

Conseil canadien des examinateurs pour les arpenteurs-géomètres
Éléments du tronc commun
C 6: POSITIONNEMENT GÉODÉSIQUE

Guide d'études :

Le matériel est organisé en sections qui reflètent une progression d'études suggérée. Les questions sont souvent suivies d'explications supplémentaires qui ne sont pas exhaustives et qui ne remplacent pas l'étude du matériel de référence. Ces explications devraient vous aider à relier des informations contenues dans plusieurs manuels afin de vous donner un meilleur aperçu du sujet. Nous vous suggérons de répondre aux questions avant de lire les explications.

Les sujets couverts sont :

1. Systèmes de coordonnées (révision)
2. Le champ gravitationnel de la Terre
3. Systèmes de référence géodésiques
4. Échelles temporelles et astronomie
5. Nombres géopotentiels et hauteurs orthométriques
6. Mesure de la gravité
7. Calcul de coordonnées à partir de mesures terrestres
8. Systèmes de références spatiales utilisés partout dans le monde et au Canada.
9. Le système de positionnement global (GPS) et autres systèmes de navigation globale satellitaires

Les calculatrices programmables sont admises lors de cet examen; les candidats devront toutefois présenter toutes les formules utilisées, la substitution des valeurs utilisées, ainsi que toutes les valeurs intermédiaires à un degré deux fois plus poussé que celui requis pour fournir la réponse. Même si la réponse est numériquement la bonne, le maximum des points pourrait ne pas être attribué si ces informations ne sont pas fournies par le candidat.

1. Systèmes de coordonnées (révision)

Revoir les détails des types de coordonnées suivants et leurs transformations associées :

- Coordonnées cartésiennes 3D géocentriques (xyz)
- Coordonnées ellipsoïdales ($\varphi \lambda h$)
- Coordonnées planimétriques reliés à une projection conforme projection ($x_p y_p$)
- Transformation entre les coordonnées cartésiennes 3D et ellipsoïdales
- Transformation entre les coordonnées ellipsoïdales et les projections cartographiques

Références:

[Torge (2001): chapitre-4.1: The Rotational Ellipsoid]

[Hofmann-Wellenhof et al. (2005): chapitre-5.6.1: Coordinate transformation: Ellipsoidal and rectangular coordinates]

[Hofmann-Wellenhof et al. (2007): chapitre-8.2.3: Ellipsoidal coordinates and plane coordinates]

Explications supplémentaires :

Les coordonnées cartésiennes 3D xyz sont, mathématiquement, le type le plus simple de coordonnées. Les techniques spatiales modernes, comme le GPS par exemple, permettent la détermination directe de ce type de coordonnées. Toutefois, ils ne sont pas très appropriés pour la plupart des applications géodésiques.

On peut associer un système de coordonnées cartésiennes 3D, système à un sphéroïde aplati en faisant coïncider son centre avec l'origine des coordonnées 3D cartésiennes. Un sphéroïde est une surface quadrique obtenue en faisant tourner une ellipse autour de son axe mineur.

Nous alignons le petit axe avec l'axe z . En outre, 2 paramètres définissant la forme du sphéroïde, également appelé ellipsoïde de rotation, sont nécessaires. Normalement, le demi-grand axe et l'aplatissement sont utilisés. Ceci permet l'introduction de coordonnées ellipsoïdales, la latitude, la longitude et la hauteur au-dessus de l'ellipsoïde.

Passant de coordonnées ellipsoïdales à la projection des coordonnées de carte la réduit de 3D en 2D, seuls ($\square \square \square$) sont nécessaires pour obtenir (x_p, y_p) . La hauteur n'est pas un facteur. Cette transformation introduit des déformations. Vous devriez revoir le concept de facteur d'échelle et la convergence des méridiens liés aux projections cartographiques conformes.

Questions types:

- Q1.1. Quel est l'ordre de grandeur de la convergence maximale du méridien dans la projection UTM ?
- Q1.2. Ou cette convergence maximum se produit-elle ?
- Q1.3. Quelle est la convergence au méridien central ?
- Q1.4. Quelle est l'ordre de grandeur du facteur d'échelle maximale de la projection UTM ?
- Q1.5. Ou ce maximum se produit-il ?
- Q1.6. Quel est le facteur d'échelle au méridien central?

2. Le champ gravitationnel de la Terre

Démontrer une compréhension des concepts fondamentaux de la physique, en rapport avec le champ gravitationnel de la Terre.

Un bon survol est donné dans :

[Hofmann-Wellenhof et al. (2005): chapitre-2.1: Gravity]

[Hofmann-Wellenhof et al. (2005): chapitre-2.2: Level surfaces and plumb line]

[Torge (2001): chapitre-3.1: Fundamentals of gravity field theory]

[Torge (2001): chapitre-3.2: Geometry of the gravity field]

[Torge (2001): chapitre-3.4: The Geoid]

Questions type :

- Q2.1. Qu'est-ce qui cause la gravité ?
- Q2.2. Quelles sont les unités utilisées pour exprimer la gravité ?
- Q2.3. Quelles sont les unités utilisées pour exprimer la gravité ?
- Q2.4. Quelle est la relation entre la gravité et la force d'attraction ?

- Q2.5. Comment le potentiel du champ de gravité de la Terre, aussi appelé géopotential, est-il défini?
- Q2.6. Quelles sont les unités liées au géopotential ?
- Q2.7. Pourquoi une surface plane est-elle aussi appelée surface équipotentielle ?
- Q2.8. Quelle est la relation fondamentale entre le potentiel et le vecteur de gravité ?
- Q2.9. Existe-t-il une intersection entre les surfaces équipotentielles ? Pourquoi ?
- Q2.10. Les surfaces équipotentielles sont-elles équidistantes ? Pourquoi ?
- Q2.11. Sur une surface équipotentielle, le potentiel est-il le même partout ? Pourquoi ?
- Q2.12. Sur une surface équipotentielle, la gravité est-elle la même partout ? Pourquoi ?
- Q2.13. Qu'est-ce que le géoïde ?

Explications supplémentaires :

L'attraction newtonienne des masses est à l'origine de la gravité. Toutefois, la répartition des masses à l'intérieur de la Terre n'est pas homogène. Il en résulte des surfaces équipotentielles avec une forme compliquée, la plus importante étant le géoïde. Elle correspond à la surface moyenne des océans. Ainsi, sur les océans au moins, cette surface est visible. Il est clair que le géoïde existe aussi sous les continents. Cette définition n'est plus valable aujourd'hui, car les missions d'altimétrie par satellite montrent la variabilité temporelle de la surface de la mer. Toutefois, elle demeure le point de départ d'une bonne compréhension de ce que le géoïde représente, et de son rôle prépondérant en tant que surface de référence pour la hauteur.

Si l'on considère un liquide parfait sur lequel n'agit que l'attraction newtonienne de sa propre masse, ce liquide prend la forme d'une sphère parfaite. Notez que sa surface est nécessairement une surface équipotentielle. Si on met ce liquide en rotation lente autour d'un axe, il se déforme en s'aplatissant au niveau des pôles et des régions autour des axes de rotation, et bombé à l'équateur et ses régions et dans le plan perpendiculaire à l'axe de rotation passant par le centre de la masse du liquide. Encore une fois la surface du liquide correspond à une surface équipotentielle. Une telle surface peut se rapprocher d'un ellipsoïde. La Terre n'est pas un liquide parfait. De plus, d'autres corps célestes comme le soleil et la lune agissent sur la Terre. Néanmoins, le modèle ellipsoïdal est une bonne approximation qui joue un rôle important en géodésie. Nous nous retrouvons avec 2 surfaces de référence, l'ellipsoïde comme surface de référence pour les coordonnées horizontales et le géoïde en hauteur. C'est l'approche classique de l'ère pré-satellite. L'utilisation de satellites artificiels pour la détermination de coordonnées a révolutionné cette approche en rendant possible la détermination directe des coordonnées cartésiennes 3D.

Vous devriez maintenant lire :

[Torge (2001): chapitre-1.3: Historical development of Geodesy].

Donne une bonne information quant à la manière dont le modèle de la Terre a évolué à partir d'une sphère vers une ellipse et ensuite un géoïde, en plus de présenter les problèmes liés aux approches 3D modernes de la détermination des coordonnées réelles.

3. Systèmes de référence géodésiques

Ce sujet est couvert dans :

[Torge (2001): chapitre-2: Reference systems]

Le chapitre complet, incluant les trois sections suivantes devraient être particulièrement étudiés (time systems, ICRS et ITRS, et gravity field).

Systèmes temporels :

[Torge (2001): chapitre-2.2: Time systems]

Questions type :

- Q3.1. Qu'est-ce que le TAI ?
- Q3.2. Comment le TAI est-il établi ?
- Q3.3. Qu'est-ce que le temps dynamique ?
- Q3.4. Qu'est-ce que le temps sidéral ?
- Q3.5. Qu'est-ce que le temps universel (surtout le UTI)?
- Q3.6. Comment est défini le temps sidéral ?
- Q3.7. Comment le temps sidéral est-il lié au temps universel (UTI) ?
- Q3.8. Définissez le UTC (Temps universel coordonné) ?
- Q3.9. Quelles sont les utilisations du UTC ?

Explications supplémentaires :

Le temps joue un rôle fondamental dans la géodésie moderne. Toutes les techniques spatiales reposent sur des mesures temporelles très précises. C'est le cas pour la VLBI, GNSS et Satellite Laser Ranging par exemple. Les horloges atomiques sont une composante essentielle de toutes ces méthodes. Un réseau d'horloges atomiques assure un temps de référence appelé TAI. Alors, le TAI se base sur des horloges atomiques. Les effets relativistes, la dilatation du temps en raison de la vitesse, rendent nécessaire d'associer une origine au système de temps, ce qui mène à une distinction entre le temps barycentrique et le temps géocentrique. Notez que toutes les horloges sont installés sur la surface de la Terre, ce qui signifie que BDT par exemple ne peut pas être observée directement (impossible de mettre une horloge atomique à cet endroit). Il est obtenu en appliquant les corrections relativistes. Il est important de tenir compte de ces très petites différences dans la détermination de l'orbite, mais tous les systèmes temps ont il a été question jusqu'à présent sont fondamentalement semblables en ce sens qu'ils proviennent d'horloges atomiques.

Le temps sidéral n'est pas un système de mesure du temps en soi. C'est la position angulaire de la Terre par rapport à l'espace, exprimée en unités de temps. Plus précisément, c'est l'angle dans le plan équatorial entre la direction de l'équinoxe de printemps et le méridien de Greenwich. La réponse à pourquoi on l'appelle alors « temps » est due à l'évolution historique: tant que l'on considère la vitesse angulaire de la Terre comme constante, cet angle change de façon linéaire avec le temps et il devient une mesure du temps. Jusqu'à l'invention des horloges atomiques, il n'y avait pas de phénomène plus régulier que celui de la rotation de la Terre (autour de son axe). La calcul du temps ou chronométrage était effectué à partir d'observations sur les étoiles qui exploitent cette horloge céleste. Seule la stabilité des horloges atomiques modernes permet de dissocier la position angulaire de la Terre du temps. Le nom est demeuré pour les unités aussi, et la position angulaire de la Terre est encore appelée temps sidéral, exprimé en heures, minutes et secondes. Comme indiqué précédemment, la direction vernale, ou la direction de l'équinoxe de printemps, est utilisée à

titre de direction de référence. Puisque la précession et la nutation affectent cette direction, il faut distinguer entre le temps sidéral moyen (sans nutation) et le temps sidéral apparent (y compris la nutation).

Le temps universel est obtenu à partir des observations du temps sidéral, par exemple la position angulaire de la Terre. Tel qu'indiqué plus tôt, on y arrive par une compilation de techniques satellitaires. Actuellement, UT0 et UT2 ne sont plus requis, il ne reste que UT1. [Torge (2001): page 23-24] est un peu dépassé sur le sujet.

ICRS et ITRS:

[Torge (2001): chapitre-2.4: Celestial Reference System]

[Torge (2001): chapitre-2.5: Terrestrial Reference System]

[Hofmann-Wellenhof et al. (2007): chapitre-2: Reference systems]

[Torge (2001): chapitre-2.3: International Earth Rotation Service]

Questions type :

Q3.10. Qu'est-ce qui définit le système de référence céleste ?

Q3.11. Qu'est-ce que le ICRS ?

Q3.12. Qu'est-ce qui définit le système global géocentrique de coordonnées à axes fixes ?

Q3.13. Qu'est-ce que le ITRS ?

Q3.14. Que sont la précession et la nutation ?

Q3.15. Qu'est-ce que le mouvement chandlérien ?

Q3.16. De quelle manière le ICRS et le ITRS sont ils liés ?

Explications supplémentaires :

L'ICRS est le système de référence céleste international. Il est, par définition, inertiel, ce qui veut dire qu'il ne tourne pas relativement à l'espace. L'ITRS est le système international de référence terrestre. C'est un système à axes fixes qui tourne avec la Terre. L'axe de rotation de la Terre n'est pas orienté dans la même direction au fil du temps. Il change de direction relativement à l'espace à l'égard de l'espace en raison de la précession et de la nutation causées par l'attraction newtonienne de la lune et du soleil sur le renflement équatorial, qui est asymétrique par rapport au plan de l'écliptique. La vitesse angulaire de la Terre varie légèrement. Vu d'une Terre stable, l'axe de rotation n'est pas constant lui non plus à cause du mouvement polaire. Dans un sens physique plus significatif, il faut dire que vue de l'espace, la Terre dans son ensemble vacille autour de l'axe de rotation. La transformation entre l'ICRS et l'ITRS est donc essentiellement composée de 3 matrices de rotation (voir Torge (2001) : équation 2.16). Une première, en fonction de la précession-nutation ($N(t)$ $P(t)$), la rotation principale R_z (Gast) qui représente la position angulaire de la Terre, et une dernière en fonction du mouvement polaire R_2 (- XP) R_1 (- yp).

La précession-nutation, la variation de la vitesse angulaire, et le mouvement polaire sont appelés les paramètres de rotation de la Terre EOP. Précession et nutation peut être obtenues à partir de modèles. Les autres paramètres ne peuvent être prédits, tout au moins sur de longues périodes. Tous les paramètres sont maintenant contrôlés par des méthodes géodésiques spatiales telles le VLBI, GPS, etc., à l'aide des réseaux globaux permanents. La coordination est assurée par l'IERS. L'IERS a une page Web très éducative et facile à trouver. La détermination de ces paramètres était précédemment effectuée à l'aide d'observations angulaires astrogéodésiques.

Champ gravitationnel :

[Torge (2001): chapitre-2.6: Gravity Field related reference systems]

[Hofmann-Wellenhof et al. (2005): chapitre 2.4: Natural coordinates]

Questions type :

Q3.17. Comment la latitude et la longitude astronomique sont-elles définies ?

Q3.18. Comment un système d'astronomie horizontal local est-il défini ?

Q3.19. Comment est-il lié à un système géocentrique global ?

Q3.20. Comment un système géodésique horizontal local est-il défini ?

Q3.21. Comment est-il lié à un système géocentrique global ?

Q3.22. Quelles est la différence entre le système astronomique local et le système géodésique local ?

Q3.23. Que sont les coordonnées naturelles ?

Q3.24. Pourquoi sont-elles importantes encore aujourd'hui, même avec le GPS ?

Explications supplémentaires :

Il s'agit dès le départ d'être conscient que la gravité est un phénomène physique. Il nous permet de distinguer le haut du bas. Grâce à l'utilisation d'un fil à plomb, vous pouvez visualiser facilement la direction du vecteur de gravité à votre location. La majorité des mesures géodésiques se réfèrent au champ gravitationnel de la Terre grâce à cette orientation, qui est donnée par deux angles d'Euler – La latitude astronomique Φ et la longitude astronomique Λ . Il devient ainsi pratique d'introduire un système astronomique horizontal local, qui peut être lié au système géocentrique global, ce qui implique des matrices de rotation en fonction de Φ et Λ .

Dans le système astronomique local, la verticale est définie par la direction du vecteur de gravité donnée par (Φ, Λ) . Dans un système géodésique local, la verticale est définie par la direction de la normale à l'ellipsoïde donnée (φ, λ) . Elles diffèrent légèrement. La différence est la déviation de la verticale. Soyez conscient du fait qu'elles dépendent de l'ellipsoïde de référence utilisé. Comparer [Torge (2001): Fig.2.15] et [Torge (2001): Fig.4.6].

4. Échelles de temps et astronomie

Vous devriez étudier les chapitres suivants :

[Torge (2001): chapitre-2.6.2: Local astronomic Systems]

[Torge (2001): chapitre-5.3: Geodetic Astronomy]

Questions type :

Q4.1. Une intersection de surfaces équipotentielle peut-elle exister ? Pourquoi ?

Q4.2. Comment la latitude et la longitude astronomique sont-elles définies ?

Q4.3. Comment l'azimut astronomique est-il défini ?

Q4.4. Quelles sont les équations fondamentales dans la détermination de la latitude et la longitude astronomique ?

- Q4.5. Définissez la déclinaison et l'ascension droite d'une étoile.
- Q4.6. Définissez l'angle horaire d'une étoile.
- Q4.7. Quelle est la différence entre le temps sidéral de Greenwich et le temps sidéral local ?
- Q4.8. Quelle est la différence entre le temps sidéral moyen et le temps sidéral apparent ?
- Q4.9. Expliquer l'observation et le calcul de la latitude et la longitude astronomique.
- Q4.10. Expliquer l'observation et le calcul des azimuts astronomiques, en utilisant Polaris ou le soleil.

Explications supplémentaires :

Théoriquement, la latitude et la longitude astronomiques ne correspondent pas à des positions, mais plutôt à l'orientation du vecteur de gravité. Il est important de s'en souvenir. Ce n'est que si on néglige la déviation de la verticale et que l'on considère égales les quantités astronomiques et ellipsoïdales que l'on peut les considérer comme une position. Dans ce cas, la résolution qui en résulte ne peut être meilleure que celle de l'erreur introduite en négligeant les déviations de la verticale. Si l'on suppose un ordre de grandeur de plusieurs secondes d'arc pour les déviations, la résolution qui en résulte est de l'ordre de plusieurs centaines de mètres. Telle est la procédure typique de la navigation au cours des XVIIIe et XIXe siècles, alors que la pauvre résolution des instruments ne permettait le calcul de déviation de la verticale. Plus tard, la détermination de la latitude et la longitude a joué un rôle important dans la création de réseaux horizontaux. Ils étaient nécessaires pour réduire l'azimut astronomique mesuré en un azimut ellipsoïdal et de restreindre le réseau à une station fondamentale. L'orientation du réseau était obtenue en mesurant les azimuts astronomiques.

Avant l'avènement du GPS comme outil d'arpentage, l'orientation des réseaux locaux en régions éloignées s'effectuait souvent par la mesure d'un azimut astronomique. Aujourd'hui, les mesures astronomiques, utilisées à titre d'outil habituel d'arpentage, sont devenues désuètes. Elles jouent toujours un certain rôle dans la détermination du géoïde local et dans des réseaux spéciaux de très haute précision. De plus, beaucoup d'information encore utilisée aujourd'hui, surtout au niveau des azimuts et des relèvements, est basée sur des méthodes astronomiques. Torge (2001): [chapitre-5.3: Geodetic Astronomy] donne un bon et bref aperçu.

Le point de départ pour la détermination des quantités astronomiques mentionnés ci-dessus sont les équations fondamentales figurant dans [Torge (2001): equ.2.21-2.23]. Il y a beaucoup de paramètres qui y apparaissent. Notez les paramètres connus, les paramètres inconnus, et quels paramètres sont des observations. Ceci vous aidera lors de l'étude. [Torge (2001): chapitre-5.3: Geodetic Astronomy].

5. Nombres géopotentiels et hauteurs orthométriques

Vous devriez étudier en détail :

[Hofmann-Wellenhof et al. (2005): chapitre-4 Heights]

Un exposé moins complet se trouve dans [Torge (2001): chapitre-6.4 Height determination]. Il est important de maîtriser ce sujet afin de bien comprendre les concepts liés au champ gravitationnel de la Terre.

Information supplémentaire sur le nivellement dans :

[Torge (2001): chapitre 5.5.3 Levelling]

Questions type :

- Q5.1. Comment définit-on la longitude et la latitude ?
- Q5.2. Pourquoi existe-t-il une erreur de fermeture théorique dans le nivellement d'une boucle effectué avec un niveau à bulle ?
- Q5.3. Que sont les nombres géopotentiels ?
- Q5.4. Quelle unité est utilisée pour exprimer les nombres géopotentiels ?
- Q5.5. Comment obtient-on les nombres géopotentiels ?
- Q5.6. Quels type de mesures sont requis pour déterminer les nombres géopotentiels ?

Explications supplémentaires :

L'erreur de fermeture théorique est dû au fait que les surfaces équipotentielles ne sont pas équidistantes [Fig. 4.2 page 158 in Hofmann-Wellenhof et al. (2005)]. La prochaine étape est de remédier à la situation. Le nivellement avec niveau à bulle ne suffit pas. Des observations supplémentaires sont requises. On doit observer la gravité sur le parcours de nivellement. On observe la gravité à l'aide de gravimètres (couverts plus loin). Pour le moment, il suffit de savoir que la valeur observée correspond au nombre d'unités d'attraction gravitationnelle [unités = gals] dans la direction de la ligne plombée. La combinaison des différences altimétriques observées et des observation gravitationnelles donne des différences géopotentielle et finalement, des nombres géopotentiels. Ceci signifie que pour obtenir la différence géopotentielle entre deux points, A et B, on doit effectuer un nivellement avec un niveau à bulle en plus d'effectuer des mesures de gravité sur la même ligne entre les points A et B.

Par définition, le nombre géopotential sur le géoïde est zéro. Il est utilisé lors de la mise en place de systèmes de référence verticale, en incluant une station marégraphique comme point de référence, préférablement une station avec une longue histoire connue afin d'obtenir un bon niveau moyen de la mer.

Lire aussi :

[Torge (2001): chapitre-7.2 Vertical control networks].

Il est essentiel d'être conscient du fait que, avant l'ajustement d'un réseau de nivellement, les différences altimétriques brutes observées [unité = mètre] peuvent être transformées en différences géopotentielle [unité = gpu]. L'ajustement est alors effectué en utilisant les différences géopotentielle au lieu des différences altimétriques, ce qui mène au nombres géopotentiels pour tous les repères du réseau de contrôle vertical. Il s'agit de la première étape. Nous avons maintenant des nombres géopotentiels pour chaque repère de la référence verticale.

Questions type :

- Q5.7. Une intersection de surfaces équipotentielle peut-elle exister ? Pourquoi ?
- Q5.8. Comment les altitudes dynamiques sont-elles définies ?
- Q5.9. Quels sont les liens entre les altitudes dynamiques et les nombres géopotentiels ?
- Q5.10. Que sont les altitudes orthométriques ?
- Q5.11. Comment sont-elles dérivées des nombres géopotentiels ?

Explications supplémentaires :

La prochaine étape est de convertir les nombres géopotentiels en altitudes dynamiques, altitudes orthométriques ou altitudes normales. Les altitudes dynamiques diffèrent des nombres géopotentiels que par l'échelle ou l'unité. Ils n'ont aucune signification géométrique. Les altitudes orthométriques sont les plus importantes puisqu'elles utilisent le géoïde comme surface de référence. Toutefois, la conversion du nombre géopotential à des altitudes orthométriques implique la valeur moyenne de la gravité le long du fil à plomb entre le repère situé sur la topographie et sur le géoïde. Le seul point accessible est le point de repère lui-même. Afin d'obtenir une valeur moyenne il faut faire quelques hypothèses sur la variation de "g" sur le fil à plomb. L'approximation la plus simple consiste à remplacer le terrain par une couche infinie de densité constante (l'anomalie de Bouguer). L'attraction de masse de la plaque de Bouguer peut être exprimée par une fonction analytique qui permet d'obtenir une expression fermée pour la valeur moyenne de "g" sur le fil à plomb. Par l'application de ce rapprochement, on obtient la transformation Helmert.

En utilisant la voie par laquelle on obtient les nombres géopotentiels et, plus tard, la voie par laquelle on obtient les altitudes orthométriques, le modèle ellipsoïde n'est plus du tout requis. Il est important d'en prendre note. Cette approche est « l'ancienne manière » d'établir une référence verticale.

6. Mesure de la gravité

Vous devriez étudier :

[Torge (2001): chapitre-5.4.1 Absolute Gravity measurements]

[Torge (2001): chapitre-5.4.2 Relative Gravity measurements]

[Torge (2001): chapitre-3.5 Temporal Gravity Variations]

Tous les détails des divers instruments vont au-delà de cet article. Vous devriez toutefois maîtriser les principes de fonctionnement de base des gravimètres absolus (surtout ceux les plus utilisés tels le FG5) et des gravimètres relatifs, le mode de fonctionnement de ce type d'instrument et leur potentiel de précision .

Explications supplémentaires :

On mesure la gravité pour plusieurs raisons. Tel que mentionné précédemment, la mesure de la gravité le long des lignes de nivellement est requise afin d'obtenir les nombres géopotentiels servant à déterminer la référence verticale. Dans ces cas, les gravimètres relatifs sont le plus fréquemment utilisés. Ceci veut dire que les observations doivent être liées à une station connue. La gravité est affectée par les marées, ce qui veut dire que les mesures doivent être corrigées pour tenir compte de cet effet. Par ailleurs, des gravimètres permanents (relatifs ou absolus) sont utilisés dans l'observation des variations de marée.

7. Calcul des coordonnées à partir de mesures terrestres

Vous devriez étudier :

[Torge (2001): chapitre-5.5.1: Horizontal and vertical angle measurement]

[Torge (2001): chapitre-5.5.2: Distance measurements, total stations]

[Torge (2001): chapitre-6.4: Horizontal positioning]

Explications supplémentaires :

D'un côté se trouvent les mesures obtenues par une station totalisante qui sont essentiellement des directions horizontales, des angles verticaux et des distances. Si les directions horizontales sont orientées, ces mesures peuvent être observées sous forme de coordonnées sphériques en égard au système astronomique local. De l'autre côté, nous avons les coordonnées inconnues. Les mesures sont habituellement effectuées pour déterminer des coordonnées. Il reste ensuite la question du type de coordonnées utilisées.

Plusieurs systèmes de coordonnées peuvent être examinés :

- Coordonnées cartésiennes 3D liées au système astronomique horizontal local;
- Coordonnées cartésiennes 3D liées au système ellipsoïde horizontal local;
- Coordonnées cartésiennes 3D géocentriques équatoriales;
- Coordonnées 2D ellipsoïdales;
- Coordonnées 2D planes liées à une projection conforme.

Le choix dépend du type d'application. Les coordonnées cartésiennes ne sont pratiquement jamais utilisées comme produit final dans le système local horizontal. Cependant, elles jouent un rôle important dans l'établissement de la relation entre les observations et les coordonnées cartésiennes géocentriques 3D équatoriales.

Du point de vue de la théorie de l'ajustement, il existe des observations et des inconnues (coordonnées et peut-être d'autres inconnues, comme les paramètres d'orientation). Afin d'effectuer un ajustement, il faut trouver les expressions mathématiques qui associent les mesures aux coordonnées inconnues et qui dépendent du choix du type de coordonnées. En outre, les mesures brutes doivent être réduites à la même surface de coordonnées que les équations. (Un exemple simple: la distance oblique est mesurée, mais dans l'équation, la distance horizontale est utilisée rendant nécessaire une réduction de la distance oblique à une distance horizontale).

Il existe trois modèles principaux qui utilisent :

1. les coordonnées cartésiennes géocentriques 3D équatoriales : ces coordonnées sont utilisées conjointement avec les techniques spatiales comme le positionnement GPS par exemple et moins souvent avec les mesures terrestres. Il existe cependant des applications spéciales telles que les réseaux de haute précision dans les zones montagneuses, ou les réseaux de base pour les tunnels, qui sont des applications où ce type de coordonnée joue un rôle. Il convient de mentionner que ce modèle est le plus puissant et le plus souple des trois. Il permet de combiner les observations terrestres et les coordonnées GPS d'une manière simple et rigoureuse. Un inconvénient: ce modèle est aussi le plus exigeant et difficile à utiliser.
2. les coordonnées ellipsoïdales 2D : ces coordonnées ont été utilisées exclusivement dans l'établissement des références 2D classiques. Ceci comporte en premier lieu une réduction de toutes les mesures terrestres et astronomiques vers l'ellipsoïde et un ajustement effectué par la suite en utilisant la latitude et la longitude ellipsoïdale des sites comme inconnues. Puisque les réseaux liés à ces références s'étendent normalement sur au moins des centaines de kilomètres, voire des milliers de kilomètres et plus, l'utilisation de coordonnées de projection ne serait pas approprié. Une référence nationale n'est plus établie de cette manière.

3. Les coordonnées planes 2D liées à une projection conforme : ces coordonnées sont utilisées dans la grande majorité des application d'arpentage à cause de leur simplicité.

Explications supplémentaires :

Les coordonnées cartésiennes géocentriques 3D équatoriales : les modèles mathématiques se trouvent dans [Torge (2001): pp.42-44, equ.6.39]. Les mesures brutes n'ont qu'à être réduites géométriquement en fonction de l'effet de la hauteur de l'instrument et du réflecteur ou de la cible au dessus des points sur le sol. Veuillez noter que la latitude et la longitude astronomiques doivent être utilisées dans ce modèle. On peut composer avec ce problème de plusieurs façons : 1) On mesure la latitude et la longitude astronomique; 2) La latitude et longitude astronomiques sont obtenues à partir de la latitude et longitude ellipsoïdale (qui sont toujours implicitement connues), corrigées pour la déviation de la verticale tirée d'un modèle; 3) La latitude et longitude ellipsoïdale sont utilisées, ce qui équivaut à négliger la déviation de la verticale, ce qui introduit une erreur.

Coordonnées ellipsoïdales 2D : les modèles mathématiques se trouvent dans [Torge (2001): chapitre-6.3.3 Computation on the ellipsoid]. La complexité des modèles provient du fait que les équations d'observation, les équations qui relient les observations aux coordonnées inconnues, ne sont pas de forme fermée, dans la solution du problème inverse sur l'ellipsoïde. Il existe plusieurs approches, certaines basées sur des itérations et d'autres sur le développement en série. Les détails de ces calculs vont au-delà du présent item. Vous devriez toutefois être en mesure d'effectuer le calcul numérique des approximations sphériques. Si ce modèle est utilisé, toutes les mesures doivent en premier lieu être réduites sur l'ellipsoïde. [Torge (2001): chapitre-6.3.2 Reductions to the ellipsoid; Hofmann-Wellenhof et al. (2005): chapitre 5.12 Reduction of the astronomical measurements to the ellipsoid].

Les coordonnées planes 2D liées à une projection conforme : le modèle mathématique lié à ce type de coordonnées devrait vous être familier. Le voici :

$$\text{distance} : d = \sqrt{(X_2 - X_1)^2 + (Y_2 - Y_1)^2}$$

$$\text{azimut du quadrillage} : a = \arctan((Y_2 - Y_1)/(X_2 - X_1))$$

Ce modèle est le plus simple, mais nous devons être conscients que même si les équations semblent inclure une métrique euclidienne, la métrique N'EST PAS euclidienne et ces équations ne sont que des approximations qui fonctionnent bien pour des distances courtes. En premier lieu, les distances sont réduites à l'ellipsoïde. Elles sont deuxièmement réduites à la projection. Cette deuxième étape comporte l'application d'un facteur d'échelle à la distance et ensuite un ajustement pour la convergence des méridiens pour passer d'un azimut géodésique à un azimut du quadrillage.

Remarque: indépendamment du modèle, si les directions horizontales ne sont pas orientées, on doit tenir compte de paramètres inconnus supplémentaires pour les orientations.

8. Systèmes de référence spatiales utilisées partout dans le monde et au Canada.

Vous devriez étudier :

[Torge (2001): chapitre-5.2 Satellite Observations]

[Héroux (2006): tous les articles]

La deuxième référence [Héroux (2006)], un recueil de cinq articles, est une excellente source de renseignements sur les excellents systèmes de références canadiens, condensés un un seul

volume. On doit lui porter une attention particulière puisqu'il décrit l'évolution et les systèmes de références fondamentaux à la fine pointe qu'utilisent les arpenteurs canadiens dans leur travail de tous les jours. Pour obtenir plus de renseignements sur les derniers développements, veuillez consulter le site Web de Ressources naturelles Canada : http://www.geod.nrcan.gc.ca/index_e.php

[Héroux (2006): A1: Space Geodetic Techniques and the Canadian Spatial Reference System]

[Héroux (2006): A2: The Evolution of NAD83 in Canada]

Questions type :

- Q8.1. Quel était le système de référence horizontale avant NAD83? Comment a-t-il été établi ? Quelle était sa précision ?
- Q8.2. Comment les référence modernes 3D (aussi appelées TRS = Terrestrial reference systems) sont-elles définies ? De quel type de coordonnées dépendent-elles ? Pourquoi ?
- Q8.3. Comment le système de référence a-t-il évolué au Canada : NAD27 – NAD83– NAD83 (scrs) ?
- Q8.4. Quelle est la différence entre le NAD83 (scrs) et l'ITRS?
- Q8.5. Pourquoi une transformation à 7 paramètres est-elle insuffisante pour transformer les coordonnées de NAD83(scrcs) à ITRF ?
- Q8.6. Qu'est-ce qu'une transformation à 14 paramètres ? Identifiez les différents paramètres ? Comment cette transformation fonctionne-t-elle ?
- Q8.7. Quelle est la précision du NAD83 (SCRS) ?
- Q8.8. Quels sont les réseaux de contrôle associés au NAD83 (SCRS) et comment sont-ils surveillés ?

Explications supplémentaires :

Les systèmes géodésiques de référence terrestre modernes (TRS), comme le NAD83 (SCRS) sont tous liés à l'ITRS, le système international de référence terrestre. Ils ont remplacé les anciens systèmes de références globaux tels le NAD27. Le NAD83 (SCRS) n'a pas surgi du jour au lendemain. Il y a eu une évolution du NAD27 vers le NAD83 (SCRS) avec un certain nombre de réalisations intermédiaires qui ont été utilisées pendant un certain laps de temps et souvent abandonnées par la suite.

Notez la distinction entre système et cadre. Un système de référence comme ITRS est un concept théorique, une définition. Un cadre de référence comme ITRF correspond à sa réalisation. Grosso modo, l'ITRS (au singulier) est ce que l'on veut avoir et les ITRF (au pluriel) sont ce que l'on a. Il est facile par exemple, de constater que l'origine du système doit coïncider avec le centre de la masse de la Terre (qui fait partie de la définition de l'ITRS), mais il n'est pas aussi facile de faire en sorte qu'il coïncide vraiment. Ceci a mené à la réalisation de différents (ITRFs) au fil du temps, qui sont désignés par une année, la dernière réalisation étant ITRF2005.

Les ITRF représentent des réalisations du système de référence terrestre le plus fondamental, l'ITRS. Il y a eu, par exemple, ITRF88, ITRF93, ITRF97, ITRF2000 et ITRF2005. La liste n'est pas exhaustive. Le fait important est que les réalisations convergent. Les différences sont plus petites puisque la précision s'améliore avec le temps.

Les mouvements des plaques tectoniques affectent les coordonnées. On ne peut plus considérer les coordonnées d'un site comme invariables dans le temps. Il faut associer un vecteur vitesse à chaque point. La façon dont l'ITRS fait face à ce problème diffère sensiblement de celle utilisée par le NAD83 (scrs). Le mouvement des plaques individuelles s'explique principalement par une rotation. L'ITRS est un cadre de référence global. La rotation résultante de l'ensemble des plaques en est réduite au minimum. Cela mène à une rotation remarquable de la plaque nord-américaine en ce qui touche l'ITRS (ou les différents ITRF différents, si vous préférez). Les vitesses résultantes des points sont typiquement de l'ordre de 1-2 cm par an. Le NAD83 essaie de minimiser ceci en laissant le système de référence lui-même tourner avec la plaque. Le résultat: les coordonnées pertinentes à NAD83 ne sont plus affectées par la tectonique des plaques. Ce n'est pas tout à fait vrai: il reste des distorsions intraplaques, les points ne sont pas tous situés sur la plaque nord-américaine. En outre, le vecteur de rotation responsable de la rotation de la plaque nord-américaine est tiré du modèle Nuvel-A qui le surestime légèrement.

Puisque NAD83 (SCRS) est en rotation avec la plaque de l'Amérique du Nord, la transformation entre un ITRF_{xx} et NAD83 (scrs) ne peut plus être une simple transformation statique à 7 paramètres (3 translations, 3 rotations, 1 échelle). Elle est dynamique et composée de 14 paramètres. Pour chacun des 7 paramètres, son comportement dans le temps est considéré comme linéaire. Ceci signifie que les changements par unité de temps (on peut parler de la vitesse des paramètres) sont ajoutés pour chaque paramètre, doublant ainsi leur nombre. Afin d'appliquer une telle transformation, une approche en 2 étapes est utilisée. Tout d'abord, on calcule les 7 paramètres de l'époque visée puis, on applique une transformation standard à 7 paramètres. [Héroux (2006): Table-1 page 156] donne la liste des paramètres. Ce tableau contient implicitement les valeurs des paramètres relatifs à une transformation 14-paramètres entre 2 ITRF. Les paramètres se stabilisent au fil du temps, avec une convergence des valeurs différentes de zéro. Il y a un décalage entre l'ITRS et le NAD83 (SCRS), qui peut être déduite à partir des valeurs du vecteur de translation au niveau du mètre, et un mauvais alignement des axes, tel qu'indiqué par les rotations de l'ordre de grandeur (30 millisecondes d'arc [mas] correspondent à environ 1 mètre à la surface de la Terre). Ces écarts résultent des incertitudes liées à la « fixation » du NAD83. Puisque le NAD83 (SCRS) a été rapproché le plus possible du NAD83, ces écarts ont été transférés au NAD83 (SCRS) (patrimoine historique). La rotation de la plaque nord-américaine se trouve dans le taux de changement des paramètres de rotation qui est un peu moins de 1 mas / an.

[Héroux (2006): A3: A Gravimetric Geoid Model as a Vertical Datum in Canada]

[Héroux (2006): A4: Crustal motion and deformation monitoring]

[Héroux (2006): A5: Global Geodetic Observation System]

Questions type :

- Q8.9. Quelle surface de référence est utilisée le plus souvent pour la plupart des références verticales nationales ? Pourquoi ?
- Q8.10. Comment la référence verticale a-t-elle été établie au Canada ?
- Q8.11. Comment sera-t-elle réalisée d'ici peu ? Pourquoi ?
- Q8.12. Quels sont les avantages de cette nouvelle approche ?
- Q8.13. Qu'est-ce que le rebond post-glaciaire et comment affecte-t-il les coordonnées ?
- Q8.14. Qu'est-ce que la tectonique des plaques et comment affecte-t-elle les coordonnées ?

Q8.15. Comment les mouvements tectoniques sont ils suivis aujourd'hui ?

Explications supplémentaires :

Le nouveau NAD83 (SCRS) est un système de référence 3D, qui contient donc une composante verticale, ce qui correspond à l'altitude ellipsoïdale. On pourrait être tentés de d'utiliser l'ellipsoïde comme surface de référence pour l'altitude. Toutefois, cette surface n'a pas de sens physique puisque l'eau peut s'écouler vers le haut à l'égard des altitudes ellipsoïdales. Par conséquent, le géoïde demeure la surface de référence privilégiée comme surface équipotentielle du champ de gravité terrestre.

La donnée de référence verticale du Canada (CGVD28) est basée sur le nivellement avec niveau à bulle rattaché à des marégraphes. Le niveau moyen de la mer observé à un marégraphe sur plusieurs décennies ne coïncide pas avec le géoïde en raison du comportement local systématique de la température de l'eau, des courants, de la salinité, etc. C'est ce qu'on appelle la topographie permanente de la surface de la mer (SST), qui peut atteindre 1-2 mètres. L'intégration de plus d'une jauge de marée à titre de référence zéro introduit une distorsion systématique dans le système de référence. Si l'on utilise une seule station de référence (Rimouski) on se débarrasse de cet effet.

La nouvelle approche consiste à abandonner le nivellement par niveau à bulle pour établir et contrôler la référence verticale pour utiliser à sa place la relation fondamentale entre la hauteur ellipsoïdale (h) et la hauteur orthométrique (H): $H = h - N$, où N est l'ondulation du géoïde. Fondamentalement, tout est lié à l'ellipsoïde, par NAD83 (SCRS). Une modélisation haute-performance du géoïde permet la conversion vers l'altitude orthométrique. Le défi est de déterminer ce modèle avec une précision appropriée. Ceci est maintenant possible possible aujourd'hui. Les avantages sont expliqués en détail dans [Héroux (2006): A3]. Ceci nous conduit vers une situation où le marégraphe de Rimouski n'est plus à une hauteur de zéro, mais à sa valeur SST correspondante. Le nouveau système de référence sera décalé par rapport à l'ancien. Une alternative consiste à garder Rimouski à une hauteur de zéro. Dans ce cas, la surface de référence résultant n'est plus le géoïde, mais la surface équipotentielle qui traverse le niveau zéro de Rimouski. Ce choix est viable lui-aussi.

9. Le système de positionnements global et autres systèmes de navigation globaux par satellite (GNSS)

L'utilisation des systèmes de navigation globaux par satellite, surtout le GPS, est devenu un outil de premier ordre pour l'arpentage. La dernière partie de ce guide d'études aborde les problèmes liés à ce sujet de première importance.

Des introductions sur le sujet peuvent se trouver dans :

[Hofmann-Wellenhof et al. (2005): chapitre-5 Part I: Global reference systems after GPS]

[Torge (2001): chapitre-5.2.5: Global Positioning system (GPS)]

Les détails n'y sont pas tous, mais l'essentiel y est résumé en quelques pages. Pour une étude plus approfondie, l'ouvrage essentiel est : Hofmann-Wellenhof et al. (2007). Cette référence est un manuel de presque 500 pages. Ce qui suit sont des commentaires sur l'importance de divers chapitres tels qu'ils peuvent s'appliquer aux éléments du tronc commun :

chapitre-1: Introduction: ne jamais négliger l'introduction.

chapitre-2: Reference systems: chapitre déjà suggéré lors de l'étude des ICRS et ITRS.

chapitre-3: Orbites des satellites : lire le chapitre -3.2: Orbit description and study chapitre-3.4: Orbit determination.

chapitre-4: Satellite signals : Vous pouvez laisser tomber ce chapitre. L'information contenue dans [Torge (2001): chapitre-5.2.5] est suffisante.

Questions type :

- Q9.1. Expliquez le segment spatial, le segment de contrôle et le segment de l'utilisateur ?
- Q9.2. Quelle est la solution d'une orbite képlérienne (problème à 2 corps)?
- Q9.3. Quelle est la représentation képlérienne d'une orbite ?
- Q9.4. **Que sont les orbites diffusées et comment les acquérir ?**
- Q9.5. **Que sont les orbites précises et comment les acquérir ?**

Explications supplémentaires :

Le segment spatial d'un GNSS correspond aux signaux émis par les satellites. Le segment de contrôle est un réseau de stations de référence terrestres qui sont sous le contrôle des exploitants du système. Ils sont responsables des aspects opérationnels, tels que les liaisons montantes de l'information orbitale vers les satellites. Les segments utilisateurs sont les récepteurs qui observent les signaux et calculent les positions. Les satellites se déplacent selon des orbites qui peuvent être représentées par des éléments képlériens. S'ils n'étaient soumis qu'à l'attraction d'une Terre homogène, ces orbites seraient des ellipses parfaites et les éléments képlériens seraient constants dans le temps. Puisque ceci n'est pas le cas, une représentation képlérienne peut toutefois être utilisée mais avec des éléments qui varient avec le temps. Une telle approche est utilisée dans le cas des orbites diffusées, qui sont déterminées par le segment de contrôle et téléchargées vers les satellites. Cette information est ajoutée au signal et diffusée à titre de message de navigation qui est extrait par les récepteurs. Elle permet de calculer la position des satellites en tant que fonction du temps. Le message de navigation est habituellement mis à jour aux deux heures. En plus de l'information orbitale, le biais des horloges satellitaires est aussi inclus. Les éphémérides précises ainsi que le biais des horloges satellitaires sont calculés par le IGS, le service GNSS international. Il existe plusieurs produits dont la précision dépasse celle des orbites diffusées. Voir : <http://igscb.jpl.nasa.gov/> pour obtenir plus de renseignements.

chapitre-5:

Observables: le chapitre-5.1 présente les différents observables et le chapitre 5.2, les combinaisons de données. Ceci fait partie de votre matériel d'étude. Le reste de ce chapitre présente les différentes sources d'erreurs et effets qui doivent entrer en ligne de compte et qui affectent la qualité de la solution. Les détails ne sont pas nécessairement expliqués mais ces effets, leur ordre de grandeur et la manière de les aborder y figurent.

chapitre-6: Modèles mathématiques de positionnement : ce chapitre est important puisqu'il examine les différents types de solutions. Les seules sous-sections qui peuvent être omises sont : chapitre-6.1.3 Point positioning with Doppler data, chapitre-6.3.3 Correlations of the phase combinations.

Questions type :

- Q9.6. Quels sont les différents types d'observations suivies par un récepteur GPS ?
- Q9.7. Que sont les mesures monofréquence et que sont les mesures double fréquences ?
- Q9.8. Quel est l'avantage des mesures double fréquences des pseudo-distances par opposition à la mesure monofréquence ?

- Q9.9. Quel est l'avantage des mesures double fréquences de la phase par opposition à la mesure monofréquence ?
- Q9.10. Énumérez les différentes sources d'erreur en ordre d'importance décroissante et à quoi sont elles attribuées. Donnez l'ordre de grandeur (en mètres) de l'effet résiduel après l'ajustement.
- Q9.11. Pour quel mode de positionnement de base le GPS a-t-il été conçu ?
- Q9.12. Quel est le principe de base de l'observation de code DGPS et quelle est la précision possible ?
- Q9.13. Quel type d'observation est utilisé pour le positionnement géodésique de l'ordre du centimètre ?
- Q9.14. Quel est le principe de base du positionnement relatif utilisant des mesures de phase et quelle est la précision possible ?
- Q9.15. Que signifie "RTK" ?
- Q9.16. Quelles sont les caractéristiques du RTK?
- Q9.17. Quelle est la différence entre une approche statique relative utilisant le post-traitement et le RTK?
- Q9.18. Que signifie "PPP" ?
- Q9.19. Quelles sont les caractéristiques du PPP ?

Explications supplémentaires :

Le GPS est un système de navigation dont la tâche fondamentale est d'offrir la possibilité de déterminer instantanément une position 3D, dans le monde entier et ce, 24 heures par jour indépendamment des conditions météorologiques. Ceci est accompli par les mesures de pseudo-distance effectuées par le récepteur. La précision obtenue est de l'ordre du mètre. L'intégration des mesures de phase rend le GPS intéressant pour les applications géodésiques. La précision obtenue est de l'ordre du millimètre. Le Cinématique en temps réel (RTK) est un mode où un récepteur de référence situé à proximité transmet ses mesures au rover. Les mesures sont des mesures double fréquences de code et de phase. Le récepteur mobile calcule une solution « ambiguïté fixe ». Ceci signifie que la tâche principale est de résoudre les ambiguïtés des valeurs entières le plus rapidement possible, quasi-instantanément. Ceci est nécessaire afin d'obtenir une précision de l'ordre de 1 centimètre, voire mieux. L'avantage par rapport à une approche post-traitement est le fait que l'on est en mesure de vérifier la qualité de la solution en ligne. Cela permet une meilleure efficacité. L'inconvénient est qu'un lien est requis pour la transmission des données de la station de référence au Rover. RTK correspond à un mode de positionnement relatif. Les coordonnées de la station de référence doivent être connues. Toutes les positions déterminées par les récepteurs mobile leurs sont liées. La position du point précis, PPP, est un mode absolu. Les données d'un seul récepteur sont nécessaires au calcul des coordonnées avec une résolution de l'ordre du centimètre. Cette approche est d'une grande aide dans les régions où aucune station de référence géodésique n'est disponibles. L'atteinte de ce niveau de précision exige cependant quelques heures de mesures double fréquences statique. Pour plus d'informations voir le site web du service SCRS-PPP de Ressources naturelles Canada:

http://www.geod.nrcan.gc.ca/products-produits/ppp_e.php

Les différentes sources d'erreur qui peuvent affecter la qualité de la solution sont principalement le retard ionosphérique, le retard troposphérique, trajets multiples, l'incertitude des orbites des satellites, et variations du centre de phase de l'antenne. La

manière dont elles affectent la solution dépend beaucoup du type de solution. Le retard ionosphérique peut être éliminé à l'aide d'observations double fréquences. En présence d'observations monofréquence, il faut s'appuyer sur des modèles, ce qui mène à des erreurs résiduelles. En mode relatif, cet effet est fortement atténué. Sur de petites distances de quelques kilomètres, elles peuvent normalement être négligées. Le retard troposphérique est souvent calculé à partir d'un modèle (Hopfield, Saastamoinen etc.). L'erreur résiduelle est généralement inférieure à quelques centimètres. Ceci n'est pas critique pour la plupart des applications s'appuyant sur les observations de code seulement, car la précision n'est pas aussi élevée. En mode relatif à partir des observations de phase, cette erreur devient plus inquiétante. Pour de petites distances, sans grande différence de hauteur entre les stations, une partie de l'erreur est absorbée par les différences de formation. Pour les grandes lignes de base, les conditions météorologiques aux stations sont décorrélées et l'erreur demeure. Dans un tel cas, des techniques d'estimation des biais dans la troposphère sont utilisées. Le mode le plus exigeant est le PPP, puisque l'on veut obtenir, en mode absolu, une précision semblable à celle du mode relatif. Aucune erreur ne s'annule.

chapitre-7: Data processing: Au-delà des besoins de cet item du tronc commun. Faites une lecture rapide de tout le chapitre et concentrez-vous ensuite sur ce qui suit.

chapitre-7.1: Ambiguity resolution: bien étudier le chapitre-7.2.1-General aspects of ambiguity resolution. Concentrez vous sur les techniques de recherche puisqu'elles sont essentielles au RTK, qui est la solution GPS la plus utilisée en arpentage (voir: chapitre-7.2.3 Search techniques – A standard approach – Ambiguity resolution on the fly.) Les détails des autres techniques peuvent être omis.

chapitre-7.2: Adjustment, filtering and quality measures: chapitre-7.3.3. Network adjustment couvre le principe des solutions pour les lignes de base simples et les solutions multi-points, en plus de les comparer. Il explique aussi l'ajustement des moindres carrés des lignes de base, ceci est utilisé souvent dans les suites de logiciels commerciaux. chapitre-7.3.4 La dilution de la précision donne les antécédents historiques des DOP. On peut omettre le reste de ce chapitre.

chapitre-8: Data transformation: tout le chapitre.

chapitre-9: GPS: donne de l'information sur l'historique de son développement, la technologie de pointe, et la modernisation à venir du GNSS le plus important et le plus utilisé.

chapitre-10: Glonass: on peut omettre.

chapitre-11: Galileo: on peut omettre.

chapitre-12: GNSS: les sections suivantes :

chapitre 12.1.1 Comparaison de GPS, Galileo, et Glonass.

chapitre-12.3.1 Differential systems – Principles.

chapitre-12.4.1 Space based augmentation systems – Principles – WAAS.

Pour les systèmes complémentaires canadiens, vous devriez retourner à :

[Héroux (2006): A1-chapitre-4: Products, Tools and Services for Satellite Geodesy].

chapitre-13: Applications: chapitre 13.1.2 Position determination - ne présente pas de nouvelle matière. Il est important puisqu'il résume les différents modes du point de vue des applications. Le reste du chapitre 13 et le chapitre 14: la conclusion n'est pas essentielle

mais elle pourrait élargir vos connaissances générales des GNSS au delà des applications de positionnement pur.

Questions type:

Q9.20. Que sont les ambiguïtés de phase initiale ?

Q9.21. Pourquoi doit-on en tenir compte ?

Q9.22. Pourquoi sont-elles importantes ?

Q9.23. Qu'est-ce que le PDOP et quelle est son utilisation ?

Explications supplémentaires :

Les ambiguïtés de phase initiale sont liés à des observations de phase. Ces dernières sont ambiguës. Ceci provoque une situation où des inconnues supplémentaires doivent être considérées lors de l'utilisation des observations de phase: les ambiguïtés de phase initiale, succinctement appelées « ambiguïtés » dans le texte suivant. Elles sont des nombres entiers, au moins lors de l'examen des différences doubles. La manière la plus simple de les estimer consiste à les considérer tout d'abord comme des inconnues complémentaires à valeurs réelles lors d'un ajustement. Elles sont estimées avec que les coordonnées inconnues. On vérifie par la suite si les estimations réelles obtenues peuvent être affectée à des nombres entiers. (La valeur a un petit écart type et se rapproche beaucoup d'un nombre entier). Une fois les valeurs entières des ambiguïtés identifiées, on recalcule la solution. Lors de cette dernière étape, les ambiguïtés ne sont plus des inconnues.

Le problème de cette approche est qu'un certain temps est requis, généralement une demi-heure à une heure de données pour résoudre les ambiguïtés dans le cas d'une petite ligne de base (quelques kilomètres). Ceci est inacceptable pour une application RTK qui doit recevoir les valeurs instantanément, ou presque. Pour résoudre ce problème, les algorithmes de recherche sont utilisés. Ils s'appuient sur le fait que toutes les ambiguïtés doivent être des nombres entiers. Différents ensembles de candidats possibles sont définis et testés afin de trouver le bon. Cette approche requiert des mesures double fréquence ou, tout au moins, elle fonctionne mieux dans ce cas. L'augmentation de la précision dans la détermination de coordonnées lors du passage d'ambiguïtés à valeurs réelles (solution ambiguïté flottante) aux ambiguïtés nombres entiers (ambiguïté solution fixe) dépend de la durée de l'observation. Pour une solution statique de 24h l'augmentation est marginale tout au plus, tandis que dans une solution RTK- avec 30 secondes de données, on passe généralement de l'ordre du mètre à l'ordre du centimètre. C'est ce qui explique pourquoi la résolution rapide des ambiguïtés est la caractéristique clé d'une solution RTK.