

délimitation de la frontière entre le sultanat d'oman et la république du yémen

Ilario PREVITALI – Société SINTÉGRA

SINTEGRA, société implantée à Grenoble, spécialisée en cartographie numérique et en travaux géodésiques (classiques ou GPS) a participé aux travaux d'implantation et de matérialisation de la frontière internationale entre le Sultanat d'Oman et la République du Yémen, telle qu'elle a été définie dans les accords signés par les deux états en 1992.

Ce chantier hors normes, dont les spécifications techniques ont été définies par le NSA (National Survey Authority of Oman), a été réalisé sous le contrôle d'un comité mixte Oman-Yémen (JTC / Joint Technical Committee).

Il comportait plusieurs types de travaux :

- La délimitation et la matérialisation de la frontière représentant près de 150 points sur une distance de 300 km.
- La signalisation et la détermination de points de stéréo préparation.
- La réalisation de prises de vue aériennes au 1/25 000 et au 1/50 000.
- La production d'une cartographie de la zone frontalière à différentes échelles.

Le groupement adjudicataire chargé de ces travaux était composé de plusieurs sociétés possédant de solides compétences internationales :

- **ALMABANI** société libanaise de travaux publics, chargée des travaux d'ancrage et de construction des bornes.

- **SINTEGRA** chargée de l'implantation de la position des bornes, du contrôle de leur position après construction et de la détermination des points de stéréo préparation.

Des moyens logistiques impressionnants ont été mis en œuvre pour pouvoir mener à bien une telle entreprise. Celle-ci a duré 6 mois, du mois de décembre 1993 au mois de juin 1994.

La société **ALMABANI**, responsable de la logistique, a dû construire et déplacer plusieurs fois, en plein désert, une base-vie ayant une capacité d'accueil de plus de 200 personnes !

Pour l'édification des bornes frontières principales, devant avoir des fondations de plus de 25 m de profondeur, plusieurs foreuses ont été mobilisées...

La protection fut assurée par la présence permanente de l'armée d'Oman, toute la logistique étant développée sur son territoire.

À chaque intervention sur le terrain, deux auto-mitrailleuses encadraient notre convoi...

Difficile dans ces conditions de ne pas se sentir en sécurité !

Chaque véhicule 4 x 4 était équipé d'une radio longue distance HF afin de garantir non seulement la sécurité mais aussi la synchronisation des sessions GPS.

Certains jours, la même équipe devait parcourir plus de 500 km de piste pour aller d'un point à un autre !

Quant à la navigation, dans cette région où n'existent que quelques pistes empruntées par les Bédouins, elle fut assurée également par GPS (positionnement absolu avec récepteur Trimble Flyghmate).

DÉLIMITATION DE LA FRONTIÈRE

Les spécifications techniques du NSA ont défini une ligne géodésique passant par les deux points principaux MBP1 et MBP8, situés aux deux extrémités de la frontière, respectivement au Nord-Ouest, sur la frontière avec le Royaume d'Arabie Saoudite, et au Sud-Est, sur la cote océane.

Sur cette ligne géodésique sont situés la plupart des points de la frontière. Dans la zone d'Habarut, lieu présentant un caractère historique important pour le Sultanat d'Oman, la frontière présente plusieurs coudes (Border turning Points).

Les référentiels XY et Z

Tous les travaux géodésiques sont basés sur les coordonnées et le référentiel du point MBP8.

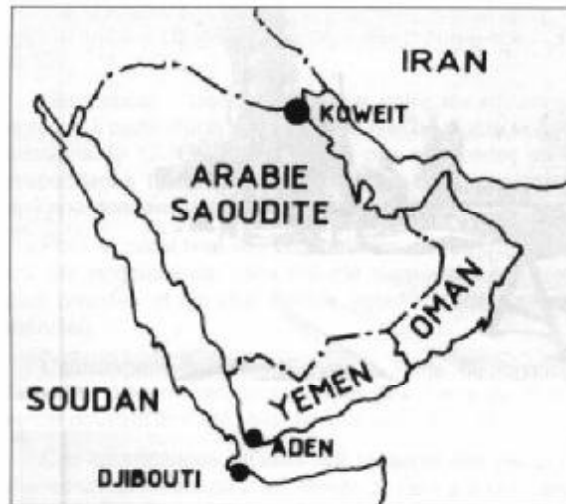
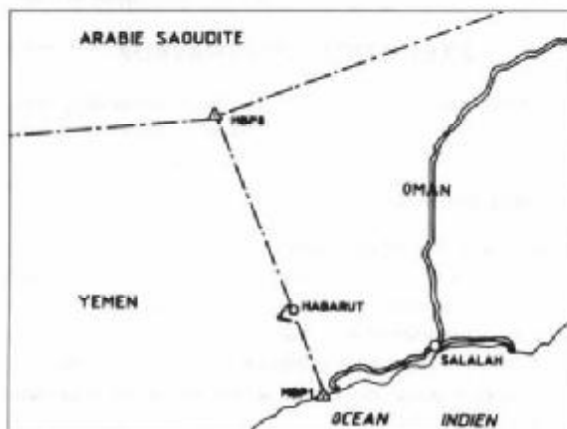
Les coordonnées de ce point, le seul point qui était matérialisé, ont été fournies dans le système WGS84, en référence au réseau CIGNET (Cooperative International GPS Network).

Ce système de coordonnées cartésien terre-centré/terre fixé représente le système de référence géodésique international le plus précis et le plus moderne. Toutes les études et les travaux menés pour la délimitation de la frontière sont référencés au système WGS84.

En altimétrie, la référence est constituée par le niveau moyen des mers (MSL).

Localement, les différences entre l'ellipsoïde WGS84 et le géoïde ont été déterminées à partir du modèle OSU91A.

Le rattachement aux systèmes géodésiques planimétriques et altimétriques nationaux d'Oman et du Yémen (projection UTM référencée à l'ellipsoïde WGS84) a été réalisé par l'observation de quelques points de référence dans chacun des deux pays.



MATÉRIALISATION DE LA FRONTIÈRE

Plusieurs catégories de points situés sur la ligne de démarcation séparant les deux pays ont été implantées et matérialisées :

Main border points : les deux points principaux extrêmes MBP1 et MBP8 ainsi que les autres points situés dans le secteur d'Habarut (Border turning points) ont été matérialisés par des piliers en béton ayant des fondations de 2 m x 2 m x 1 m ancrées dans le sol grâce à des pieux de 5 m (en terrain rocheux) à 30 m (en terrain sableux).

La tête du pilier est équipée d'une plaque de centrage dont le centre constitue le point géodésique.

Précision requise : $\pm 0,8 \text{ cm} + 1 \text{ ppm}$ par rapport à MBP8 en XY.

Secondary border points : 26 points secondaires espacés de 10 km environ et matérialisés par des piliers en béton, de la même façon que les points principaux.

Précision requise : $\pm 0,8 \text{ cm} + 2 \text{ ppm}$ par rapport au point principal le plus proche en XY.

Line markers : 58 points tertiaires espacés de 2,5 km en terrain accidenté et de 5 km en terrain dégagé, matérialisés par des balises ancrées dans le sol (5 m en terrain rocheux / 30 m en terrain sableux).

Précision requise : $\pm 0,8 \text{ cm} + 2 \text{ ppm}$ par rapport au point principal le plus proche en XY.

MÉTHODOLOGIE

Les travaux géodésiques entrepris pour la matérialisation de la frontière ont été effectués selon une méthodologie associant des mesures GPS et des mesures topométriques classiques.

L'implantation de la position finale des points situés exactement sur la frontière a été effectuée par méthode topométrique classique, à l'aide d'une station totale, à partir de deux points temporaires positionnés par GPS situés de part et d'autre de celle-ci (à 200 m environ).

Les altitudes ont été mesurées à l'aide d'un niveau optique.



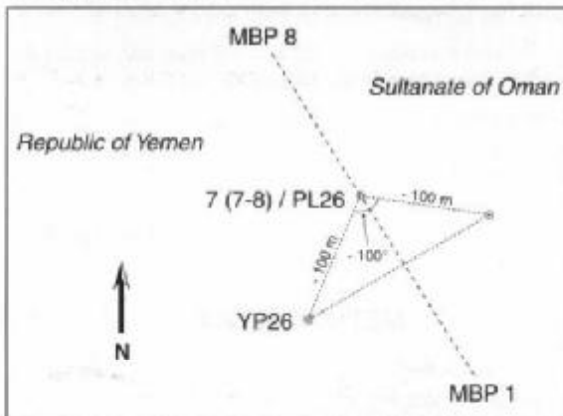
Foreuse



Base vie

Le canevas de référence nécessaire aux travaux

La réalisation des différents travaux d'implantation de la position des bornes frontalières et de leur contrôle après construction ont nécessité la matérialisation, l'observation et le calcul mis en place du canevas de points de référence suivant :



Base Survey : Détermination des coordonnées des principaux points frontaliers (MBP1/8 points intermédiaires BTP) par rapport au point de base primaire MBP8, avec une précision relative de $\pm 0,8 \text{ cm} + 1 \text{ ppm}$ soit l'équivalent de 30 cm environ entre les deux points extrêmes MBP1 et MBP8 espacés de 290 km environ.

Network Densification Survey : Détermination d'un réseau de points de 7 complémentaires rattaché au Base

Survey, disposés tous les 50 km environ le long de la frontière...

MATÉRIEL MIS EN ŒUVRE

Hardware :

- 6 récepteurs bifréquence code P Ashtech ZXII. Ces récepteurs 12 canaux fonctionnant en mode « Z tracking » ont permis de travailler sur les deux fréquences L1 et L2 avec une très bonne précision, malgré l'activation de l'antispoofing (A/S) à partir de février 1994.

- 2 stations totales Wild T1000 + D15 avec enregistrement sur module GRE

- 2 niveaux Wild NA2

Software :

- Logiciel GEONAP : ce logiciel, développé par le docteur Wubbena de la société allemande GEO ++, a été utilisé pour les calculs des plus longues bases. Ce logiciel de réputation internationale a permis l'obtention de la précision.

- Logiciel PRISM : ce logiciel développé par la société américaine Ashtech a été utilisé pour le calcul des bases courtes (jusqu'à 10 km).

- Logiciel ABSTECK : ce logiciel a été spécifiquement développé pour ce chantier. Il permet de calculer directement les éléments d'implantation d'un point situé sur une ligne géodésique à partir des 2 points GPS temporaires implantés de part et d'autre.

- Logiciel PYTHA-TOPO : ce logiciel développé par la société française MicroG assura les calculs topométriques classiques.

- Logiciel GEOID91A : ce logiciel développé par l'Université américaine de l'Ohio permet le calcul des hauteurs géoïde-ellipsoïde WGS84.



EXÉCUTION DES TRAVAUX

Outre les 142 points de frontière implantés, 190 points de canevas ont été matérialisés, observés et calculés.

Mesures sur le terrain

Mesures GPS / Modes opératoire

- Les antennes géodésiques utilisées étaient centrées sur les points observés à l'aide d'embase à plomb optique contrôlées et réglées.

- Hauteur d'antenne mesurée à l'aide d'une pige

- Cut-off angle de 10° et antennes toutes orientées dans la même direction

Base Survey : À l'époque de ces mesures (décembre 1993) l'anti-spoofing (AS) n'était pas activé. Des mesures sur le code P et sur les porteuses L1/L2 ont pu être effectuées, avec la pleine information sur celles-ci.

Compte tenu des distances à traiter, les dispositions techniques suivantes ont été adaptées :

- 2 sessions de 24 h (dont une de contrôle) afin d'éliminer les effets systématiques pouvant résulter de la rotation de la terre et des arcs d'orbites courts
- Relevé des éléments météorologiques
- Intervalle d'enregistrement : 10 sec. / Constellation : Pdp < 5 / 6 satellites

Network Densification Survey : Les 7 points de canevas de base complémentaires créés tous les 50 km environ le long de la frontière ont été rattachés au Base Survey par des observations de 6 h environ, avec des intervalles d'enregistrement de 30 s.

Line markers / Bornes frontières : L'emplacement de chaque nouvelle borne a fait l'objet d'une reconnaissance avec l'équipe de terrain du comité mixte Oman-Yémen.

Les points GPS temporaires à partir desquels les différents types de bornes frontalières ont été implantées à l'aide de mesures topométriques ont, dans un premier temps, été pré-positionnées par méthode de navigation Trimble Fiyghmate / précision de 10 à 20 m avec moyenne sur un nombre important de mesures).

Ils ont été observés par couple (vecteur contrôlé par mesures topométriques classiques), et rattachés au canevas de référence par des observations de 3 à 4 h environ, avec des intervalles d'enregistrement de 30 sec.

L'implantation de la position fut conduite en 2 phases : Premier positionnement pour le forage puis deuxième positionnement du point final sur la tête du pilier une fois celui-ci construit.

Déterminations altimétriques : Les différences dh entre chaque point de la frontière et le niveau moyen des mers (MSL) ont été calculées à partir des altitudes GPS (fournissant dh) calculées et d'un modèle global du géoïde (OSU91A fournissant dh)/ $dh = dh + dh$.

Un contrôle a été réalisé sur 2 points : le point de base MBP8 dont l'altitude MSL était connue et un repère du système de référence altimétrique national d'Oman proche d'une borne frontière. Une différence de 0,9 m a été mise en évidence. Une correction issue d'une extrapolation fut appliquée aux altitudes calculées.

Calculs et qualité des résultats GPS

Base Survey :

- Les 2 sessions de 24 h observées ont été traitées en 4 sous-sessions de 12 h environ pour déterminer la répétabilité des mesures.
- Les orbites post-calculées issues de 2 agences différentes ont été utilisées (US-NGS et CODE).
- 3 calculs différents ont été menés à partir des 2 jeux d'orbites post-calculées et d'un jeu d'orbites radiodiffusées.

Pour le vecteur le plus long (MBPI-MBPX), une différence correspondant à un offset relatif de 0,2 ppm a été mise en évidence. Cette différence a été considérée comme étant une erreur due à l'influence de la dégradation SA sur les éphémérides radiodiffusées.

Les solutions finales ont été calculées avec la combinaison linéaire L0 Ionospheric-free des 2 fréquences L1 et L2.

Répétabilité : Une comparaison entre les résultats obtenus à partir d'une session de 48 h et de quatre sous-sessions de 12 h a fait apparaître des différences correspondant à 18 cm au maximum sur les 3 composantes des coordonnées des points et à 0,6 ppm.

Pour le calcul final des vecteurs, les orbites US-NGS ont été retenues, car elles ont été supposées être les plus précises et les plus fiables (réseau d'observation mondial).

L'ajustement du Base Survey à l'aide du logiciel GNPNET a fourni les coordonnées des points de référence pouvant être utilisées dans la suite des calculs.

Ces coordonnées WGS84 ont présenté des erreurs standards de l'ordre de 2 à 7 mm en X, de 1 à 10 mm en Y et de 1 à 4 mm en Z (à 1 σ).

En relatif, par rapport au point de base MBP8, une précision planimétrique de l'ordre de $\pm 0,1$ ppm a été atteinte (à 1 σ).

Network Densification Survey et Line markers / Bornes-frontières : Les vecteurs courts correspondant à leurs déterminations ont été traités suivant une méthodologie de type statique bifréquence classique, à l'aide du logiciel PRISM.

En relatif, par rapport au point de base MBP8, une précision planimétrique de l'ordre de $\pm 0,8$ ppm a été atteinte pour la position des bornes frontières (à 1 σ)...

En altimétrie : La précision atteinte a été meilleure que 8 mm (à 1 σ).

La précision finale des bornes frontières ne dépendait pas uniquement des déterminations GPS, mais également de celle des mesures topométriques nécessaires à l'implantation de la position de celles-ci.

L'erreur supplémentaire résultante a été estimée à 8 mm environ.

Précision finale : En relatif, par rapport au point de base MBP8, une précision planimétrique de l'ordre de $\pm 1,1$ ppm a été atteinte pour la position des bornes frontières (à 1 σ)... Celle-ci s'est avérée être meilleure que celle qui était requise par les spécifications techniques (0,8 cm + 2 ppm).



Séréopréparation

En conclusion :

Pour cette application GPS hors du commun, la mise en œuvre de moyens logistiques très importants et l'adoption d'une méthodologie particulièrement adaptée en matière de travaux géodésiques ont permis d'obtenir des résultats à la hauteur des grandes ambitions techniques affichées par le comité mixte Oman-Yémen pilotant les travaux de délimitation de la frontière internationale.

Dans un désert pour le moins hostile ou seuls vivent quelques chameaux et lézards des sables égarés, il fut remarquable d'observer notre rapide adaptation, certes facilitée par une logistique impressionnante...

Cette application GPS très particulière fut l'occasion pour les ingénieurs de SINTEGRA, pourtant habitués aux missions techniques et difficiles à l'étranger, de vivre une expérience unique.

NDLR : Ce chantier hors-normes est également une aventure humaine, c'est ce dont nous parlerons dans un prochain numéro, délaissant l'aspect technique pour la vie des hommes qui permettent que de tels travaux soient menés avec succès.

