nom du réseau principal auquel il appartient  |
| Subnetwork        | Texte  | 255        |            |          | RRCS        | Nom du sous-réseau du réseau principal auquel il appartient, ce champ peut être vide    |
| Order             | Text   | 255        |            | Non vide |             | Variable : Précisez l'ordre à lequel le repère de nivellement appartient (1 à 4)        |
| Network_Year      | Texte  | 255        |            | Non vide |             | Indique la date de création du réseau principal   |
| Subnetwork_Year   | Texte  | 255        |            |          |             | Indique la date de création du sous réseau du réseau principal, ce champ peut être vide |
| Owner             | Text   | 255        |            |          |             | Propriétaire du réseau  |
| Administrator     | Text   | 255        |            |          |             | Gestionnaire du réseau  |
| Region            | Texte  | 255        |            |          | Saint Louis | Précise la région où le point géodésique fondamental se situe                           |
| OriginPoint       | Texte  | 255        |            |          |             | Précise le département où le point géodésique fondamental se situe                      |
| NetworkAccuracy-H | Double | 255        |            | dd.dddm  |             | Indique la précision horizontale du réseau  |
| NetworkAccuracy-V | Double | 255        |            | dd.dddm  |             | Indique la précision verticale du réseau  |
| Comments          | Texte  | 64000      |            |          |             |   |

#### 5.2.4.5 Structuration de la donnée des réseaux de nivellement - Table : RESEAU DE NIVELLEMENT

La table ci-dessous présente les principaux attributs permettant de définir un réseau de nivellement.

Table 5.6: Liste descriptive des champs de la table pour définir un référentiel vertical

| Nom du champ      | Type   | Intervalle | Format     | Critère  | Exemple       | Description   |
|-------------------|--------|------------|------------|----------|---------------|---|
| PrimaryKey        | Text   | 255        | NuméroAuto | Non vide |               | Clé primaire  |
| Vertical Datum    | Text   | 255        |            | Non vide | NGAO43        | Référentiel altimétrique  |
| Levelling_network | Texte  | 255        |            | Non vide | RNGS          | Nom du réseau principal auquel il appartient  |
| Subnetwork        | Texte  | 255        |            | Non vide | RNGS2         | Nom du sous-réseau du réseau principal auquel il appartient, ce champ peut être vide    |
| Order             | Text   | 255        |            | Non vide | 2             | Variable : Précisez l'ordre à lequel le repère de nivellement appartient (1 à 4)        |
| HeightType        | Texte  | 255        |            | Non vide | Orthométrique | Variable Type d'altitude (normal/orthométrique)   |
| Network_Year      | Texte  | 255        |            | Non vide |               | Indique la date de création du réseau principal   |
| Subnetwork_Year   | Texte  | 255        |            |          |               | Indique la date de création du sous réseau du réseau principal, ce champ peut être vide |
| Owner             | Text   | 255        |            |          |               | Propriétaire du réseau  |
| Administrator     | Text   | 255        |            |          |               | Gestionnaire du réseau  |
| OriginPoint       | Texte  | 255        |            |          |               | Précise le lieu où se situe le point géodésique fondamental                             |
| NetworkAccuracy-H | Double | 255        |            | Vide     |               | Indique la précision horizontale du réseau  |
| NetworkAccuracy-V | Double | 255        |            | dd.dddm  |               | Indique la précision verticale du réseau  |
| Comments          | Texte  | 64000      |            |          |               |   |

#### 5.2.4.6 Structuration de la donnée des mesures de données GNSS brutes CORS- Table : MESURES BRUTES

Les champs présentés dans la table ci-dessous permettent d'identifier les métadonnées des fichiers de données brutes des sites CORS. Les requêtes dans la table attributaire suivante permettront à l'utilisateur d'accéder aux données brutes GNSS au format RINEX.

Table 5.7: Liste descriptive des champs de la table descriptive d'un fichier RINEX

| Nom du champ | Type | Intervalle              | Format     | Critère  | Exemple      | Description                  |
|--------------|------|-------------------------|------------|----------|--------------|------------------------------|
| PrimaryKey   | Text | 255                     | NuméroAuto | Non vide |              | Clé primaire                 |
| Filename     | Text | 255                     |            | Non vide | FUGR251a.xxx | Nom au format IGS du fichier |
| PointName    | Text | 255                     |            | Non vide | FUGR         | Nom du point au format IGS   |
| Fileformat   | Text | 255                     |            | Nonvide  | Rinex 2.11   | Ormat du Rinex               |
| Timezone     | Text | 255                     |            | Non vide | UTC          | Fuseau horaire               |
| Date_start   | Date | 01/01/1900 - 31/12/9999 | dd/mm/yyyy | Non vide | 10/10/2022   | Jour début de fichier        |
| Time_start   | Time | 00 :00 :00 – 23 :59 :59 | hh:mm :ss  | Non vide | 12 :34 :56   | Heure début du fichier       |
| Date_end     | Date | 01/01/1900 - 31/12/9999 | dd/mm/yyyy | Non vide | 10/10/2022   | Jour fin de fichier          |
| Time_end     | Time | 00 :00 :00 – 23 :59 :59 | hh:mm :ss  | Non vide | 12 :34 :56   | Heure fin du fichier         |

### 5.2.4.7 Structuration de la donnée des mesures de données des intervenants

Les informations contenues dans les tables attributaires seront amenés à évoluer et à être mises à jour au fur et à mesure des interventions de partenaires soit pour l'installation, la maintenance ou le retrait de station CORS, soit pour la détermination de points géodésiques et/ou de nivellement.

Table 5.8: Liste descriptive des champs de la table descriptive d'une fiche d'intervenent

| Nom du champ          | Type | Intervalle              | Format                                       | Critère  | Exemple  | Description                            |
|-----------------------|------|-------------------------|--|----------|--|--|
| PrimaryKey            | Text | 255                     | NuméroAuto                                   | Non vide |  | Clé primaire                           |
| Company               | Text | 255                     |  | Non vide | GEOID  | Nom de la société                      |
| Adress                | Text | 255                     |  | Non vide | Xxx  | Adresse de la société                  |
| Name                  | Text | 255                     |  |          | MARTIN   | Nom de l'intervenent                   |
| Phone                 | Text | 255                     |  | Non vide | 00221xxxx  | Téléphone fixe                         |
| Mail                  | Text | 255                     | <a href="mailto:xxx@xxx.com">xxx@xxx.com</a> |          | <a href="mailto:s.xyz@fugro.com">s.xyz@fugro.com</a> | Mail                                   |
| InterventionDateStart | Date | 01/01/1900 - 31/12/9999 | dd/mm/yyyy                                   | Non vide | 10/10/2022   | Date de début d'intervention           |
| InterventionDateEnd   | Date | 01/01/1900 - 31/12/9999 | dd/mm/yyyy                                   | Non vide | 10/10/2022   | Date de fin d'intervention             |
| InterventionType      | Text | 255                     |  | Non vide | Levé de nivellement                                  | Types d'intervention                   |
| InterventionPurpse    | Text | 255                     |  | Non vide | Xxxx   | Raison de l'intervention               |
| Report                | BLOB | <file>                  | Pdf/doc                                      | Nonvide  | <file>   | Rapport d'intervention et de résultats |

## 5.2.5 Liste de valeurs des tables attributaires des réseaux géodésiques et de nivellement

Les tables attributaires seront renseignées avec les réseaux suivants tels qu'identifiés lors des phase 1 et 2.

Table 5.9: Liste des réseaux du Référentiel géodésique RRS04 (réalisation particulière de l'ITRF2000 Époque 2004.56)

| Nom de Réseau / Sous-réseau  | Source | Description   |
|------------------------------|--------|---|
| RGPS                         |        | Réseau GNSS Permanent du Sénégal  |
| RRS1                         |        | Réseau de Référence du Sénégal ordre 1 – 20 points  |
| RRS2                         |        | Réseau de Référence du Sénégal ordre 2 – 137 points   |
| RRS3/RRUS                    |        | Réseau de Référence Urbain du Sénégal. Ces points de densification urbain établis par la DTGC regroupent les points de deux campagnes : RRUS11 et RRUS-2020 |
| RRS3/RRCS/RRCRS_Dakar        |        | Points géodésiques du Réseau de Référence Régional du Cadastre du Sénégal pour la région de Dakar.  |
| RRS3/RRCS/RRCRS_Diourbel     |        | Points géodésiques du Réseau de Référence Régional du Cadastre du Sénégal pour la région de Diourbel  |
| RRS3/RRCS/RRCRS_Fatick       |        | Points géodésiques du Réseau de Référence Régional du Cadastre du Sénégal pour la région de Fatick  |
| RRS3/RRCS/RRRCRS_Kaffrine    |        | Points géodésiques du Réseau de Référence Régional du Cadastre du Sénégal pour la région de Kaffrine  |
| RRS3/RRCS/RRRCRS_Kaolack     |        | Points géodésiques du Réseau de Référence Régional du Cadastre du Sénégal pour la région de Kaolack   |
| RRS3/RRCS/RRRCRS_Kédougou    |        | Points géodésiques du Réseau de Référence Régional du Cadastre du Sénégal pour la région de Kédougou  |
| RRS3/RRCS/RRRCRS_Kolda       |        | Points géodésiques du Réseau de Référence Régional du Cadastre du Sénégal pour la région de Kolda   |
| RRS3/RRCS/RRRCRS_Louga       |        | Points géodésiques du Réseau de Référence Régional du Cadastre du Sénégal pour la région de Louga   |
| RRS3/RRCS/RRRCRS_Matam       |        | Points géodésiques du Réseau de Référence Régional du Cadastre du Sénégal pour la région de Matam   |
| RRS3/RRCS/RRRCRS_Saint-Louis |        | Points géodésiques du Réseau de Référence Régional du Cadastre du Sénégal pour la région de Saint-Louis   |
| RRS3/RRCS/RRRCRS_Sédhiou     |        | Points géodésiques du Réseau de Référence Régional du Cadastre du Sénégal pour la région de Sédhiou   |
| RRS3/RRCS/RRRCRS_Tambacounda |        | Points géodésiques du Réseau de Référence Régional du Cadastre du Sénégal pour la région de Tambacounda   |
| RRS3/RRCS/RRRCRS_Thiès       |        | Points géodésiques du Réseau de Référence Régional du Cadastre du Sénégal pour la région de Thiès   |
| RRS3/RRCS/RRRCRS_Ziguinchor  |        | Points géodésiques du Réseau de Référence Régional du Cadastre du Sénégal pour la région de Ziguinchor  |

Table 5.10: Liste des réseaux des autres référentiels géodésiques

| Nom de Réseau       | Source | Description  |
|---------------------|--------|--|
| RGHS                |        | Réseau Géodésiques Historiques du Sénégal  |
| RGHS /Hatt          |        | Réseau géodésique historique du Sénégal dans la zone du Cap Vert et du Grand Dakar                                   |
| RGHS /WGS84-ASECNA  |        | Réseau géodésique historique utilisé pour le géoréférencement de la navigation aérienne                              |
| RGHS /OMVS79        |        | Réseau géodésique historique pour l'Organisation pour la Mise en Valeur du fleuve Sénégal                            |
| RGHS /OMVG78        |        | Réseau géodésique historique pour l'Organisation pour la Mise en Valeur du fleuve Gambie                             |
| RGHS /Datum_Point58 |        | Réseau géodésique historique qui apparaît sous plusieurs nominations (12ème Parallèle, Adindan, Yoff datum, Yoff200) |
| RGHS /ADOS-NWC972   |        | Réseau géodésique historique ADOS-NWC972 (ou WGS72 Precise Ephemeris)  |

Table 5.11: Liste des gestionnaires du RGPS

| Nom des Gestionnaires du RGPS | Description                                     |
|-------------------------------|---|
| ANAT/DTGC                     | CORS publique du gestionnaire ANAT/DTGC         |
| ANAT/DTGC & SONEL             | CORS publique du gestionnaire ANAT/DTGC & SONEL |
| SC-Afrique                    | CORS privée du gestionnaire SC-Afrique          |
| SWAN                          | Réseau de CORS privées du gestionnaire SWAN     |
| Cadastre de Saint Louis       | CORS publique du Cadastre de Saint Louis        |
| Cadastre de Louga             | CORS publique du Cadastre de Louga              |

Table 5.12: Liste des réseaux du Référentiel altimétrique NGAO43

| Nom de Réseau       | Source | Description                              |
|---------------------|--------|--|
| RNGS                |        | Réseau de Nivellement Général du Sénégal |
| RNGS1, RNGS2, RNGS3 |        | pour les différents ordres               |

## 5.2.6 Requêtes

Afin de retrouver les informations utiles à son projet, l'utilisateur (non-administrateur de la base de données) pourra exécuter des requêtes à partir du portail en utilisant les informations stockées dans la table attributaire et d'un affichage de carte afin d'accéder aux résultats suivants :

Pour les CORS

- Affichage pour consultation en ligne des informations relatives aux stations CORS (fiches d'identité et / ou fiche journal (*log sheets*))
- Téléchargement des fichiers de données GNSS brutes enregistrées par les CORS

Pour les points géodésiques et de nivellement

- Affichage pour consultation en ligne des informations relatives aux fiches de points géodésiques ou de nivellement sélectionnées
- Téléchargement des fiches descriptives

Ces requêtes pourront être organisés de la façon suivante :

1. En premier lieu, il faudra distinguer si l'utilisateur souhaite consulter des données CORS ou des données géodésiques ou de nivellement. La requête suivante pour être appliquée en premier pour afficher les types de points à consulter :
  - a. **Choix d'affichage du type de point** (CORS ou Points Géodésique ou Repères de nivellement).
2. Dans un deuxième temps, l'utilisateur devra faire une recherche de points puis valider sa recherche afin de les mettre dans un panier de sélection. Les requêtes suivantes pourront être proposées :
  - a. **Recherche de points par sélection attributaire**
    - i. Selon champ Matricule (Acronym)
    - ii. Selon champ Province ou région
    - iii. Selon champ Coordonnées (entrée manuelle des coordonnées (ou pointage sur la carte) et d'un rayon défini par l'utilisateur
    - iv. Selon champ Catégorie (Point de Nivellement / géodésique)
    - v. Selon champ Ordre (1,2,3)
  - b. **Recherche de points par sélection géospatiale**
    - i. Selon une zone- buffer (zone géographique rectangulaire) définie manuellement
    - ii. Selon coordonnées d'un point choisi à l'écran et d'un rayon défini par l'utilisateur
    - iii. Selon carte affichée à l'écran (zoom courant)

3. Finalement pour des données CORS, une fois la recherche de points exécutée, l'utilisateur pourra finaliser sa sélection dans le panier en exécutant les requêtes suivantes :
  - a. **Sélectionner des points** à retenir pour le téléchargement de données brutes GNSS

**Cas des fiches d'identité CORS ou logsheet**

- b. **Effectuer une consultation en ligne des éléments sélectionnés :**
- c. **Effectuer le téléchargement**
  - i. des fiches de site CORS
  - ii. des logsheet des CORS

**Cas des fichiers de données GNSS brutes CORS**

- d. **Choisir des périodes de temps** à télécharger (Jour/heure début – jour/heure fin)
- e. **Choisir un serveur de téléchargement**
- f. **Effectuer téléchargement** des données brutes GNSS

4. Finalement dans le cas la consultation ou téléchargement des données géodésiques et/ou de nivellement, une fois la recherche de points exécutée, l'utilisateur pourra finaliser sa sélection dans le panier en exécutant les requêtes suivantes :
  - a. **Choix des points à retenir.**
  - b. **Effectuer une consultation en ligne** des fiches de points géodésiques ou de nivellement sélectionnées
  - c. **Effectuer téléchargement** des fiches (format pdf)

Le schéma ci-dessous présente le processus de ces requêtes.

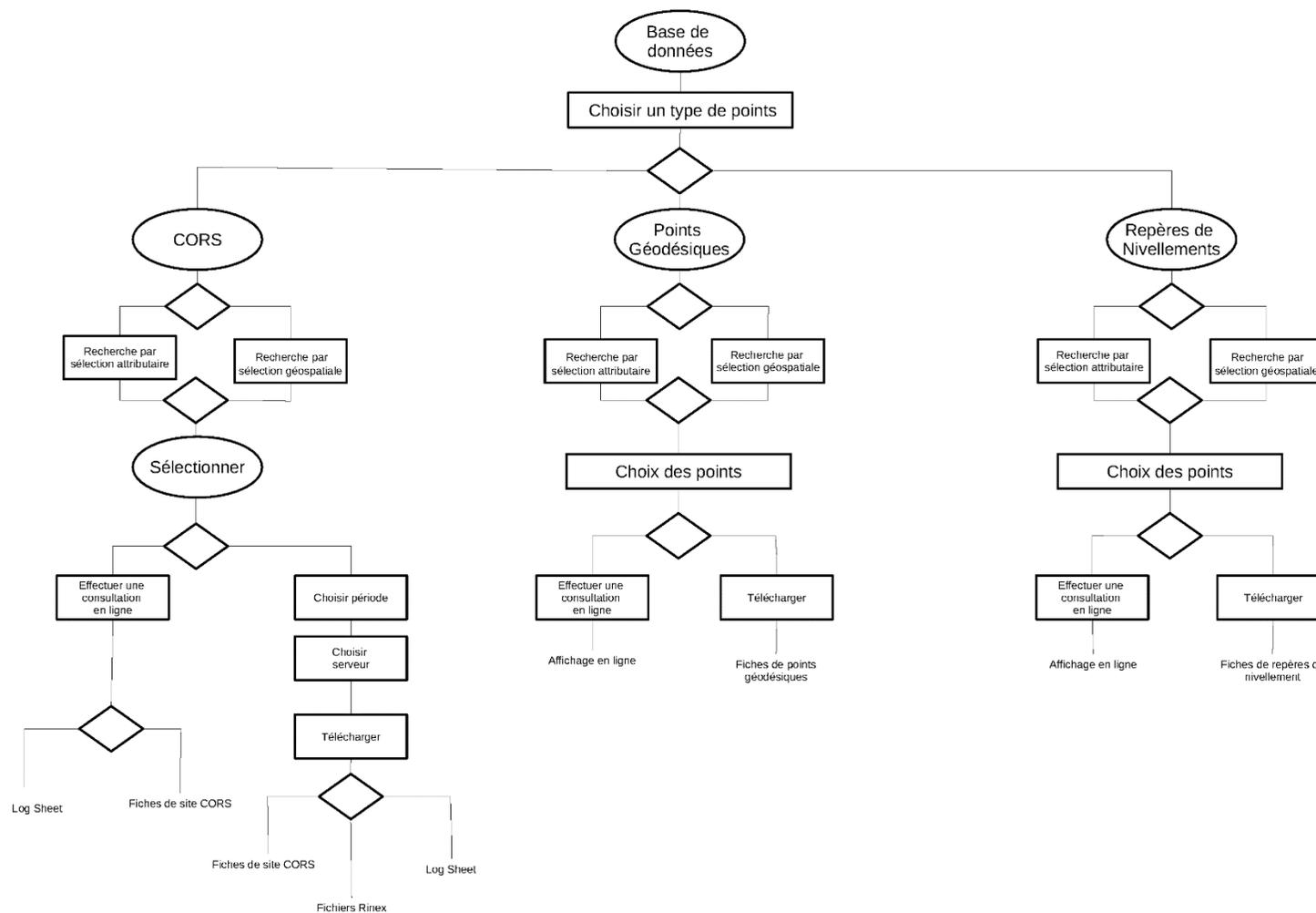


Figure 5.3: Processus de requêtes

## 5.3 Préconisation pour l'affichage en ligne

### 5.3.1 Introduction

La base de données géographique ainsi créée peut-être publiée en ligne en utilisant plusieurs méthodes. Toutefois, le choix de la méthode appropriée dépend de différents facteurs parmi lesquels : le cout des solutions matérielles choisies, la disponibilité de personnel qualifié pour la maintenance de la solution choisie, le nombre d'utilisateurs et le nombre et complexité des fonctionnalités choisies.

### 5.3.2 Serveur de fiches géodésiques et de portail d'accès aux CORS

La Figure 5.4 présente un exemple de portail cartographique d'interrogation des fiches géodésiques de l'IGN France. Il s'agit d'un portail assez simple avec des outils de navigation standard et un outil d'interrogation qui permet d'ouvrir et visualiser la fiche associée à chaque point. Similairement, ce portail existe pour les fiches de points de nivellement.

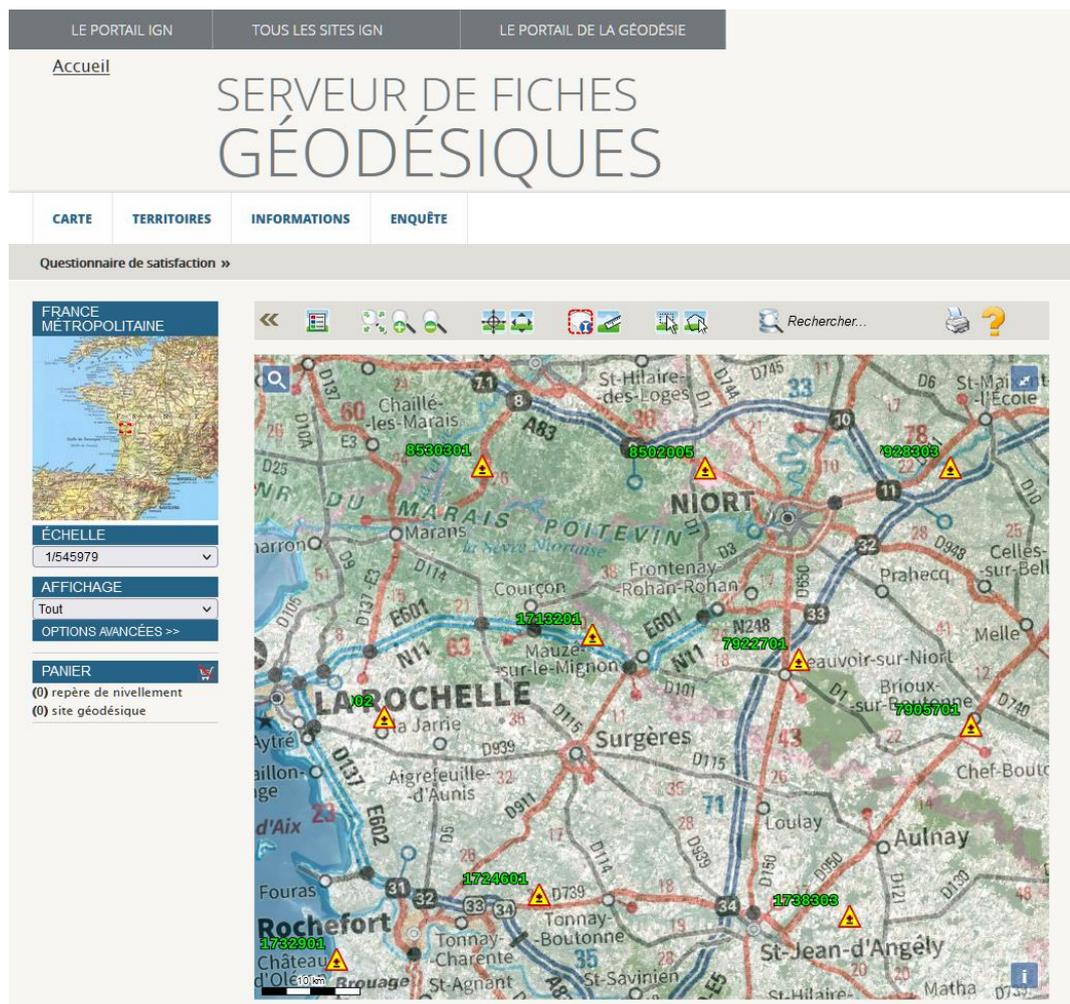


Figure 5.4: Exemple de portail cartographique pour la visualisation et interrogation d'un serveur de fiche d'un réseau géodésique et nivellement (IGN France)

La Figure 5.5 présente le portail permettant l'accès aux données GNSS du réseau permanent CORS (IGN France). Le portail est également assez simple, il permet en cliquant sur un point d'accéder à la fiche d'identité de la station CORS en ligne (Figure 5.6) et d'accéder à un outil permettant de sélectionner des données brutes du site sélectionné (Figure 5.7).

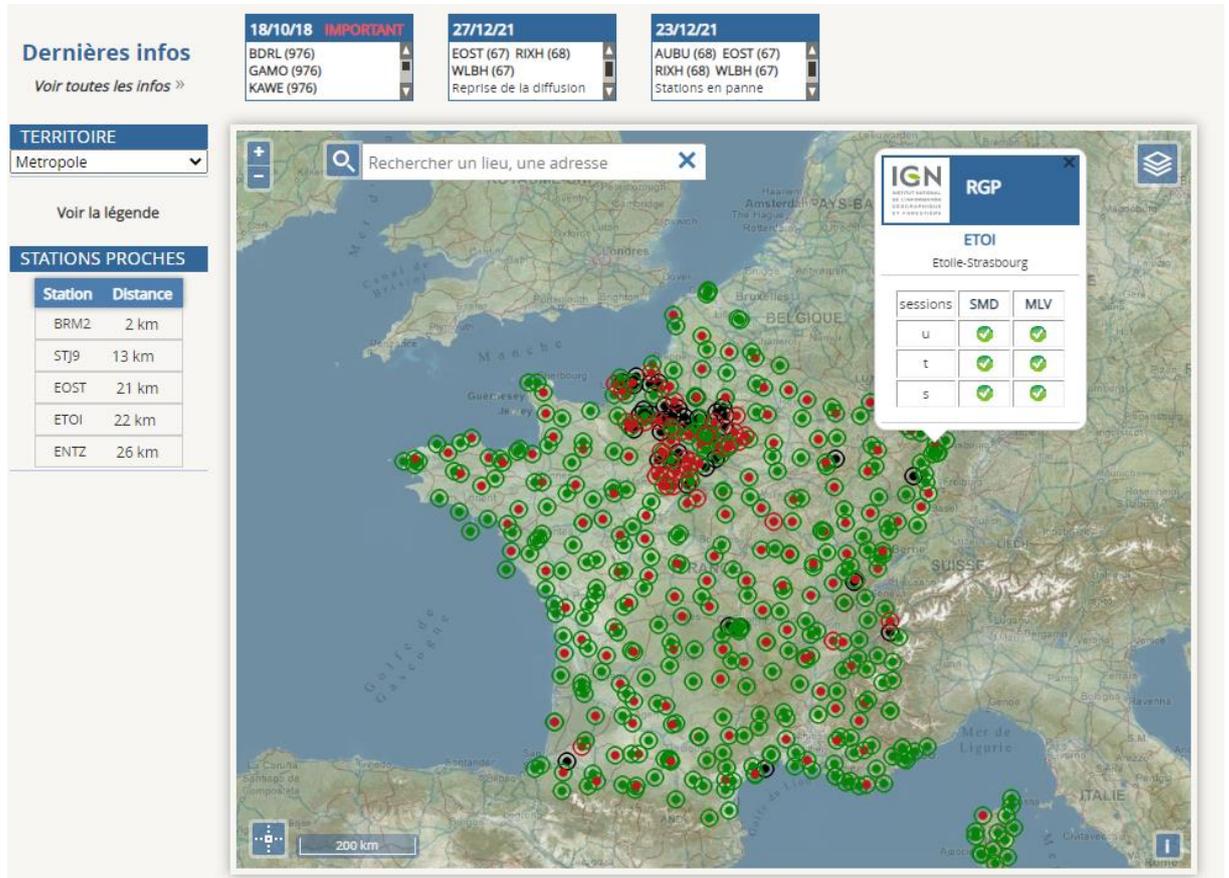


Figure 5.5: Exemple de portail cartographique pour la fourniture de données brutes CORS (IGN France)

**FICHE DE STATION**

**ETOI - Etoile-Strasbourg**

Identité de la station » | Coordonnées de la station » | Équipement de la station » | Qualité du site » | Qualité des données » | Séries temporelles »

**Identité de la station**

| Renseignements                                 |  |
|--|--|
| Acronyme                                       | ETOI   |
| Acronyme à 9 caractères                        | ETOI00FRA                                      |
| Nom  | Etoile-Strasbourg                              |
| Numero DOMES                                   | 10014M004                                      |
| Mise en service                                | 15/11/2014                                     |
| Classe »                                       | GPK  |
| Constellations suivies*                        | GPS+GLONASS+GALILEO+BEIDOU+IRNSS               |
| Constellations diffusées en rinex 2 par le RGP | GPS+GLONASS+GALILEO                            |
| Liste des observables                          | L1L2C1C2P2D1D2S1S2L5C5D5S5<br>L7C7D7S7L8C8D8S8 |
| Session d'enregistrement                       | 1h   |
| Cadence d'enregistrement                       | 1s   |
| Propriétaire                                   | Eurometropole de Strasbourg                    |
| Gestionnaire                                   | Eurometropole de Strasbourg                    |

\* Cette information, fournie par le propriétaire de la station, fait état des capacités du matériel pour les usages qui lui sont propres.

Figure 5.6: Fiche de station CORS (IGN France)

**RECHERCHE**    **AFFICHAGE ET SÉLECTION**    **PANIER**

Valider les filtres >>

**PÉRIODE**

Début : 28/12/2021

Heures : de 8h à 17h

TU    O

Heure locale

Fin : 28/12/2021

**TYPE DE DONNÉES \***

GPS (obligatoire) toutes les observables avec les suivantes :  
 C2     L5  
 Attention, certains logiciels ne sont pas compatibles avec C2 et L5

GLONASS toutes les observables

GALILEO toutes les observables

**Echantillonnage**

1s     5s  
 10s     15s  
 30s

**Version Rinex**

2.10     2.11

\* Les fichiers de navigation et les calibrations absolues des antennes sont automatiquement envoyés lors du téléchargement

**AFFICHAGE CARTE**

Voir la légende

Choix du territoire

4 stations sélectionnées (12 max)

BRM2 EOST ETOI STJ9

Rechercher un lieu, une adresse

28/12/2021 de 8h à 17h (TU), sur 1 jour

BRM2

EOST

ETOI

STJ9

SDK version 1.0.0 (2017-12-21)

Figure 5.7: Outil d'accès aux données brutes CORS (IGN France)

### 5.3.3 Solutions existantes de SIG pour cartographie en ligne

Parmi les solutions de SIG pour cartographie en ligne, les principaux services (ESRI avec ArcGIS Server par exemple) sont propriétaires et payants, ce qui implique l'achat et la mise à jour de licences. De ce fait, la pérennité du service internet et des cartes se trouve contraint sur le long terme.

Une solution similaire mais non payante est QGIS server : une solution *open source* mature et maintenue qui a pour principe de transposer le SIG libre QGIS desktop sur la Toile. En pratique, cette solution est plus compliquée à mettre en œuvre car elle peut demander des efforts de programmation.

Il y a aussi la possibilité d'utiliser des serveurs et clients cartographiques de type MapServer ou GeoServer, avec des clients cartographiques de type Leaflet ou les bibliothèques javascript Openlayers. Ces technologies sont également *open source* et elles bénéficient comme QGIS d'une communauté très importante d'utilisateurs, ce qui implique une large documentation et une certaine garantie pour leur pérennité.

Évidemment, ces avantages ont leurs inconvénients : comme pour QGIS, ces solutions sont plus lourdes à mettre en place et peuvent nécessiter un effort de programmation.

Quant à l'hébergement ainsi que la maintenance du service Web, il est soit assuré par le maître d'œuvre lui-même (matériels, logiciels, bande passante Internet personnels compétents), soit il est externalisé à un hébergeur.

Il est crucial ici de déterminer les différentes catégories

- Internes et/ou,
- Externes (publics).

Des utilisateurs "clients finaux" devant avoir accès et ce en termes de

- Fonctionnalités (vues/pages, requêtes, lecture, édition...),
- Nombre (accès potentiel maximal en parallèle estimé pour une période donnée).

Toutefois, à ce jour, l'état actuel des connaissances des besoins et des ressources disponibles au sein des services de l'ANAT-DTGC et du Cadastre ne permet pas d'arrêter définitivement les meilleures options pour la publication des données en ligne.

Il est recommandé de réaliser un audit approfondi pour identifier les besoins concrets des utilisateurs en termes de visualisation et d'interrogation des données, identifier les moyens humains et matériels disponibles et décider d'une solution d'hébergement pour pouvoir choisir entre :

- une solution payante de type ESRI hébergée et maintenue à l'extérieur;

- un solution payante de type ESRI hébergée et maintenue dans le Service (ANAT-DTGC a priori);
- une solution *open source* de type QGIS Server hébergée et maintenue à l'extérieur ;
- une solution *open source* type QGIS Server hébergée et maintenue dans le service (ANAT-DTGC a priori).

## 6. Conclusion

Cette troisième et dernière phase a permis de répondre aux quatre derniers objectifs spécifiques de l'étude de faisabilité : (i) les spécifications pour la mise en œuvre des opérations de modernisation et d'amélioration de l'infrastructure géodésique nationale, (ii) les modalités de maintenance des stations GNSS permanentes, (iii) la description des solutions techniques permettant de définir les algorithmes de transformation des systèmes locaux existants vers le système de référence en vigueur, et (iv) le système de modélisation de la base de données géoréférencée normalisée.

L'étude des spécifications techniques et meilleures pratiques pour la mise en œuvre des opérations de modernisation de l'infrastructure géodésique a permis de détailler la mise en place du réseau de CORS, dont l'évaluation et la validation du système, le déploiement des CORS et du CCR, l'exploitation et la maintenance du réseau, les communications et transmissions de données entre le CCR, les CORS et les utilisateurs, le contrôle d'intégrité du réseau, dont les surveillances en temps réel et en temps différé ainsi que la gestion des alarmes, et enfin la maintenance du réseau, dont les éléments de son financement et les besoins en formation.

L'étude des méthodologies de transformation géodésique depuis les référentiels historiques vers le référentiel en vigueur ou son successeur éventuel a rappelé les tenants et aboutissants des transformations géodésiques, présenté les caractéristiques des différents types de transformations géodésiques envisageables ainsi que l'approche recommandée, décrit les caractéristiques du référentiel géodésique en vigueur ainsi que des possibilités de sa mise à jour, détaillé les différents modèles de transformation possibles et enfin ébauché les transformations probables pour les différents référentiels historiques identifiés.

L'étude du système de modélisation de la base de données géodésiques normalisée a permis de présenter brièvement le système existant puis de décrire en détail la structuration de la future base de données géodésiques – interopérable pour être utilisée avec d'autres applications –, la codification, le schéma conceptuel de la base de données, les tables attributaires et la liste des valeurs correspondantes, les requêtes, et enfin les préconisations pour l'affichage en ligne concernant le serveur de fiches géodésiques et le portail d'accès aux données des CORS.

Le fichier des points (CORS du RGPS, bornes géodésiques et repères de nivellement des différents réseaux), est la base du futur système de modélisation de la base de données géodésiques. Son établissement s'appuie sur les résultats des phases 1 et 2 au cours desquelles ont été caractérisés les réseaux géodésiques existants. Bien que la composante altimétrique ne fasse pas partie du cahier des charges, il est apparu indispensable de mentionner une table attributaire dédiée aux réseaux de nivellement. En outre, la base de données devra inclure les informations des personnels autorisés à la renseigner ou à l'éditer à l'issue des interventions sur le terrain (levés, maintenance, etc...), ainsi qu'une table

attributaire contenant les informations des fichiers de données GNSS brutes concaténées en fichiers horaires et journaliers des CORS.

Des requêtes simples basées sur une sélection géospatiale ou attributaire permettront de fournir toutes les informations nécessaires à l'utilisateur : soit des fichiers de données brutes GNSS pour les calculs des levés topographiques standards en modes post-traités (statique ou cinématique) ou les calculs scientifiques (géodésie, géophysique, géodynamique, météorologie...), soit des fiches signalétiques des bornes et repères permettant d'effectuer des opérations de levés et implantations par GNSS (au moyen de récepteurs géodésiques), tachéométrie (au moyen de stations totales), et nivellement (au moyen de niveaux).

Ces informations structurées et rangées sous la forme d'un SIG pourront être transposées sous la forme d'un portail internet (du type du Géoportail IGN France) permettant à l'utilisateur d'accéder aux ressources et d'extraire des données, des métadonnées et des informations géodésiques depuis le système d'informations.

## 7. Annexes : exemple de log sheet de CORS (Source IGN)

ETOI Site Information Form (site log)

International GNSS Service

See Instructions at:

[ftp://igscb.jpl.nasa.gov/pub/station/general/sitelog\\_instr.txt](ftp://igscb.jpl.nasa.gov/pub/station/general/sitelog_instr.txt)

### 0. Form

Prepared by (full name) : RGP Team  
 Date Prepared : 2019-03-01  
 Report Type : UPDATE  
 If Update:  
 Previous Site Log : etoi\_20170321.log  
 Modified/Added Sections : 3.2, 3.3

### 1. Site Identification of the GNSS Monument

Site Name : Etoile-Strasbourg  
 Four Character ID : ETOI  
 Monument Inscription :  
 IERS DOMES Number : 10014M004  
 CDP Number : (A4)  
 Monument Description : INOX TRIANGULAR PLATE ON TOP OF A STEEL TUBE  
 Height of the Monument : (m)  
 Monument Foundation : (STEEL RODS, CONCRETE BLOCK, ROOF, etc)  
 Foundation Depth : (m)  
 Marker Description : TOP AND CENTRE OF THE INOX TRIANGULAR PLATE  
 Date Installed : 2014-10-30T00:00Z  
 Geologic Characteristic : (BEDROCK/CLAY/CONGLOMERATE/GRAVEL/SAND/etc)  
 Bedrock Type : (IGNEOUS/METAMORPHIC/SEDIMENTARY)  
 Bedrock Condition : (FRESH/JOINTED/WEATHERED)  
 Fracture Spacing : (0 cm/1-10 cm/11-50 cm/51-200 cm/over 200 cm)  
 Fault zones nearby : (YES/NO/Name of the zone)  
 Distance/activity : (multiple lines)  
 Additional Information : (multiple lines)

### 2. Site Location Information

City or Town : Strasbourg  
 State or Province : Bas-Rhin (67)  
 Country : France  
 Tectonic Plate : EURASIAN  
 Approximate Position (ITRF)  
 X coordinate (m) : 4189647.33  
 Y coordinate (m) : 570355.26  
 Z coordinate (m) : 4759464.51  
 Latitude (N is +) : +483423.61  
 Longitude (E is +) : +0074508.18

Elevation (m,ellips.) : 233.7  
 Additional Information : (multiple lines)

### 3. GNSS Receiver Information

3.1 Receiver Type : LEICA GRX1200+  
 Satellite System : GPS+GLO+GAL  
 Serial Number : 495468  
 Firmware Version : 8.01  
 Elevation Cutoff Setting : 3 deg  
 Date Installed : 2014-10-30T00:00Z  
 Date Removed : 2017-03-16T00:00Z  
 Temperature Stabiliz. : none  
 Additional Information : (multiple lines)

3.2 Receiver Type : LEICA GRX1200+  
 Satellite System : GPS+GLO+GAL  
 Serial Number : 495468  
 Firmware Version : 9.2  
 Elevation Cutoff Setting : 3 deg  
 Date Installed : 2017-03-16T00:00Z  
 Date Removed : 2019-02-28T17:00Z  
 Temperature Stabiliz. : none  
 Additional Information :(multiple lines)

3.3 Receiver Type : LEICA GR30  
 Satellite System : GPS+GLO+GAL  
 Serial Number : 1706643  
 Firmware Version : 4.31.101  
 Elevation Cutoff Setting : 3 deg  
 Date Installed : 2019-02-28T17:00Z  
 Date Removed :(CCYY-MM-DDThh:mmZ)  
 Temperature Stabiliz. : none  
 Additional Information :(multiple lines)

3.x Receiver Type : (A20, from rcvr\_ant.tab; see instructions)  
 Satellite System : (GPS+GLO+GAL+BDS+QZSS+SBAS)  
 Serial Number : (A20, but note the first A5 is used in SINEX)  
 Firmware Version : (A11)  
 Elevation Cutoff Setting : (deg)  
 Date Installed : (CCYY-MM-DDThh:mmZ)  
 Date Removed : (CCYY-MM-DDThh:mmZ)  
 Temperature Stabiliz. : (none or tolerance in degrees C)  
 Additional Information : (multiple lines)

### 4. GNSS Antenna Information

4.1 Antenna Type : LEIAR20 LEIM  
 Serial Number : 16247004  
 Antenna Reference Point : BAM  
 Marker->ARP Up Ecc. (m) : 0.0000  
 Marker->ARP North Ecc(m) : 0.0000  
 Marker->ARP East Ecc(m) : 0.0000  
 Alignment from True N : 0 deg  
 Antenna Radome Type : LEIM

Radome Serial Number  
 Antenna Cable Type : (vendor & type number)  
 Antenna Cable Length : 32 m  
 Date Installed : 2014-10-30T00:00Z  
 Date Removed : CCYY-MM-DDThh:mmZ  
 Additional Information : (multiple lines)

4.x Antenna Type : (A20, from rcvr\_ant.tab; see instructions)  
 Serial Number : (A\*, but note the first A5 is used in SINEX)  
 Antenna Reference Point : (BPA/BCR/XXX from "antenna.gra"; see instr.)  
 Marker->ARP Up Ecc. (m) : (F8.4)  
 Marker->ARP North Ecc(m) : (F8.4)  
 Marker->ARP East Ecc(m) : (F8.4)  
 Alignment from True N : (deg; + is clockwise/east)  
 Antenna Radome Type : (A4 from rcvr\_ant.tab; see instructions)  
 Radome Serial Number :  
 Antenna Cable Type : (vendor & type number)  
 Antenna Cable Length : (m)  
 Date Installed : (CCYY-MM-DDThh:mmZ)  
 Date Removed : (CCYY-MM-DDThh:mmZ)  
 Additional Information : (multiple lines)

## 5. Surveyed Local Ties

5.x Tied Marker Name :  
 Tied Marker Usage : (SLR/VLBI/LOCAL CONTROL/FOOTPRINT/etc)  
 Tied Marker CDP Number : (A4)  
 Tied Marker DOMES Number : (A9)  
 Differential Components from GNSS Marker to the tied monument (ITRS)  
 dx (m) : (m)  
 dy (m) : (m)  
 dz (m) : (m)  
 Accuracy (mm) : (mm)  
 Survey method : (GPS CAMPAIGN/TRILATERATION/TRIANGULATION/etc)  
 Date Measured : (CCYY-MM-DDThh:mmZ)  
 Additional Information : (multiple lines)

## 6. Frequency Standard

6.1 Standard Type : INTERNAL  
 Input Frequency : (if external)  
 Effective Dates : 2014-10-30/CCYY-MM-DD  
 Notes : (multiple lines)

6.x Standard Type : (INTERNAL or EXTERNAL H-MASER/CESIUM/etc)  
 Input Frequency : (if external)  
 Effective Dates : (CCYY-MM-DD/CCYY-MM-DD)  
 Notes : (multiple lines)

## 7. Collocation Information

7.x Instrumentation Type : (GPS/GLONASS/DORIS/PRARE/SLR/VLBI/TIME/etc)

Status : (PERMANENT/MOBILE)  
 Effective Dates : (CCYY-MM-DD/CCYY-MM-DD)  
 Notes : (multiple lines)

## 8. Meteorological Instrumentation

8.1.x Humidity Sensor Model :  
 Manufacturer :  
 Serial Number :  
 Data Sampling Interval : (sec)  
 Accuracy (% rel h) : (% rel h)  
 Aspiration : (UNASPIRATED/NATURAL/FAN/etc)  
 Height Diff to Ant : (m)  
 Calibration date : (CCYY-MM-DD)  
 Effective Dates : (CCYY-MM-DD/CCYY-MM-DD)  
 Notes : (multiple lines)

8.2.x Pressure Sensor Model :  
 Manufacturer :  
 Serial Number :  
 Data Sampling Interval : (sec)  
 Accuracy : (hPa)  
 Height Diff to Ant : (m)  
 Calibration date : (CCYY-MM-DD)  
 Effective Dates : (CCYY-MM-DD/CCYY-MM-DD)  
 Notes : (multiple lines)

8.3.x Temp. Sensor Model :  
 Manufacturer :  
 Serial Number :  
 Data Sampling Interval : (sec)  
 Accuracy : (deg C)  
 Aspiration : (UNASPIRATED/NATURAL/FAN/etc)  
 Height Diff to Ant : (m)  
 Calibration date : (CCYY-MM-DD)  
 Effective Dates : (CCYY-MM-DD/CCYY-MM-DD)  
 Notes : (multiple lines)

8.4.x Water Vapor Radiometer :  
 Manufacturer :  
 Serial Number :  
 Distance to Antenna : (m)  
 Height Diff to Ant : (m)  
 Calibration date : (CCYY-MM-DD)  
 Effective Dates : (CCYY-MM-DD/CCYY-MM-DD)  
 Notes : (multiple lines)

8.5.x Other Instrumentation : (multiple lines)

## 9. Local Ongoing Conditions Possibly Affecting Computed Position

9.1.x Radio Interferences : (TV/CELL PHONE ANTENNA/RADAR/etc)  
 Observed Degradations : (SN RATIO/DATA GAPS/etc)  
 Effective Dates : (CCYY-MM-DD/CCYY-MM-DD) Additional  
 Information : (multiple lines)

9.2.x Multipath Sources : (METAL ROOF/DOME/VLBI ANTENNA/etc)  
 Effective Dates : (CCYY-MM-DD/CCYY-MM-DD) Additional  
 Information : (multiple lines)

9.3.x Signal Obstructions : (TREES/BUILDINGS/etc)  
 Effective Dates : (CCYY-MM-DD/CCYY-MM-DD) Additional  
 Information : (multiple lines)

## 10. Local Episodic Effects Possibly Affecting Data Quality

10.x Date : (CCYY-MM-DD/CCYY-MM-DD)  
 Event : (TREE CLEARING/CONSTRUCTION/etc)

## 11. On-Site, Point of Contact Agency Information

Agency : Eurometropole de Strasbourg  
 Preferred Abbreviation : NONE  
 Mailing Address : 1 place de l'Etoile  
 : 67076 Strasbourg -FRANCE

Primary Contact  
 Contact Name : Sebastien WEHRLE  
 Telephone (primary) : 00 33 (0)3 68 98 66 37 Telephone  
 (secondary) :  
 Fax :  
 E-mail : [sebastien.wehrle@strasbourg.eu](mailto:sebastien.wehrle@strasbourg.eu) Secondary

Contact  
 Contact Name : Olivier BANASZAK  
 Telephone (primary) : 00 33 (0)3 68 98 63 38 Telephone  
 (secondary) :  
 Fax :  
 E-mail : [olivier.banaszak@strasbourg.eu](mailto:olivier.banaszak@strasbourg.eu)  
 Additional Information : (multiple lines)

## 12. Responsible Agency (if different from 11.)

Agency : (multiple lines)  
 Preferred Abbreviation : (A10)  
 Mailing Address : (multiple lines)

Primary Contact  
 Contact Name :  
 Telephone (primary) :  
 Telephone (secondary) :  
 Fax :  
 E-mail :  
 Secondary Contact  
 Contact Name :

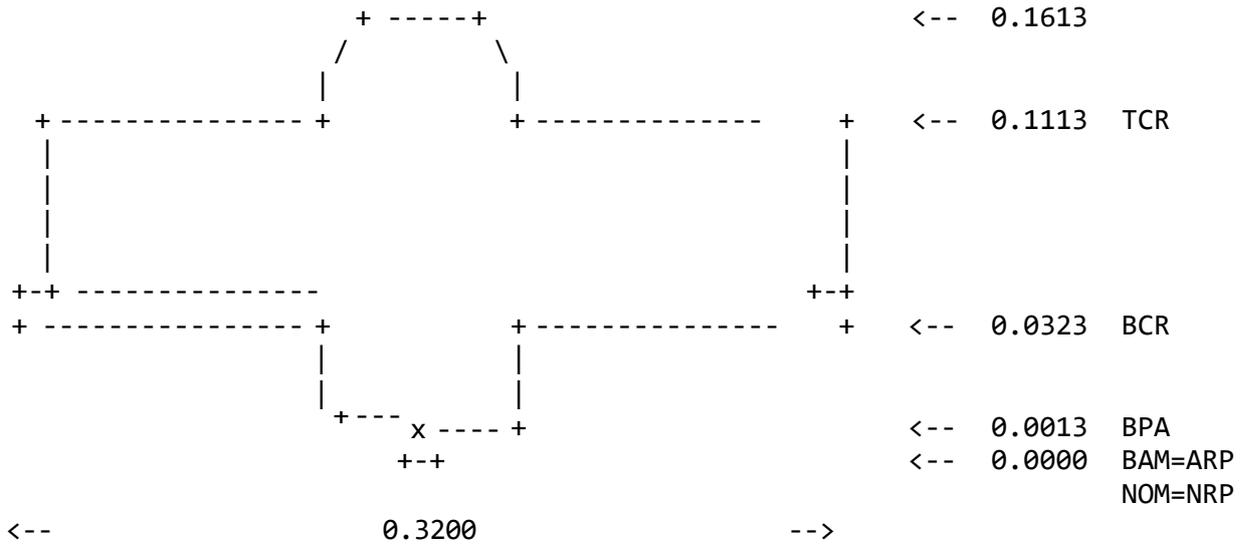
Telephone (primary) :  
 Telephone (secondary) :  
 Fax :  
 E-mail :  
 Additional Information : (multiple lines)

13. More Information

Primary Data Center : IGN / Saint-Mandé  
 Secondary Data Center : IGN / Marne la Vallée  
 URL for More Information : <http://rgp.ign.fr>  
 Hardcopy on File  
 Site Map : <http://rgp.ign.fr>  
 Site Diagram : (Y)  
 Horizon Mask : (Y)  
 Monument Description : (Y)  
 Site Pictures : (Y)  
 Additional Information : (multiple lines)

Antenna Graphics with Dimensions

LEIAR20



Fin du document