

Mise en œuvre de l'arrêté sur les classes de précision

Retour d'expérience de la Ville de Nice

■ Ludovic ANDRES

Voilà bientôt trois ans que le nouvel arrêté définissant les classes de précision applicables aux catégories de travaux topographiques réalisés par l'Etat, les collectivités locales et leurs établissements publics, ou exécutés pour leur compte, est paru au Journal Officiel (Arrêté du 30 Octobre 2003), en remplacement de l'arrêté sur les Tolérances de Levers (Arrêté du 21 Janvier 1980). Une durée suffisamment longue pour pouvoir maintenant estimer son niveau d'application, ses bienfaits, les difficultés rencontrées dans le cadre de sa mise en œuvre, ou les éventuelles évolutions souhaitables. Ces points, qui vont être examinés en détail par le Groupe de Travail Obligation de Rattachement du Conseil National de l'Information Géographique (CNIG) devraient permettre d'obtenir prochainement à travers la variété et la représentativité des acteurs qui composent le groupe, et grâce à leurs retours d'expérience, une vision élargie et objective de la mise en application du décret, ainsi que des propositions concrètes d'évolution. En attendant ces conclusions, la Ville de Nice apporte à travers cet article, son simple témoignage et ses réflexions, sur la mise en œuvre de cet arrêté.

Dès fin 2003, soit peu de temps après sa publication, toute une série d'articles explicatifs était parue dans les revues spécialisées tels XYZ ou *Géomètre* afin d'en favoriser la compréhension et inciter à son utilisation.

La Ville de Nice (cf. Delerba et Andres, 2003) relevait alors un fort intérêt pour cette nouvelle réglementation conduisant à changer la manière de réaliser une commande publique de levé topographique, ainsi que son contrôle, d'autant que cela s'inscrivait en parfaite har-

monie avec le décret d'application de l'article 53 de la loi d'Aménagement et de Développement Durable qui a défini depuis le 26 décembre 2000 le RGF93 (Décret n° 2000-127) comme le nouveau système de référence en vigueur en France.

L'arrêté sur les classes de précisions

Il n'est pas nécessaire ici de s'étendre longuement sur la description détaillée de l'arrêté et sur ses avantages puisqu'une large communication existe maintenant sur ce sujet. Il convient cependant de se remémorer rapidement les points clefs qui le rendent particulièrement attrayant et son principe de fonctionnement.

■ Rappel des avantages et objectifs

Tout d'abord, il doit faciliter les relations entre les donneurs d'ordre et les prestataires exécutant les divers travaux topographiques en constituant une interface claire et simple entre eux :

- au moment de la commande par la définition des classes de précision à respecter
- au moment de la recette par la réalisation de contrôles de précision

Il incite également à effectuer des spécifications techniques en termes de précision qui correspondent aux besoins réels, puisque la difficulté et le coût liés aux contrôles dépendent aussi de la précision demandée. Il devient alors particulièrement souhaitable de ne pas imposer une précision inutilement trop grande.

Il permet ainsi à une concurrence saine et plus égalitaire de s'exercer puisque les prestataires savent désormais que leurs travaux seront soumis à une évaluation systématique, rigoureuse, et quantifiée.

Enfin, il tient compte des nouvelles évolutions techniques intervenues au niveau de la saisie et du traitement des données depuis deux décennies, et autorise le géomètre ou topographe à décider du choix de la méthode de travail et des technologies qui lui semblent les plus appropriées à la réalisation de son chantier.

■ Rappel du principe de fonctionnement

On spécifie la précision souhaitée par une classe de précision exprimée en centimètre. Nous ne sommes plus dans

une spécification de moyens, mais dans une spécification de résultats (M. Kasser, 2003).

On définit également les bases sur lesquelles les contrôles de précision seront menés.

On procède finalement au contrôle des travaux topographiques réalisés.

■ Le cadre réglementaire, les outils

On utilise un modèle d'erreur : gabarit standard ou spécifique.

On effectue le contrôle par échantillonnage :

- on spécifie le nombre d'objets que l'on va contrôler
- on procède aux mesures de contrôle "selon les règles de l'art" et en respectant un facteur de sécurité de 2 au minimum.

On respecte une méthodologie pour déterminer à partir des mesures de contrôle et du modèle d'erreur si le levé respecte la classe de précision demandée.

Enfin, il est nécessaire de souligner que l'arrêté définit trois catégories de travaux : le canevas, les objets géographiques, et les images rectifiées et cartes scannées remises en géométrie.

Première expérience de mise en œuvre à la Ville de Nice : un marché lancé en mars 2004 pour la réalisation d'une polygonale de précision

Il s'agissait de définir les prestations de topographie nécessaires à l'obtention d'une polygonale de haute précision s'étendant sur plusieurs kilomètres, pour la réalisation de travaux routiers d'une importante voie traversant la commune (Figure 1). Cette polygonale devait être établie avant la phase de travaux pour servir aux implantations et contrôles du chantier.

■ Le cahier des charges

Au départ, la précision demandée par le maître d'œuvre (la Direction des Grands Travaux d'Infrastructure de la Ville de Nice) était de 5 mm sur chacun des points, aussi bien en planimétrie

qu'en altimétrie, et ce, rattaché dans les systèmes de référence NTF et NGF - IGN69. Il s'agissait des précisions qu'il demandait par habitude, depuis "toujours" pour des travaux topographiques de ce type.

Aussi il a été nécessaire d'effectuer d'une part un petit travail d'explication sur l'importance et l'impossibilité de ce qui était demandé, et d'autre part d'analyser ensemble les besoins réels afin d'aboutir rapidement, et sans difficulté aucune, à des spécifications en termes de précision qui correspondaient réellement à leurs besoins, soit 1,5 cm au lieu de 5 mm. De même le système de référence NTF a été remplacé dans le texte par le RGF93. Cependant en confrontant à l'arrêté ces précisions de l'ordre du centimètre et demi, il est apparu qu'il serait particulièrement difficile de réaliser leur contrôle dans le système de référence légal. Il a donc été décidé de demander à ce que la polygonale aie une précision planimétrique interne de 1,5 cm et de 2,5 cm en précision totale, sans imposer de gabarit d'erreur spécifique. Cette précision interne correspondait localement aux besoins, tandis que la précision totale était suffisante pour insérer les plans d'étude dans le plan topographique existant (avec des vérifications complémentaires) et pour permettre d'établir ultérieurement le levé topographique final à intégrer dans la base de données de la Ville de Nice. Cette dernière qui comporte plus de 14 000 stations et environs 1 200 000 points de semis levés en x, y et z dans les systèmes RGF93 projection Lambert 93 et NGF - IGN69, couvre 90 % du corps de rue du domaine public, sur les 7 200 hectares de la commune.

Afin de préserver la qualité interne de la polygonale tout en disposant de coordonnées dans le système de référence légal, il a clairement été spécifié dans le cahier des clauses techniques particulières que les modalités de calcul du rattachement devraient être choisies afin de ne pas altérer la précision interne du canevas.

La Ville de Nice mettait à la disposition du titulaire les données de sa station Permanente bi-fréquence GPS intégrée

■ ■ ■ au réseau RGP de l'IGN (station NICA), qui pouvait servir au rattachement au RGF93, et une liste de repères de nivellements NGF - IGN69 récemment observés (L. Andres, 2005) pour le rattachement altimétrique. Il était demandé à ce que les coordonnées des sommets de la polygonale soient calculées et fournies dans le système géodésique local, et national.

Une trentaine de points de canevas ont été implantés, observés et calculés par le prestataire qui a remporté le marché, la société ATM (St Laurent du Var, Alpes Maritimes).

■ Les critères pour le contrôle de la précision

Restait à mettre au point la procédure de contrôle que nous avons décidé de réaliser en régie, puisque la Ville de Nice dispose d'un Service de Topographie composé d'une quinzaine d'agents compétents et du matériel approprié. Le contrôle de la précision totale a été réalisé par GPS en mode statique avec deux sessions d'observation de 3 heures par point tandis que la précision interne s'est faite de manière plus traditionnelle, au tachéomètre, en respectant les "règles de l'art" permettant d'assurer une précision meilleure que 7,5 millimètres (respect du coefficient de sécurité choisi égal à 2). Le contrôle altimétrique des repères de nivellement s'est effectué par nivellement direct en cheminement double, avec un niveau numérique de haute précision, des mires invar à code barre et en suivant un mode opératoire approprié.

En ce qui concerne la précision interne planimétrique, huit points ont été contrôlés, et la Table 1 ci-dessous présente les conditions que doivent respecter ces points en appliquant directement les prescriptions de l'arrêté avec le modèle d'erreur standard.

Quelques constats :

- En examinant l'écart moyen en position on s'aperçoit qu'il est supérieur à la classe de précision demandée de 1,5 cm. Cela peut étonner, mais est tout à fait normal puisque cette valeur intègre le fait que la mesure de contrôle n'est pas parfaite et comporte elle-même une erreur.



(source : Philippe Pen, Direction des Grands Travaux d'Infrastructure)

Figure 1 : Chantier de réalisation du doublement de la voie Mathis.

| | | |
|---|--|---------|
| Les données en entrée | Nombre [N] d'objets de l'échantillon | 8 |
| | Classe de précision [xx] demandée | 1,5 cm |
| | Coefficient de sécurité [C] | 2 |
| | Nombre [n] de coordonnées des objets | 2 |
| Les critères à respecter selon l'arrêté | L'écart moyen en position doit être inférieur à | 1,69 cm |
| | Premier seuil [T1] | 4,08 cm |
| | Deuxième seuil [T2] | 6,13 cm |
| | Nombre maximum autorisé [N'] d'écarts dépassant le premier seuil | 1 |
| | Nombre maximum autorisé d'écarts dépassant le deuxième seuil | 0 |

Table 1 : Conditions de précision planimétrique que doivent respecter les points contrôlés selon les prescriptions de l'arrêté sur les classes de précision, et en utilisant le modèle d'erreur standard.

- On remarquera également que le premier seuil est à 4,08 cm. Cette valeur est presque égale à 3 fois la précision demandée. Elle est importante et conduit à s'interroger si le modèle standard était dans ce cas le plus adapté à des travaux topographiques de ce type puisqu'il permet d'aller jusqu'à cette valeur et même la dépasser dans la limite de 6,13 cm pour un des huit points contrôlés.

- Le fait de devoir respecter le facteur de sécurité égal à 2 au minimum contraint à ne pas demander une précision trop grande par l'extrême difficulté que peut revêtir le contrôle.

■ L'outil de translation rotation sans facteur d'échelle

Pour vérifier le respect des valeurs, dans le cas de la précision interne d'un canevas, l'arrêté indique qu'il faut effectuer la meilleure translation et rotation sans facteur d'échelle. La difficulté a été de trouver un logiciel permettant de déterminer cette meilleure translation et rotation sans facteur d'échelle. Les logiciels de calculs topographiques ne disposaient pas encore de cette fonctionnalité. Après plusieurs recherches, il a été décidé de réaliser en interne cet outil en Visual Basic.

Dans le cas d'un contrôle de précision planimétrique interne la meilleure translation et rotation peut s'apparenter à déterminer une transformation par la méthode d'Helmert pour laquelle le facteur d'échelle serait égal à 1. Bien que simple, cette méthode d'Helmert ne permet cependant pas de contraindre directement le facteur d'échelle à 1. En effet : on sait que pour un point M dont les coordonnées sont (X_1, Y_1) dans le repère (O_1, i_1, j_1) et (X_2, Y_2) dans le repère (O_2, i_2, j_2) on peut écrire l'équation matricielle suivante :

$$\begin{bmatrix} X_2 \\ Y_2 \end{bmatrix} = E \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_1 \\ Y_1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} T_x \\ T_y \end{bmatrix}$$

lorsque (Figure 2) :

- (T_x, T_y) représente le vecteur translation entre les repères (O_2, i_2, j_2) et (O_1, i_1, j_1)
- E est le facteur d'échelle défini de telle sorte que $\|i_1\| = \|j_1\| = E \cdot \|i_2\| = E \cdot \|j_2\|$
- θ est l'angle de rotation entre les repères (O_1, i_1, j_1) et (O_2, i_2, j_2)

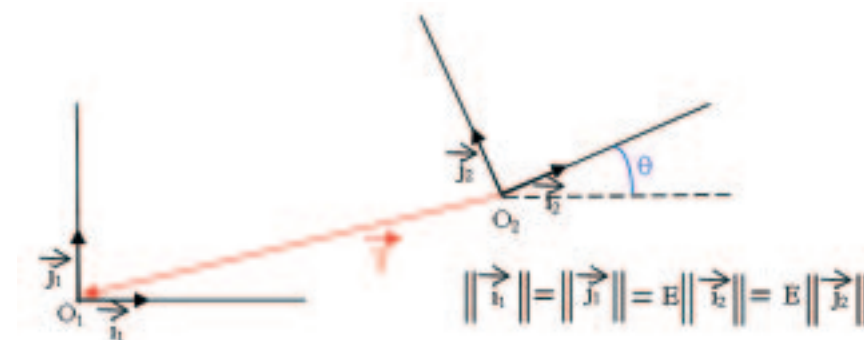


Figure 2 : Représentation d'une translation, rotation, avec facteur d'échelle.

En pratique, les points mesurés lors du contrôle pourront s'apparenter aux points connus dans le système (O_2, i_2, j_2) tandis que ceux initialement fournis par le prestataire seront considérés comme étant exprimés dans le système (O_1, i_1, j_1) . En posant $a = E \cos \theta$ et $b = E \sin \theta$ et pour N points contrôlés, on arrive au système d'équations suivant, formulé sous forme matricielle :

$$\begin{bmatrix} X_2^i \\ Y_2^i \\ \vdots \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_1^i & Y_1^i & 1 & 0 \\ Y_1^i & -X_1^i & 0 & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ b \\ T_x \\ T_y \end{bmatrix}$$

où i est l'indice du point mesuré et $1 \leq i \leq N$

Ce système comporte 2N équations et quatre inconnues. Avec au minimum deux points contrôlés on pourra donc calculer les paramètres a, b, T_x et T_y . En pratique un nombre important de points vont être contrôlés et vont conduire à une surdétermination de ce système d'équations. Du fait des erreurs liées aux mesures, ces équations apparaîtront comme étant toutes indépendantes. On peut résoudre de tels systèmes par la méthode d'approximation par les moindres carrés. Mais rien n'impose que $\sqrt{a^2 + b^2}$ soit égal à 1, et l'on aura donc *in fine* $E \neq 1$.

Pour remédier à ce problème, et donc afin d'assurer un facteur d'échelle égal à 1 on procède en trois étapes, de la manière suivante :

- On calcule le meilleur jeu de paramètres de translation, rotation avec facteur d'échelle.
- On applique aux coordonnées du prestataire les paramètres trouvés de

rotation et translation, en imposant le facteur d'échelle égal à 1 : on se ramène ainsi dans un cas où l'angle de rotation entre les deux systèmes de coordonnées est très faible, sans avoir déformé la géométrie interne des jeux de coordonnées.

- Dans ces conditions de petit angle θ , on peut procéder à un développement limité de premier ordre pour les sinus et cosinus, et fixer E égal à 1. On obtient alors le système d'équations initial suivant qui permettra de déterminer la meilleure translation et rotation sans facteur d'échelle :

$$\begin{bmatrix} X_2 \\ Y_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \theta \\ -\theta & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_1 \\ Y_1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} T_x \\ T_y \end{bmatrix}$$

On aboutit finalement au tableau de résultats ci-dessous démontrant que le prestataire a bien respecté la classe de précision demandée, puisque le contrôle trouve une erreur moyenne égale à 0,96 cm et le plus grand écart est égal à 1,5 cm ce qui est bien inférieur aux bornes T1 et T2.

Les contrôles de la précision planimétrique totale, ainsi que des précisions altimétriques (interne et totale) n'ont révélé dans le cadre de ce chantier aucune difficulté particulière de mise en œuvre.

Le travail a donc pu être évalué de manière rigoureuse et quantifiée. Il s'avère être conforme aux prescriptions demandées, voire même d'une qualité supérieure.

C'est grâce à cette première expérience concrète de mise en œuvre de l'arrêté, que nous avons pu aborder d'une manière plus prudente la rédaction

| Matricule | X | Y | X_Contrôle | Y_Contrôle |
|-----------|-----------|----------|------------|------------|
| 9002 | 9955.824 | 4914.152 | 10000.000 | 4903.452 |
| 201 | 10000.000 | 5000.000 | 10000.000 | 5000.000 |
| 240 | 9921.798 | 4832.771 | 10006.985 | 4815.527 |
| 241 | 9806.078 | 4689.017 | 9969.870 | 4634.753 |
| 202 | 9766.535 | 4599.779 | 9975.541 | 4537.321 |
| 206 | 9750.608 | 4546.149 | 9985.918 | 4482.354 |
| 9001 | 9697.848 | 4515.597 | 9952.988 | 4431.051 |
| 9003 | 9692.681 | 4389.226 | 10006.205 | 4316.317 |

| Ex | Ey | Epos |
|---------|---------|--------|
| -0.0028 | -0.0117 | 0.0120 |
| -0.0017 | -0.0111 | 0.0112 |
| -0.0001 | -0.0056 | 0.0056 |
| 0.0030 | -0.0074 | 0.0080 |
| 0.0021 | 0.0024 | 0.0032 |
| 0.0017 | 0.0095 | 0.0097 |
| 0.0049 | 0.0139 | 0.0147 |
| -0.0071 | 0.0100 | 0.0122 |

| Som(Ex) | Som(Ey) | Emoy_pos |
|---------|---------|----------|
| 0 | 0 | 0.0096 |

Table 2 : Présentation des résultats du contrôle de la classe de précision planimétrique interne de la polygonale de précision de la Voie Mathis.

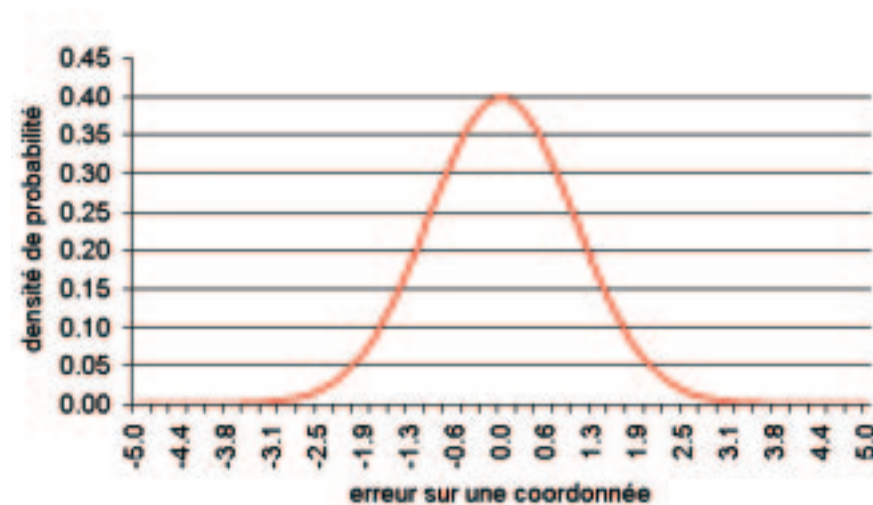


Figure 3 : Densité de probabilité d'une variable aléatoire suivant une loi normale centrée, d'écart type égal à 1, et représentant l'erreur de mesure sur une coordonnée.

d'un nouveau cahier des charges pour un autre marché de levés topographiques. Une étude d'application plus poussée s'est logiquement révélée nécessaire et a permis d'affiner la compréhension de l'arrêté. Elle a soulevé, sur le canevas et les objets géographiques à traiter, certains aspects à éclaircir pour permettre une mise en œuvre appropriée de ce nouvel arrêté.

Réflexions sur le modèle standard

L'exemple d'application de la polygonale de précision interpelle sur l'adéquation du modèle standard pour la réalisation de points de canevas de précision centimétrique.

■ Etude des seuils T1 et T2

Le modèle standard s'appuie sur l'hypothèse que les erreurs de mesures suivent une loi gaussienne. Cela paraît bien évidemment logique, puisqu'une large part des phénomènes physiques environnants peuvent être modélisés par cette loi normale. Des erreurs de mesures topographiques devraient donc très probablement la suivre dans des conditions "normales" de travail.

Cependant les seuils T1 et T2 qui résulteraient de son utilisation paraissent trop élevés au regard de la précision initiale demandée. Pour mieux comprendre l'importance de ces valeurs, il convient de revenir quelques instants et de manière simplifiée, sur le processus de "fabrication" des seuils T1 et T2 (P. Sillard, 2003).

L'erreur sur chaque coordonnée, individuellement, est supposée suivre une loi normale. La figure 3 ci-contre, illustre pour une coordonnée, la distribution de probabilité lorsque l'erreur de mesure suit une loi normale centrée et d'écart type égale à 1. On notera la présence de valeurs négatives, ce qui s'explique puisque cette erreur sur la coordonnée peut être négative ou positive.

L'arrêté sur les classes de précision ne vise pas à contrôler les écarts sur chacune des coordonnées. On raisonne donc sur les écarts en distance (euclidienne) entre la position des points à

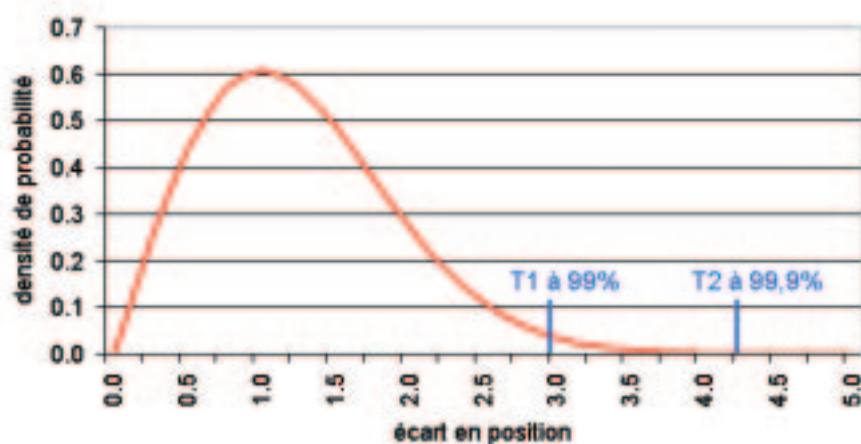


Figure 4 : Densité de probabilité d'une variable aléatoire représentant l'écart en position sur la mesure d'un point lorsque l'on considère que l'erreur commise sur chaque coordonnée suit une loi normale centrée, d'écart type égal à 1 cm.

contrôler et leur position théorique parfaite. Si l'on se place en 2 dimensions, l'écart en position sur un point est donc égal à $e = \sqrt{e_x^2 + e_y^2}$

où e_x et e_y sont respectivement les erreurs sur les coordonnées x et y pour ce point. On constate que ces écarts ne peuvent être que positifs ou nuls, contrairement aux erreurs sur chacune des coordonnées. Ces écarts en position, sont représentés par une nouvelle variable aléatoire construite à partir des variables aléatoire représentant chacune des deux coordonnées, et supposées suivre rigoureusement la même loi. La figure 4 illustre l'exemple la distribution de probabilité de cette nouvelle variable aléatoire représentant l'erreur en position.

L'erreur en position moyenne est dans ce cas égale à 1,25 cm.

En pratique, lorsque l'on effectue un contrôle, on ne mesure pas chaque erreur en position de manière parfaite puisque l'on y additionne une nouvelle erreur provenant de l'imprécision des mesures de contrôle. L'arrêté introduit un coefficient de sécurité (au minimum égal à 2) limitant ce fait. Ainsi, dans le cas ci-dessus, avec un facteur de sécurité choisi égal à 2, cela correspondrait à une classe de précision de 1,11 cm.

On voit apparaître sur la Figure 4 un seuil $T1$ qui illustre le fait que 99 % des écarts en positions sont inférieurs à

3,03 cm. Ce seuil $T1$ doit être considéré comme un seuil de "vigilance" à partir duquel il faut identifier le nombre de points le dépassant afin de s'assurer que ce nombre est compatible avec l'hypothèse gaussienne.

Le seuil $T2$ à 99,9%, est selon l'arrêté, la limite supérieure acceptable. Aucun écart ne doit dépasser cette limite. Dans l'exemple $T2$ prend la valeur théorique de 4,28 cm. Selon l'arrêté, il vaudrait 4,54 cm.

Le seuil $T2$ peut paraître trop élevé puisqu'il permet de tolérer des écarts en position multiple de la classe de précision souhaitée (ici 4 fois supérieur). Le baisser de manière trop importante équivaldrait à s'écarter de l'idée que la faute est grossière et à rejeter le travail fourni par le prestataire alors même que ses travaux respectent le modèle gaussien. Par exemple, faire passer ce taux de rejet à 99 % au lieu de 99,9 % diminuerait la valeur de la borne $T2$ de 33 %, mais cette option reste discutable.

En ce qui concerne le seuil $T1$, le diminuer seul, reviendrait à déclencher notre vigilance plus tôt. A titre d'exemple, calculons la valeur du seuil pour déclencher notre vigilance à partir de 90 % au lieu de 99 %.

On sait (P. Sillard, 2003) qu'à deux dimensions la densité de probabilité de la variable aléatoire écart en position est donnée par la formule de Rayleigh suivante, où σ est l'écart type des

variables aléatoires gaussiennes correspondant à l'erreur sur chaque coordonnée :

$$f(x) = \frac{x}{\sigma^2} e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}}$$

Pour un niveau de confiance à 90 %, la borne $T1$ doit donc être fixée de telle manière que :

$$\int_0^{T1} f(x) dx = 0,90$$

Ce qui équivaut à

$$\int_0^{T1} \frac{x}{\sigma^2} e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}} dx = \left[-e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}} \right]_0^{T1} = 0,90$$

On sait d'autre part que l'espérance de cette loi de Rayleigh vaut

$$E[X] = \sigma \sqrt{\frac{\pi}{2}} \text{ on obtient donc :}$$

$$T1 = \sqrt{-\frac{4}{\pi} \ln(0,10)} E[X]$$

On remarquera que

$$\sqrt{-\frac{4}{\pi} \ln(0,10)}$$

représente le "k" à deux dimensions que l'on trouve dans l'arrêté, mais pour un niveau de confiance fixé à 90 %.

Appliqué à notre exemple, l'écart moyen en position valant 1,25 cm on obtiendrait une valeur de seuil égale à 2,14 cm au lieu de 3,03 cm, soit 30 % plus basse. Le nombre de point toléré au-delà de $T1$ serait alors évidemment plus important, à moins de diminuer en parallèle de seuil $T2$. La figure 5 ci-dessous illustre le nombre de points tolérés au-delà de $T1$ fixé à un niveau de confiance de 90% et 99% avec $T2$ à 99,9 %. On y trouve aussi la courbe du nombre de points tolérés pour $T1$ fixé à 90 % de confiance et $T2$ ramené à 99 %. Dans le cas d'un contrôle portant sur 15 points, selon les règles actuelles de l'arrêté, le nombre maximum de points dépassant $T1$ est de 2, $T1$ valant pour notre exemple 3,03 cm. Si $T1$ correspondait à un seuil à 90 % sans bouger $T2$, ce nombre maximum serait également de 2 points ne devant pas dépasser 2,14 cm. Pour un contrôle portant sur un

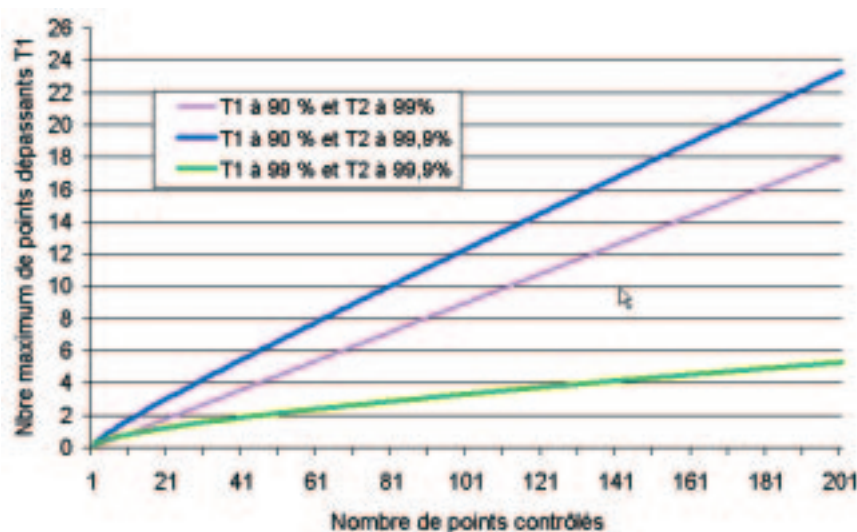


Figure 5 : Courbes représentatives du nombre maximum de points ne devant pas dépasser le seuil T1 lorsque celui-ci est fixé à un niveau de confiance égal à 99 % ou 90 % pour T2 fixé à 99,9 % ou 99 %.

coûteux de procéder à des contrôles, en respectant un facteur de sécurité de 2 au minimum. La possibilité d'utiliser un coefficient de sécurité plus faible (tout en restant supérieur ou égal à 1), si cela restait théoriquement correct, faciliterait alors grandement le contrôle dans ces cas difficiles.

La Table 3 ci-contre présente l'impact de l'utilisation du majorant du facteur de dilatation (P. Sillard, 2003) dû aux erreurs de mesures de contrôle, au lieu de sa véritable valeur. On s'aperçoit que l'impact est vraiment négligeable, sauf dans le cas où l'on pourrait utiliser un coefficient de sécurité égal à 1 : le vrai facteur de dilatation ferait baisser de 6 % la valeur de l'écart moyen en position et d'autant, par voie de conséquence, les seuils T1 et T2.

Application de l'arrêt à des points de canevas

On peut identifier deux cas de figure en ce qui concerne l'application de l'arrêt sur les classes de précision au canevas.

■ Etablissement de canevas de précision décimétrique ou inférieure

Il s'agit typiquement de travaux à des échelles cadastrales ou à des précisions suffisantes pour des chantiers topographiques liés par exemple à de l'orthophotographie ou à des réseaux de distribution ou d'assainissement.

Prenons le cas de l'établissement d'un canevas de précision 15 cm.

L'utilisation du gabarit standard semble

■ ■ ■ nombre limité de points, déplacer la valeur de T1 peut donc avoir un effet intéressant, sans aucunement remettre en cause le concept théorique sous-jacent à l'arrêt.

Baisser également le seuil T2 contribue à réduire ce nombre maximum de points au-delà de T1 ; cela abaisse également le seuil de non-conformité de la prestation, ce qui reste conceptuellement discutable par rapport à l'hypothèse gaussienne.

D'ores et déjà, en utilisant la véritable valeur du "k" correspondant au seuil T2 on peut baisser la valeur de ce seuil d'environ 6 % en 2 dimensions et d'environ 9 % en 3 dimensions. Cela n'est pas très important mais se révèle non négligeable : l'inconvénient est de complexifier très légèrement le calcul du seuil T2. Enfin on notera qu'en contrôlant uniquement de 1 à 4 points, le seuil T1 devient aussi le seuil de rejet en lieu et place du seuil T2.

■ Influence du coefficient de sécurité

Le coefficient de sécurité C a de multiples influences.

• Tout d'abord sur la valeur de l'écart moyen en position : plus le coefficient est bas (donc moins les mesures de contrôles sont précises) plus cette valeur moyenne augmente.

• Ensuite, mécaniquement, sur les seuils T1 et T2 : ceux-ci étant directement proportionnels à la valeur moyenne de l'écart moyen en position, il vont donc augmenter si C diminue.

Il faut bien comprendre que ces deux aspects ne sont aucunement gênants et il ne faut pas s'alarmer sur ces augmentations de valeurs, puisqu'elles ne reflètent que l'imprécision additionnelle due aux mesures de contrôle.

• Enfin sur la difficulté de mise en œuvre du contrôle dès lors que l'on s'approche de précisions centimétriques ou millimétriques.

Ce dernier point est d'importance dès lors que l'on effectue des travaux topographiques à très grande échelle ou de haute précision. Il peut devenir techniquement très difficile ou vraiment très

| Coeff. de sécurité | Facteur de dilatation $\left(1 + \frac{s^2}{\sigma^2}\right)^{1/2}$ | Majorant facteur de dilatation $\left(1 + \frac{s^2}{2\sigma^2}\right)$ | Diminution en % de l'écart moyen en position et de T1 et T2 |
|--------------------|--|--|---|
| 1 | 1,414 | 1,500 | 6 |
| 2 | 1,118 | 1,125 | 1 |
| 3 | 1,054 | 1,056 | 0 |
| 4 | 1,031 | 1,031 | 0 |

Table 3 : influence de l'utilisation du véritable facteur de dilatation dû à l'imprécision des mesures de contrôle, au lieu de son majorant, sur l'écart moyen en position et sur les valeurs des seuils T1 et T2

parfaitement adaptée puisqu'elle conduit avec un facteur de sécurité égal à 2, à une erreur moyenne en position de 16,88 cm, et aux seuils $T1 = 40$ cm et $T2 = 60$ cm.

Le contrôle interne pourra se faire aisément par des moyens traditionnels ou bien par GPS en mode RTK.

On pourrait même inciter, vu la valeur de la précision et la parution du nouveau décret du 10 Mars 2006 (Décret 2006-272) sur l'obligation de rattachement, à se passer de précision interne et demander l'établissement du canevas directement dans le RGF93 : cela conduirait bien sûr à spécifier une précision totale. C'est de plus, tout à fait cohérent avec l'évolution des technologies actuelles de positionnement par satellite et l'exploitation des réseaux GPS temps réels comme notamment TERIA qui devrait couvrir l'ensemble du territoire métropolitain d'ici fin 2006. Sur des chantiers opérationnels en terme de capteurs GNSS, cela conduirait même à des gains en efficacité non négligeables. Le contrôle ne devrait pas être un problème car la précision de 7,5 cm est facilement atteignable, sans surcoût particulier.

Si les seuils $T1$ et $T2$ paraissaient trop importants au maître d'ouvrage, il est tout à fait possible dans cette gamme de précision, de baisser la précision demandée : en demandant 10 cm au lieu de 15 cm, l'erreur moyenne en position est ramenée à 11,25 cm, le seuil $T1$ à 27,23 cm et le seuil $T2$ à 40,84 cm. Cette nouvelle précision, toujours décimétrique ne change pas fondamentalement la physionomie du marché, ni son contrôle, en ce qui concerne les technologies et modes opératoires à mettre en œuvre, et les coûts afférents.

Pour ces précisions décimétriques, l'utilisation de gabarits d'erreurs spécifiques ne s'impose donc généralement pas.

■ Etablissement de canevas de précision centimétrique ou supérieure

Comme on l'a vu précédemment à travers l'exemple de polygonale de précision, ou à travers les simulations numériques effectuées, on peut rencontrer certaines difficultés lorsque l'on cherche

à appliquer l'arrêté à des travaux topographiques de précision.

Sur la spécification des résultats

Les valeurs de seuils, si l'on utilise le gabarit standard, peuvent apparaître comme étant trop "lâches" par rapport aux écarts que l'on souhaite tolérer pour le chantier : cela sera d'autant plus vrai qu'il s'agira de travaux de précision pour lesquels strictement aucun écart ne doit être toléré au-delà d'une borne bien plus faible que la borne $T2$ du modèle standard.

Dans ce cas, actuellement deux solutions semblent se présenter :

- Conserver le modèle d'erreur standard, car l'on considère que les erreurs de mesures topographiques suivent habituellement une distribution gaussienne : avoir un seuil de rejet plus bas signifie donc que l'on souhaite en réalité une meilleure précision. Il suffit donc d'augmenter la précision demandée, ce qui fera baisser les seuils $T1$ et $T2$. Cette solution simple peut être difficile à appliquer à cause du coefficient de sécurité de 2 au minimum, qui va lui, compliquer grandement le contrôle dès lors que l'on va augmenter la précision.
- Etablir son propre gabarit : cette possibilité est offerte par l'arrêté. Elle peut effectivement résoudre tous les problèmes liés aux seuils que l'on rencontre avec le modèle standard pour

nos travaux de précision. Déterminer son propre modèle revient à considérer que les erreurs de mesures ne suivent pas une loi normale, et permet donc de modéliser cette nouvelle loi. Ou bien, cela revient à imposer directement le respect de certaines contraintes en faisant cette fois abstraction de toute considération statistique. Cette option intéressante du gabarit spécifique doit donc être considérée avec grande précaution, afin de ne pas aboutir à des spécifications alléchantes "sur le papier", mais qui dans la réalisation concrète des travaux topographiques à réaliser, peut générer d'énormes contraintes.

Sur la réalisation du contrôle

Que l'on utilise un gabarit standard ou bien un gabarit spécifique, l'arrêté impose de respecter un coefficient de sécurité égal à 2 au minimum. Cette contrainte, va s'avérer de plus en plus difficile et coûteuse à mettre en œuvre lorsque la précision centimétrique demandée va augmenter.

Le contrôle peut aujourd'hui se faire de manière simple et rapide en utilisant par exemple le système GPS en temps réel qui offre des précisions de l'ordre de 2 ou 3 cm en planimétrie. Cependant, en respectant un coefficient de sécurité de 2 au minimum, cela ne pourra plus se faire de cette manière à partir d'une précision demandée supérieure à 4 centimètres environ. Avec



■ ■ ■ cette technologie de positionnement par satellite, il faudrait alors réaliser des observations statiques longues et répétées afin de garantir le respect d'une précision de contrôle de l'ordre du centimètre, tout en respectant "les règles de l'art". Ces contrôles, qui étaient simplement, facilement et systématiquement envisageables deviennent alors beaucoup plus délicats à mettre en œuvre, grands consommateurs de temps de travail, et donc très coûteux. De ce fait, cela conduira probablement à ne contrôler qu'un nombre très réduit de points, ou ne favorisera pas l'application systématique de la procédure de contrôle.

Dans certains cas le contrôle peut s'avérer simplement irréalisable : il est par exemple tout à fait possible d'obtenir une précision totale d'environ 2 cm en utilisant le Réseau GPS Permanent RGP. Par contre réaliser le contrôle de cette précision totale s'avère quasiment impossible.

On rencontrera également de grosses difficultés sur les précisions internes, où la difficulté et le temps passé pour ne

contrôler que quelques points risquera de coûter fort cher.

On remarquera que la circulaire relative à la mise en œuvre de l'arrêté indique que *"la précision des mesures de contrôle sera déduite des règles de l'art et des connaissances généralement admises par les professionnels"*. Nul doute que ces "règles de l'art" risqueront parfois d'être remises en cause lorsque la procédure de contrôle rejettera une prestation. Et cela d'autant plus que la précision demandée sera grande. Qui sera alors le garant de ces "règles de l'art" ?

Cependant, il semble effectivement difficile dans un arrêté ou une circulaire, de préconiser simplement, de meilleure manière, la bonne qualité des mesures de contrôle qui doivent être réalisées. Enfin, le novice qui cherchera à appliquer l'arrêté, se posera également la question de la taille de l'échantillon de contrôle qu'il devrait choisir en fonction du nombre de points demandés. La circulaire fournit quelques exemples de contrôles, mais ne donne pas de réelle indication ou conseil sur ce sujet.

Cela semble donc indiquer que lorsque des objets sont levés par rapport à un canevas au sol, rattaché au RGF93, on ne pourrait pas effectuer le contrôle directement par GPS temps réel, mais qu'il faudrait se remettre en station sur le canevas afin de procéder aux mesures nécessaires à l'établissement des écarts. Cela serait consommateur de temps si l'on souhaite réaliser quelques contrôles répartis sur l'étendue de la polygonale. Faudrait-il appliquer une procédure comparable à la procédure de contrôle interne d'un canevas (meilleure translation et rotation) pour déterminer les écart ? Qu'en est-il lorsqu'un levé est réalisé de manière mixte, au tachéomètre et au GPS ? Ou bien, doit-on considérer que le RGF93 est le canevas de référence ?

De la même manière que pour les points de canevas, nous allons être confrontés au problème de la difficulté du contrôle dès lors que la précision demandée va augmenter.

Enfin il faudra bien s'assurer de la bonne formulation de la spécification de résultat, en identifiant clairement le canevas qui servira de référence...au contrôle.

Le groupe de travail Obligation de Rattachement du CNIG est actuellement chargé :

- d'organiser toutes les mesures d'accompagnement pour une meilleure application du décret instituant le RGF 93 comme étant le système géodésique national et le Lambert 93 ainsi que les coniques conformes 9 zones, les projections qui lui sont désormais associées.
- d'examiner les conditions d'application de l'arrêté sur les classes de précision et de faire les propositions nécessaires pour le faire évoluer si besoin.

Le groupe de travail présidé par l'Association des Ingénieurs Territoriaux de France comprend notamment les représentants de : CNIG, AITF, IGN, DGI, OGE, CERTU, EDF et les 4 écoles ESGT, ENSG, ESTP, INSA Strasbourg.

Application de l'arrêté à des objets géographiques

L'arrêté précise que *"Les classes de précision de levés d'objets géographiques sont relatives aux canevas qui leurs servent de référence, et s'analysent selon 2 critères indépendants : classe de précision planimétrique par rapport au canevas, classe de précision altimétrique par rapport au canevas selon les critères de l'article 2"*.

Dans le cas de levés d'objets géographiques, la notion de précision interne ou de précision totale disparaît donc au profit d'une simple classe de précision. Comme il s'agit d'une précision "relative" au canevas qui lui sert de référence, le contrôle ne peut donc s'effectuer qu'à partir de ce même canevas qui lui sert de référence, en examinant selon un gabarit standard ou spécifique, les écarts entre les coordonnées des objets et celles issues des mesures de contrôle.

La démarche de la Ville de Nice

Dans le cadre de son nouveau marché de levés topographiques, des spécifications précises ont été formulées visant à allier les contraintes de précision relatives aux besoins et la bonne application de l'arrêté sur les classes de précision. Une rapide présentation des grandes lignes du cahier des charges concernant ces critères de précision est présentée ci-après.

Afin de simplifier au maximum les procédures de contrôle, et puisque cela correspondait également aux besoins, il n'a été fait usage que de précision totale dans le cadre de ce marché.

En ce qui concerne le rattachement au RGF93, la Ville de Nice a décidé de fournir systématiquement les stations encadrant le chantier afin de permettre au géomètre de se rattacher facilement

quel que soit l'environnement, urbain ou collinaire. De cette manière, la Ville de Nice reste entièrement maître de la position et de la qualité de son canevas principal, planimétrique et altimétrique en sus de la simplification du travail du prestataire (donc du coût), et favorise l'absence de difficultés ultérieures lors du contrôle, induites par le rattachement au RGF93. La classe de précision totale de ces points de canevas fournis est estimée à 2 cm aussi bien en planimétrie qu'en altimétrie.

Il est ensuite demandé au prestataire de réaliser sa polygonation en respectant une classe de précision totale de 2,5 cm : le géomètre est incité à utiliser les points de canevas fournis, ou bien, s'il le souhaite vraiment, il peut tout de même procéder lui-même aux mesures permettant le rattachement direct au RGF93.

Il est évident que le contrôle de cette précision totale ne peut pas se faire rapidement en respectant le coefficient de sécurité choisi égal à 2. Aussi, il pourrait être envisagé que les contrôles soient effectués par GPS temps réel, sur plusieurs séries de mesures moyennées. Cette rapidité dans le contrôle qui sera réalisé en régie, permettrait de vérifier systématiquement chaque chantier livré. Lorsque des problèmes seraient identifiés, alors un contrôle permettant d'assurer le coefficient de sécurité égal à 2 serait appliqué. De cette manière, on dérogerait "provisoirement" à l'arrêté en appliquant un premier contrôle appuyé sur un coefficient de sécurité égal à 1. On devancerait peut être une évolution future de l'arrêté et une nouvelle possibilité d'utiliser un coefficient supérieur ou égal à 1 pour ce type de travaux.

Il est d'ailleurs clairement précisé dans le marché, qu'il pourra être tenu compte de toute évolution ultérieure du décret sur les classes de précision ; cela concernerait bien évidemment la phase du contrôle dans le cas où une évolution future du décret viserait à faciliter son application pour des classes de précision centimétrique. Une étude complète de tous les objets géographiques référencés dans notre base de données topographiques a été

| Famille | Objets | Symbole | spécification précision (Plani.Alti) |
|-----------------|---------------------------|---------|--------------------------------------|
| Assainissement | Avaloir | | 5.3 |
| | Grille 35/70 | | 2.2 |
| | Buse axe | | 5.5 |
| | Seuil | | 15.3 |
| Bâtiment | Bassin | | 3.5 |
| | Devanture | | 3.2 |
| | Dur | | 3.2 |
| Eclairage | Lampadaire double | | 5.5 |
| | Lampadaire décoratif | | 5.5 |
| EDF | Poteau | | 5.5 |
| | Pylône | | 20.20 |
| Télécom | Cabine triple | | 5.3 |
| | Cabine simple hexagonale | | 5.3 |
| | Cabine ouverte | | 5.3 |
| Limites | Clôture légère | | 5.5 |
| | Glissière de sécurité | | 10.10 |
| | Mur | | 2.2 |
| Mobilier urbain | Grille de ventilation | | 3.3 |
| | Horodateur | | 3.3 |
| | Jardinière hexagonale VDN | | 5.5 |
| Plage | Point douche | | 10.10 |
| | Poubelle temporaire | | 15.10 |
| | Dalle béton | | 5.5 |
| | Espace sportif sable | | 15.10 |
| Talus | Haut de talus | | 15.10 |
| | Pied de talus | | 15.10 |
| | Limite d'enrochement | | 30.30 |
| Végétation | Fruitier | | 20.20 |
| | Olivier | | 20.20 |
| | Palmier | | 20.20 |
| Voirie | Corde molle | | 5.5 |
| | Limite goudron | | 10.5 |
| | Trottoir | | 3.3 |

Table 3 : Extrait de la nomenclature d'objets topographiques de la Ville de Nice, présentant pour chaque objet la classe de précision à respecter.

menée. L'étude des besoins et des mesures répétées sur le terrain pour chaque type d'objet ont permis d'établir de manière réaliste les classes de précision demandées pour chacun d'entre eux. On trouvera ci-dessous (table 4) à titre d'illustration de la précision souhaitée ainsi que du positionnement des points de levés qui s'y rapportent, un échantillon de quelques uns des objets de notre bibliothèque pour plusieurs des familles qui la composent. Il a été demandé dans le cahier

des clauses techniques particulières de respecter les classes de précision de ces objets comme le permet l'arrêté.

Les contrôles de précision des objets géographiques, utiliseront le modèle standard. Ces mesures de contrôle pourraient également être réalisés par GPS temps réel.

Les procédures de contrôle aussi bien pour le canevas que pour les objets géographiques sont actuellement encore en phase d'établissement.

■ ■ ■

■ ■ ■ Enfin, il a été décidé que la taille de l'échantillon de contrôle n'excèdera pas 12 % des points de canevas et 12 % des objets géographiques levés : pour ces derniers, la composition de l'échantillons englobera des éléments représentatifs des diverses classes de précision attendues.

Conclusion

Ce témoignage ne constitue encore qu'une approche tâtonnante dans la compréhension et la mise en œuvre de l'arrêté sur les classes de précision. On a pu constater que ce dernier permet de réaliser un véritable contrôle quantifié de la qualité des prestations topographiques. La valeur ajoutée est forte car ce travail de contrôle n'avait habituellement jamais pu être systématisé et réalisé avec autant de rigueur pour recetter les commandes topographiques réalisées par l'État, les collectivités locales et leurs établissements publics ou exécutés pour leur compte.

L'expérience laisse à penser que l'arrêté semble particulièrement bien adapté à tous les travaux topographiques de précision décimétrique ou de précision inférieure. Il paraît cependant un peu plus délicat à mettre en œuvre dès lors que l'on est concerné par des précisions plus importantes. Après cette période suffisamment longue d'existence de cette nouvelle réglementation nous adhérons pleinement à la démarche du CNIG de recueillir à travers les expériences de chacun, les aspects qui freinent ou compliquent son utilisation. D'ores et déjà le problème de la valeur minimale du coefficient de sécurité paraît être un des points qu'il conviendra d'analyser avec attention.

Certaines clarifications ou explications complémentaires pourraient aussi être apportées au texte, à travers une série d'articles à paraître, ou une sorte de guide d'application. Un recueil d'exemples ou de marchés type, pourrait également aider ceux qui découvrent ces règles, à établir de nouveaux marchés publics. Pour finir, on ne peut qu'inciter à l'application de cet arrêté

qui change effectivement de manière radicale la façon d'aborder la commande et son contrôle, et veiller à rester attentif aux futures conclusions du groupe de travail du CNIG sur ce sujet. ●

Remerciements

Je remercie monsieur Patrick Sillard pour ses explications et la grande disponibilité dont il a fait preuve à mon égard. J'adresse toute ma sympathie à messieurs Denis Delerba et Alain Harmel pour nos fructueuses discussions animées sur le sujet. Je remercie amicalement monsieur Michel Kasser pour le temps qu'il m'a consacré, ses conseils et son soutien personnel. Enfin je remercie sincèrement monsieur Jean-Pierre Maillard pour ses corrections et sa patience, monsieur Bernard Laugier et ses équipes, ainsi que monsieur Emmanuel Protte de la Direction de la Communication de la Ville de Nice.

Références

- ANDRES L., 2003**, *Transformation dans le Système R.G.F 93 de la base de données géographiques de la Ville de Nice*, Revue XYZ, N°97 - 4^e trimestre 2003.
- ARRETE DU 21 JANVIER 1980** *Fixant les tolérances applicable aux levés à grande échelle entrepris par les services publics*, Journal Officiel 19 Mars 1980.
- DELERBA D. - ANDRES L., 2003**, *Ville de Nice : un nouveau langage commun pour les marchés publics*, Géomètre n°12 - Décembre 2003.
- DECRET N° 2000-1276, 26 Décembre 2000**, *Décret portant application de l'article 89 de la loi n° 95-115 du 4 février 1995 modifiée d'orientation pour l'aménagement et le développement du territoire relatif aux conditions d'exécution et de publication des levés de plans entrepris par les services publics*.
- DECRET N° 2006-272, 10 Mars 2006**, *Décret modifiant le décret no 2000-1276 du 26 décembre 2000 portant application de l'article 89 de la loi no 95-115 du 4 février 1995 modifiée d'orientation pour l'aménagement et le développement du territoire relatif aux conditions d'exécution*

et de publication des levés de plans entrepris par les services publics.

KASSER M., 2003, *Les nouveaux textes réglementaires français en matière de précision des levés*, Revue XYZ, N° 96 - 3^e trimestre 2003.

SILLARD, P., 2003, *Arrêté sur les classes de précision applicables aux catégories de travaux topographiques : quelques aspects statistiques*, Revue XYZ, N° 96 - 3^e trimestre 2003.

Contact

Ludovic ANDRES

Mairie de Nice

Responsable du Service Topographie et Alignements

DCSIT - Direction Information

Géographique

Membre du GT SIG Topo de l'AITF

ludovic.andres@ville-nice.fr

ABSTRACT

Three years ago a new regulation defining survey classes for land surveys was published and replaced the former existing rules. Therefore, it is now time, and it is necessary, to examine how these new standards are used, what are the difficulties that are encountered, and what could be done in order to improve these survey class specifications. A working group of the french national council of geographic information (CNIG) is at the moment carrying out this synthesis and analysis. Meanwhile, the city of Nice presents here its first experience in applying this new regulation : this article points out the advantages that have been found, but also, the questions and problems that have been faced up. Finally, extensive use of these new rules is nevertheless encouraged and the reader is asked to look after the publication of the future results of the CNIG working group studying on that topic.