

---

**Circulaire du 16 septembre 2003 relative à la mise en œuvre de l'arrêté du 16 septembre 2003 portant sur 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**

NOR : *EQUP0300865C*

**1. Objectifs de l'arrêté**

La présente circulaire remplace la circulaire prise pour l'application de l'arrêté de janvier 1980 sur les tolérances applicables aux levés à grandes échelles devenu caduc. L'arrêté portant sur 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 intègre les évolutions technologiques intervenues au niveau de la saisie et du traitement des données depuis deux décennies, ceci afin de faciliter les relations entre les donneurs d'ordre et les entreprises prestataires exécutant les divers travaux topographiques.

Le nouveau texte ne spécifie en aucun cas les moyens à mettre en œuvre pour atteindre une certaine précision, mais simplement les outils statistiques à employer pour évaluer un levé donné. Ceci a été fait dans le but de responsabiliser séparément les donneurs d'ordre et les entreprises prestataires exécutantes :

- pour les donneurs d'ordre, il s'agit de les inciter à ne spécifier que ce dont ils ont besoin réellement en termes de précision, compte tenu de leurs contraintes économiques et des responsabilités légales qui sont les leurs, sans tenir compte des moyens à mettre en œuvre pour atteindre cette spécification, moyens qui, par ailleurs, évoluent et ne sauraient en aucun cas être précisés sans faire perdre le bénéfice de ces évolutions ;
- pour les entreprises prestataires exécutantes, il s'agit de leur laisser une complète liberté de trouver le moyen le plus adapté pour une fourniture de données ;
- et pour les deux, ce texte crée une interface stipulant clairement sur quelles bases les contrôles de précision pourront être menés, contrôles d'exactitude faits par l'entreprise prestataire exécutante ou contrôles de recette faits par le donneur d'ordre ou à sa demande.

**2. Le critère statistique : la classe de précision**

Le texte offre plusieurs possibilités.

*2.1. Le gabarit d'erreurs*

La possibilité la plus générale (art. 4 de l'arrêté) offerte est celle d'une définition sur mesure d'un gabarit d'erreurs, dont un exemple sera donné en annexe. On peut ainsi, entre autres possibilités et à titre d'exemple, changer les seuils adoptés du modèle standard décrit dans l'article 5 de l'arrêté.

*2.2. Le taux de rejet*

Le modèle standard utilise divers éléments de tolérance pour indiquer de façon simple ce qui est accepté ou rejeté dans une classe de précision donnée, et correspondrait pour un modèle gaussien à deux taux de rejet aux seuils de 1 % et 0,01 %. Dans ce cas la classe de précision repose sur trois critères à remplir simultanément, une erreur moyenne en position, le nombre d'objets dépassant le premier seuil de tolérance, et la non-conformité systématique d'objets dépassant le second seuil de tolérance.

*2.3. Le modèle standard*

Enfin, la notion de classe de précision [xx] cm implique l'emploi du modèle standard. Elle se substitue aux anciennes classes de précision de l'arrêté de 1980, alors en nombre limité. Désormais il est possible de créer autant de classes de précision que nécessaire, et l'appartenance à une classe donnée passe par le respect simultané des 3 critères déjà évoqués. Par ailleurs, ces critères reposent exclusivement sur la mesure de l'écart moyen en position  $E_{\text{moy pos}}$  déduit des écarts en position  $E_{\text{pos}}$  des objets choisis pour le test, cet écart ayant

un sens physique plus évident que des écarts sur des coordonnées. En explicitant ces termes :

Par exemple :  $E_{\text{pos}} = E(x_{\text{contrôle}} - x_{\text{objet}})^2 + (y_{\text{contrôle}} - y_{\text{objet}})^2$  pour un test portant uniquement sur deux coordonnées planimétriques d'un objet donné ;

Pour un test portant sur une coordonnée planimétrique  $E_{\text{pos}} = x_{\text{contrôle}} - x_{\text{objet}}$  ;

$$E_{\text{pos}1} + E_{\text{pos}2} + \dots + E_{\text{pos}n}$$

$$E_{\text{moy pos}} =$$

pour  $n$  objets testés.

$n$

Il convient de bien noter le caractère conventionnel des trois critères adoptés pour la définition du modèle standard et de ses deux seuils de tolérances. Ceux-ci ont été définis par analogie avec ce que fournirait un modèle d'erreurs strictement gaussiennes pour des seuils de tolérance à 1 % et à 0,01 %, pour des mesures de contrôle effectuées sur une proportion importante des données livrées. Bien évidemment il convenait aussi de disposer d'un outil de travail pour des contrôles d'objets géographiques portant sur des échantillons réduits, mais dont la valeur statistique est également réduite, et/ou portant sur des objets dont le modèle d'erreur n'est pas gaussien, ce qui représente les cas les plus courants. Le modèle standard proposé permet ainsi aux donneurs d'ordres et aux entreprises prestataires exécutantes de disposer d'un outil de travail commun et bien défini, indépendamment de son éventuelle valeur statistique, les tailles d'échantillon et plus généralement les modalités d'échantillonnage étant définies par voie contractuelle.

### 3. Les modalités de contrôle

Tout contrôle implique l'emploi de mesures de contrôle fournissant *a priori* des résultats d'une précision au moins deux fois meilleure que celle des objets à tester. La précision des mesures de contrôle sera déduite des règles de l'art et des connaissances généralement admises par les professionnels (en faisant telles mesures avec tels appareils selon telles méthodes, on obtient telle précision). Une mesure de contrôle n'implique pas nécessairement l'emploi d'autres instruments : on peut souvent obtenir une meilleure précision avec les mêmes instruments et des méthodes opératoires différentes, par exemple des mesures de plus longues durées (cas du GPS) ou avec plus de répétitions (cas des mesures au théodolite), etc.

Dans tous les types de levés, le texte propose de traiter de façon séparée l'erreur interne du levé et l'erreur de mise en référence, mais permet également de ne considérer que l'erreur totale. Ceci permet de traiter tous les cas rencontrés, du levé très précis (par exemple, micro-géodésie pour l'auscultation d'ouvrages de génie civil) et pas forcément rattaché au réseau légal puisque le rattachement est bien moins précis que le levé, jusqu'au canevas de précision pluri-décimétrique pour levé des objets pour un SIG de précision métrique, où le rattachement au réseau légal peut être bien plus précis que le levé lui-même.

Pour le contrôle d'objets géographiques, le texte de l'arrêté ne traite pas les problèmes spécifiques aux différents interpolateurs utilisables pour décrire une courbe à partir de quelques points levés. Par exemple, un rond-point peut, dans un cas tout à fait minimaliste, être déterminé par trois points levés, le rond-point étant décrit comme un cercle parfait passant par ces trois points. Cette tactique est risquée (aucun contrôle), et il pourra être requis (dans les spécifications du « terrain nominal ») que dans un tel cas il y ait un minimum de 4 ou même de 10 points réellement levés : ce type de spécification doit rester du domaine du contrat entre le donneur d'ordre et l'entreprise prestataire exécutante, et l'arrêté n'a pas à introduire de contraintes en la matière. Par contre, il est clair que si le contrôle ne tient pas compte des points réellement levés, ce ne sont plus les qualités géométriques des points levés qui sont évaluées, mais également celles de l'interpolateur utilisé (par exemple : il y a bien des façons de faire passer une courbe par 6 points levés). Dans ce cas, on pourrait s'attendre à des conflits sans fin sur « quel est le meilleur outil d'interpolation », et autres problèmes de ce type, qui ne sont pas du domaine d'un règlement mais plutôt de celui de spécifications particulières, base de la relation entre le donneur d'ordre et l'entreprise prestataire exécutante. L'arrêté précise donc que les contrôles doivent être effectués à proximité immédiate des points réellement levés, parce qu'en ces points les différences entre les interpolateurs possibles ne créent pas de différence appréciable dans les résultats obtenus.

#### 4. Le rattachement

La classe de précision de rattachement demandée doit être déterminée par le donneur d'ordre en fonction de ses contraintes économiques et des risques encourus par un rattachement de classe de précision insuffisante.

Il nécessite au moins la mesure de deux références différentes, compte tenu du risque d'instabilité des repères, ce chiffre de deux étant un minimum : les entreprises prestataires exécutantes sont encouragées à en utiliser davantage lorsqu'elles en ont la possibilité. La discordance résultant de ces deux rattachements conditionne aussi la classe de précision du rattachement (voir exemples en annexe). L'erreur interne est par exemple évaluée au travers d'un calcul de l'ensemble des mesures sous forme de « réseau libre », sans introduire les éléments de rattachement au réseau d'appui. Ensuite, sur un ensemble de points servant au contrôle, les coordonnées ainsi obtenues « en réseau libre » sont comparées aux coordonnées de contrôle. Pour ce faire on appliquera aux coordonnées « en réseau libre » la translation et la rotation qui minimisent au mieux les écarts obtenus : le texte laisse la liberté complète aux intéressés pour employer la méthode la plus « favorable possible », mais la solution la plus habituelle consiste à calculer cette translation et cette rotation par moindres carrés. Par contre n'est pas laissée ouverte la possibilité d'appliquer une correction de facteur d'échelle aux coordonnées publiées, le donneur d'ordre n'ayant pas vocation à entrer dans ce genre de post-traitement lorsqu'il réceptionne un lot de coordonnées.

Le cas de l'emploi d'une station GPS permanente comme référence ne nécessite pas pour autant le recours de façon obligatoire (même si ce recours est vivement conseillé) à un autre élément de rattachement (autre station GPS, borne...) si cette station fait l'objet d'un contrôle régulier de la qualité des coordonnées fournies (cas du RGP, réseau GPS permanent, dont l'IGN contrôle les données en général chaque semaine).

Le géomètre est toujours encouragé à utiliser des méthodes offrant des contrôles internes et une certaine surabondance de mesures par rapport au minimum indispensable au calcul des coordonnées des objets, ceci afin de mettre en évidence d'éventuelles fautes. La redondance peut être mise à profit pour évaluer les ellipses d'erreurs des points levés lors de compensations par moindres carrés, et une étude soigneuse des ellipses d'erreurs permet aisément de repérer les zones les moins bien déterminées, par exemple pour y effectuer préférentiellement des contrôles de respect de la classe de précision spécifiée.

#### 5. Relations donneur d'ordre- entreprise prestataire exécutante

##### 5.1. *Nombre de points contrôlés*

L'interface en matière de précision entre le donneur d'ordre et l'entreprise prestataire exécutante est ainsi, pour des objets géographiques, définie uniquement par les résultats de contrôles ponctuels indépendants des mesures ayant servi à la détermination d'origine : il faut néanmoins effectuer ces sondages, toujours onéreux, avec une exhaustivité qui dépendra du niveau de risque assumé par le donneur d'ordre, les modalités de contrôle faisant partie des éléments du contrat. Ainsi, pour des bases de données ayant une importance capitale, il pourra être normal de contrôler tous les points levés, alors que pour des levés peu critiques un contrôle pourra porter sur un sous-ensemble réduit de ces points...

Le texte spécifie donc bien sur quelles bases les cahiers des charges sont établis, et l'entreprise prestataire exécutante est ainsi parfaitement informée des types de contrôles que le donneur d'ordre est fondé d'effectuer pour procéder à la recette technique du levé qu'il a commandé : il peut lui-même en effectuer sur la même base, à titre de contrôle qualité de sa production.

##### 5.2. *Précision interne, précision de rattachement, précision totale*

Le donneur d'ordre n'est pas obligé, pour des canevas, de rentrer dans le détail de spécifications de précision interne, et/ou de précision de rattachement. Il peut aussi utiliser les concepts de précision planimétrique et/ou altimétrique totale, qui sont la combinaison des deux précédentes et peuvent s'avérer suffisants dans de nombreux cas. Il faut bien noter qu'il existe un lien entre la précision interne, la précision de rattachement et la précision totale : si le modèle d'erreurs est à peu près Gaussien, la précision totale spécifiée est égale à la somme quadratique de la précision interne, de la précision de rattachement et de la précision du réseau de référence. La logique de travail veut que l'on évalue la précision totale [yy] de toutes les façons, car il s'agit du processus le plus simple et qui constitue la meilleure interface possible entre le donneur d'ordre et l'entreprise prestataire exécutante. Et si les spécifications le stipulent il est fait appel à une évaluation de la précision interne [xx]. On en déduit alors la précision de rattachement [zz] (qui inclut alors nécessairement

celle du réseau d'appui et ne peut donc lui être inférieure), et  $[yy]^2 = [xx]^2 + [zz]^2$ . Du point de vue de l'entreprise prestataire exécutante, il est recommandé de commencer par une compensation en « réseau libre » qui permet une bonne autoévaluation de la qualité des mesures, et au besoin une aide à la recherche de fautes. On peut aussi en tirer une évaluation de l'erreur interne.

#### 6. Classes de précision (selon le nouvel arrêté) des anciennes « catégories de levés » de l'arrêté du 21 janvier 1980

L'arrêté du 21 janvier 1980 étant largement basé sur des spécifications de moyens, il n'y a souvent aucune possibilité de donner un équivalent à certaines catégories qui y figurent. Il en est ainsi pour les canevas d'ensemble, les canevas polygonaux, les canevas altimétriques ou les travaux photogrammétriques. Par contre, il est possible de tenter un rapprochement pour les « levés de détail et vérification des plans », qui introduisent les catégories P1 à P7 en planimétrie et A1 à A6 en altimétrie. En première approximation, les classes de précision du nouvel arrêté correspondent à peu près aux coefficients « Q » mentionnés en V-B-1.2 et V-B-2.2 de l'arrêté de 1980, soit donc :

CATÉGORIE planimétrique	COEFFICIENT Q en cm, classe de précision approchée en cm	CATÉGORIE altimétrique	COEFFICIENT Q en cm, classe de précision approchée en cm
P1	2	A1	1
P2	4	A2	2
P3	10	A3	4
P4	20	A4	10
P5	40	A5	20
P6	100	A6	> 20
P7	> 100		

Cette correspondance ne peut pas être rigoureuse compte tenu des bases statistiques de l'arrêté du 21 janvier 1980 qui sont différentes de celles du présent arrêté. Par exemple, dans l'arrêté du 21 janvier 1980 il n'y a pas de prise en compte du nombre de coordonnées considérées. De même, les différents seuils de tolérances sont évalués sur des bases autres (un seul seuil de tolérance dans l'arrêté du 21 janvier 1980, au lieu de deux dans le nouvel arrêté).

La présente circulaire et son annexe seront publiées au *Journal officiel* de la République française.

Fait à Paris, le 16 septembre 2003.

Gilles de Robien

### A N N E X E

EXEMPLES D'APPLICATION DE L'ARRÊTÉ DU 16 SEPTEMBRE 2003 PORTANT SUR LES CLASSES DE PRÉCISION APPLICABLES AUX CATÉGORIES DE TRAVAUX TOPOGRAPHIQUES RÉALISÉS PAR L'ÉTAT, LES COLLECTIVITÉS LOCALES ET LEURS ÉTABLISSEMENTS PUBLICS OU EXÉCUTÉS POUR LEUR COMPTE

#### I. - Polygonale

Une polygonale est un type classique de chantier de topométrie qui offre très peu de redondance et qui donc pose traditionnellement des problèmes délicats de détection des fautes. Typiquement, on commence par observer un point A, départ de la polygonale, et on détermine ses coordonnées par rapport au réseau d'appui ainsi que l'orientation de la visée de départ. Ces déterminations doivent « mettre en jeu suffisamment de points

d'appui pour que des discordances entre les points du réseau puissent être détectées » : par exemple, pour un relèvement ou une intersection classique, 4 points au moins sont nécessaires. Pour des rattachements utilisant angles et distances, deux points sont nécessaires et, bien entendu, l'entrepreneur est toujours encouragé à en utiliser plus si cela est possible. Pour la suite de la polygonale, on procède à une série de mesures d'angles et de distances permettant de déterminer progressivement les points successifs nécessaires. A la fin de cette polygonale, on détermine les coordonnées du point d'arrivée, ainsi que l'orientation de la dernière visée, par rapport au réseau d'appui. Il existe pour ce type de chantier tout un corpus d'usages issus de l'époque où les moyens de calculs électroniques étaient inexistantes, dont beaucoup n'ont plus guère de raisons d'être (par ex. : un cheminement doit être tendu) alors que d'autres doivent rester indispensables (par ex. : les côtés ne doivent pas avoir des longueurs trop différentes), les calculs faisant l'objet de compensations par moindres carrés. Les entrepreneurs sont donc invités à ajouter autant de données complémentaires qu'il est possible afin de faciliter la recherche de fautes et d'améliorer la précision, par exemple en lançant des visées sur des points connus ou sur d'autres points distants de la polygonale en cours de mesure.

### 1.1. Classe de précision planimétrique totale

Si un contrôle portant sur la précision planimétrique totale est effectué, on redétermine les coordonnées de N points de la polygonale par un procédé de mesure permettant d'atteindre une classe de précision au moins deux fois meilleure que la classe de précision visée (relèvement, GPS...). Les nouvelles coordonnées obtenues sur les N points de contrôle sont comparées aux coordonnées livrées, sans aucun autre traitement : les trois critères *a*, *b* et *c*

de l'article 5 sont testés pour vérifier si l'erreur totale de la polygonale (erreur interne et erreur de rattachement) est de classe [yy]. On suppose que l'on est ici dans le cas  $n = 2$  (mesures purement planimétriques avec une altimétrie ayant une erreur assez différente de la planimétrie, l'altimétrie étant alors traitée séparément), donc  $k = 2,42$  (table 1), et que  $C = 2$  (mesures de contrôles de classe deux fois plus précise que la classe de précision [yy] visée). On procède alors aux tests suivants :

- a) L'écart moyen en position  $E_{moy\ pos}$  de l'échantillon doit être inférieur à  $[yy] \times (1 + 1/8)$  ;
- b) Parmi les N points testés, le nombre N' de ceux dépassant la valeur

$$1$$

$$T = k \times [xx] \times (1 +$$

)

$$2 \times C^2$$

ne doit pas excéder l'entier immédiatement supérieur à

$0,01 \times N + 0,232 \times EN$ , sachant que si  $N < 5$ ,  $N' = 0$  ;

- c) Aucun écart en position  $E_{pos}$  dans l'échantillon n'excède  $1,5 \times 2,42 \times [yy] \times 1,125 = 4,08 \times [yy]$ .

### 1.2. Classe de précision planimétrique interne

La précision interne est évaluée par comparaison des coordonnées obtenues à l'issue des calculs de compensation effectués en réseau libre. Dans ce calcul, on considère comme inconnues les coordonnées des points du réseau d'appui (sauf un point dont les coordonnées seront arbitrairement imposées, ainsi qu'une orientation). On ne demande d'ailleurs pas aux calculs de déterminer ces inconnues. On recherche ensuite, par moindres carrés, la translation et la rotation d'ensemble du chantier à appliquer au « réseau libre » pour que les coordonnées ainsi obtenues soient aussi proches que possible de celles des N points ayant fait l'objet de contrôles. On obtient ainsi une série d'écarts

$$E_{pos} = E(x_{\text{contrôle}} - x_{\text{objet}})^2 + (y_{\text{contrôle}} - y_{\text{objet}})^2$$

dont on prend la moyenne comme précisé au 1 ci-dessus :

$$E_{pos1} + E_{pos2} + \dots + E_{pos N}$$

$$E_{moy\ pos} =$$

N

Si l'on travaille uniquement en planimétrie, avec donc  $k = 2,42$  (table 1) et un coefficient de sécurité des mesures de contrôles  $C = 2$  (mesures de contrôles de classe deux fois plus précise que la classe de précision  $[xx]$  visée), on procède alors aux tests suivants :

- L'écart moyen en position  $E_{moy\ pos}$  de l'échantillon doit être inférieur à  $[xx] \times (1 + 1/8)$  ;
- Parmi les  $N$  points testés, le nombre  $N'$  de ceux dépassant la valeur

1

$$T = k \times [xx] \times (1 +$$

)

$$2 \times C^2$$

ne doit pas excéder l'entier immédiatement supérieur à

$0,01 \times N + 0,232 \times EN$ , sachant que si  $N < 5$ ,  $N' = 0$  ;

- Aucun écart en position  $E_{pos}$  dans l'échantillon n'excède  $1,5 \times 2,42 \times [yy] \times 1,125 = 4,08 \times [yy]$ . Si ces trois conditions sont vérifiées, alors les erreurs internes sont de classe  $[xx]$ .

### 1.3. La mise en référence dans la référence légale

Par exemple en 2002, le RBF, réseau de base français, est de classe  $[2]$  cm, la NTF recalculée dans le référentiel RGF 93 est de classe  $[5]$  cm, le RGP, réseau GPS permanent, est de classe  $[0,5]$  cm si les mesures GPS de rattachement sont de qualité suffisante. Il est donc prudent de vérifier qu'il n'y a pas d'écarts internes à chaque rattachement (discordances sur les coordonnées obtenues par les différentes solutions de rattachement) qui dépassent ces valeurs. Si ces valeurs sont dépassées, cela se traduira par une augmentation de l'écart entre  $[yy]$  et  $[xx]$ , et pourra conduire à une classe d'erreur totale dépassant les seuils spécifiés pour le chantier considéré.

### 1.4. Exemple numérique

Une entreprise de travaux publics est tenue d'implanter une route. Pour ce faire, le maître d'ouvrage fournit la polygonation de précision destinée à cette mission. Compte tenu de la précision demandée, l'entreprise décide de faire contrôler cette polygonation avant le commencement des travaux. Le contrôle est effectué par GPS statique précis sur deux missions décalées de six heures.

#### 1.4.1. Contrôle de la classe de précision

Nombre de points de contrôle = 7 incluant 2 points d'appui en planimétrie, soit  $N = 5$  pour la planimétrie et  $N = 7$  en altimétrie. Classe  $[yy]$  de précision demandée = 0.12 m.

Analyse des résultats :

N	eX	eY	E <sub>pos</sub>
104	0.002	- 0.088	0.088
109	- 0.040	- 0.073	0.083
144	- 0.070	- 0.020	0.073
114	- 0.044	0.124	0.132
119	- 0.079	0.144	0.164

Ecart moyen en position  $E_{moy\ pos} = 0,108$  m. Pour 2 coordonnées  $k = 2,42$ .  $N = 5$ . Coefficient de sécurité

des mesures de contrôle  $C = 2$  :

- a) L'écart moyen en position est inférieur à  $0,12 \times (1 + 1/2C^2) = 0.135$  m ;
- b) Parmi les 5 points testés, aucun point n'excède le premier seuil de  $0,12 \times (1 + 1/2C^2) \times 2,42 = 0,326$  m (un point dépassant cette valeur aurait été acceptable) ;
- c) Aucun écart en position n'excède  $1,5 \times 2,42 \times 0,12 \times 1,125 = 0.49$  m. La polygonale est donc bien de classe [12] cm en planimétrie.

#### 1.4.2. Contrôle du nivellement

Le contrôle a été effectué en double cheminement avec un niveau de haute précision et des mires à lame invar, tout le matériel étant bien réglé. Classe [yy] de précision demandée = [0,5] cm.

Analyse des résultats :

N° point	Ecart (m)
16	0.008
104	- 0.002
109	0.001
144	0.008
114	- 0.006
119	0.003
18	0.004

Ecart moyen en position (moyenne des valeurs absolues des écarts) = 0,0046 m. Classe de précision demandée [0,5] cm. Pour 1 coordonnée  $k = 3,23$ .  $N = 7$ . Coefficient de sécurité des mesures de contrôle  $C = 2$  :

- a) L'écart moyen en position est inférieur à  $0,005 \times (1 + 1/2C^2) = 0,0056$  m ;
  - b) Parmi les 7 points testés, aucun point n'excède le premier seuil de 0,018 m, le nombre toléré étant de 1 ;
  - c) Aucun écart en position n'excède  $(1,5 \times k \times 0,005 \times [1 + 1/2C^2]) = 0,0272$  m.
- La polygonale est donc bien de classe [5] mm en altimétrie.

## II. - Nivellement direct

Le nivellement direct est un procédé qui offre extrêmement peu de surabondance, avec comme uniques éléments de redondance interne possibles une mesure effectuée en aller-retour ou un cheminement fermé sur lui-même. On ne peut pas en effet considérer un cheminement double (consistant pour chaque station du niveau à lire deux échelles différentes sur une même mire ou à lire une seule échelle par mire en modifiant la hauteur du niveau entre deux séries) comme offrant une réelle redondance, beaucoup d'erreurs des deux cheminements menés en parallèle étant les mêmes : ce type de cheminement peut mettre en évidence une partie (et seulement une partie) des fautes de mesure toujours possible, et n'offre donc une fiabilité qu'à peine améliorée par rapport à un cheminement simple. Nous prenons le cas d'un cheminement de nivellement direct d'une dizaine de kilomètres, avec 15 nouveaux repères nivelés lors de ce cheminement allant de A et parvenant à B. En A, deux repères NGF ont été rattachés, RN1 et RN2, en B également, RN3 et RN4. ou encore

#### 2.1. Classe de précision altimétrique interne

Si un contrôle est effectué, la précision interne est évaluée par comparaison des dénivelées, ce qui évite le souci de rechercher « une translation, la plus favorable possible, sur l'ensemble des altitudes fournies pour ces points » et on peut remesurer tout ou partie des quatorze travées de repère à repère du cheminement entre A et B et des rattachements sur la RN (quatre possibles). La précision totale implique par contre une série de mesures indépendantes reliant un des  $N$  points contrôlés au réseau de référence. L'ensemble de ces contrôles est effectué avec un procédé de mesure garantissant des résultats au moins deux fois plus précis que la classe [yy] de précision recherchée (entre autres possibilités : emploi d'un niveau de classe supérieure, d'un

micromètre à lame à faces parallèles, de mires de meilleure qualité, par exemple à ruban invar, ou simplement envoi d'une procédure de terrain plus lourde mais plus précise). On effectue comme prévu au contrat  $N$  mesures de contrôle parmi les quatre cheminements de rattachement et les quatorze travées du canevas, et les nouvelles mesures de dénivelées obtenues sont alors comparées aux anciennes : les trois critères  $a$ ,  $b$  et  $c$  de l'article 5 sont alors testés, ce qui valide ou non les résultats livrés. On est ici dans le cas  $n = 1$  (mesures purement altimétriques), donc  $k = 3,23$  (table 1), et nous supposons  $C = 2$  (mesures de contrôle deux fois plus précises que  $[yy]$ ). La somme des valeurs absolues des écarts constatés étant égale à  $S$ , il faut :

- Que  $E_{\text{moy pos}} = S / N_2 < [xx] \times (1 + 1/8)$  ;
- Que chaque écart en valeur absolue soit inférieur à  $3,23 \times [xx] \times (1 + 1/8)$ , condition pouvant être non satisfaite une fois si  $N_2$  est compris entre 5 et 13, et deux fois si  $N_2 = 14$  (table 2) ;
- Que chaque écart en valeur absolue soit inférieur à  $4,845 \times [xx] \times (1 + 1/8)$ .

## 2.2. Classe de précision altimétrique totale

Les nouvelles altitudes obtenues sur les  $N$  points de contrôle sont comparées aux altitudes livrées, sans aucun autre traitement : les trois critères  $a$ ,  $b$  et  $c$  de l'article 5 sont testés pour vérifier si la précision est de classe  $[yy]$ . On procédera alors aux tests suivants, comme précédemment :

- L'écart moyen  $E_{\text{moy pos}}$  de l'échantillon doit être inférieur à  $[yy] \times (1 + 1/8)$  ;
- Parmi les  $N$  points testés, le nombre  $N'$  de ceux dépassant la valeur  $T = 3,23 \times [xx] \times (1 + 1/8)$  ne doit pas excéder l'entier immédiatement supérieur à  $0,01 \times N + 0,232 \times EN$ , sachant que si  $N < 5$ ,  $N' = 0$  ;
- Aucun écart dans l'échantillon n'excède  $4,845 \times [yy] \times (1 + 1/8)$ .

Comment peut-on anticiper les classes de précision d'un tel levé ? Elles peuvent être déduites des résultats d'un calcul de compensation par moindres carrés, où deux éléments seront essentiels : l'écart de fermeture aller-retour, si un retour a été effectué, et l'écart entre l'altitude de B issue (1) de RN1, RN2 et la dénivelée AB d'une part, et celle issue (2) de RN3 et RN4 d'autre part. On remarque ici que si RN4 n'avait pas été observé, la mesure sur RN3 n'aurait pas pu constituer un élément de rattachement à lui seul, privant donc le levé d'un des rares éléments de redondance. Et si en outre AB a été mesurée avec un cheminement aller seul, avec RN4 non observé comme précédemment, l'erreur interne ne pourrait plus être déterminée du tout, et le chantier ne pourrait alors être recetté. A l'issue du calcul de compensation, l'entrepreneur peut par exemple rechercher la partie du chantier où la variance est maximum afin d'y procéder préférentiellement à des contrôles : si en ces points les tests sont satisfaisants, alors il est vraisemblable que ce sera aussi le cas pour tout le chantier, sauf faute non identifiée.

## III. - Aérotriangulation

Les points de liaison observés par triangulation photogrammétrique constituent des points de canevas tels que définis en annexe de l'arrêté.

### 3.1. Présentation

L'exemple développé ici est tiré de l'aérotriangulation d'une bande de dix clichés (nadirs 65 à 74) au 1/4 000 pris en zone rurale avec une chambre photogrammétrique aéroportée de focale 152.290 mm. Sur la figure partielle ci-dessous les triangles symbolisent les points de calage, les cercles les points de liaison et le périmètre l'emprise totale de la couverture stéréoscopique (60 % de recouvrement, bordure de 5 mm non exploitée).

### 3.2. Contrôle par échantillonnage

A l'issue d'un calcul en bloc des éléments d'orientation externe de chaque cliché, on obtient un ensemble de coordonnées pour les 21 points de calage issus de la stéréopréparation, dont l'emq planimétrique s'établit à 5,7 cm, et l'emq altimétrique à 4,9 cm. On obtient également un jeu de coordonnées pour les 51 points de liaison.

A quelle classe de précision (au sens de l'article 5 de l'arrêté) peuvent prétendre ces points de liaison ? Pour le savoir, 14 points clairement identifiables sur le terrain ont été remesurés, après une sélection effectuée au hasard.



CONTRÔLE DES POINTS DE LIAISON									
Matricule	Est	Nord	Altitude	dE	dN	dA	E pos plani	E pos alti	E pos 3D
50065c	887 149.92	146 848.90	257.57	0.02	- 0.02	0.00	0.03	0.00	0.03
50070c	888 998.85	147 240.85	258.95	0.09	0.00	- 0.02	0.09	0.02	0.10
50174c	890 519.50	147 325.62	283.79	- 0.04	0.05	- 0.06	0.06	0.06	0.08
51071c	889 440.79	147 069.74	278.73	- 0.04	- 0.02	- 0.06	0.04	0.06	0.07
51074c	890 542.25	147 132.89	282.99	0.12	- 0.04	0.08	0.13	0.08	0.15
52065c	887 146.22	146 533.31	241.42	0.04	0.01	- 0.08	0.05	0.08	0.09
52066c	887 534.11	146 487.62	233.72	- 0.03	0.09	0.02	0.10	0.02	0.10
52072c	889 824.65	146 874.72	273.53	- 0.04	0.02	- 0.10	0.04	0.10	0.11
53066c	887 571.85	146 303.10	249.27	- 0.08	0.06	- 0.03	0.10	0.03	0.10
53069c	888 769.28	146 561.06	266.65	0.08	- 0.07	0.02	0.11	0.02	0.11
53071c	889 452.52	146 687.58	274.70	0.00	- 0.14	0.10	0.14	0.10	0.17
54068c	888 359.98	146 265.91	255.98	- 0.01	- 0.05	0.02	0.05	0.02	0.05
54071c	889 475.64	146 457.48	269.69	- 0.05	0.07	- 0.04	0.08	0.04	0.09
54074c	890 626.09	146 584.57	272.68	0.04	0.07	0.04	0.08	0.04	0.09

L'échantillon de 14 points de contrôle ci-dessus a été mesuré par méthode GPS différentiel centimétrique, avec un coefficient de sécurité  $C = 3$ . Ce coefficient est déterminé à l'aide des précisions totales *a priori* des méthodes considérées :

- exploitation photogrammétrique de clichés au 1/4 000 : environ 10 cm ;
- déterminations GPS soignées pour contrôle : environ 3 cm.

Ici  $N = 14$ . Le calcul de  $E_{\text{moy pos}}$  en planimétrie seule ( $k = 2,42$ ) donne 0,07 m. Le calcul de  $E_{\text{moy pos}}$  en altimétrie seule ( $k = 3,23$ ) donne 0,04 m. Le calcul de  $E_{\text{moy pos}}$  en trois dimensions ( $k = 2,11$ ) donne 0,09 m. On calcule alors comme décrit à l'article 5 de l'arrêté, et on peut vérifier que l'échantillon de points de contrôle tridimensionnels ci-dessus de taille  $N = 14$  est bien de classe de précision [10] cm.

- L'écart moyen en position 3D de l'échantillon est inférieur à  $(1 + 1/18) \times 10$  soit 10,6 cm ;
- Le nombre  $N'$  de points dépassant la tolérance de 22,3 cm est nul, 2 auraient été tolérés ;
- Aucun écart en position n'excède  $1,5 \times 2,11 \times (1 + 1/18) \times 10 = 33,8$  cm.

Dans la mesure où cet échantillon est représentatif de l'ensemble des points de liaison mesurés, on peut alors en conclure que l'ensemble des points de liaisons de la bande triangulée est de la classe de précision [10] cm.

### 3.3. Commentaires

En raisonnant uniquement sur la composante planimétrique, on obtient un échantillon de classe [8] cm, et de même, en raisonnant uniquement sur l'altimétrie un échantillon de classe [5] cm. La planimétrie est d'une précision inférieure à l'altimétrie car les points de calage observés sont des points naturels situés en zone rurale, les prises de vues n'ayant pas été précédées d'une campagne de pose de cibles.

L'approche tridimensionnelle du calcul d'aérotriangulation en bloc par la « méthode des faisceaux » conduit naturellement à un contrôle tridimensionnel de la classe de précision. Un calcul effectué par la « méthode des modèles indépendants » conduirait naturellement à un contrôle planimétrique et altimétrique séparé, dans la mesure où la méthode de calcul induit cette séparation dimensionnelle.

L'exemple ci-dessus constitue un contrôle par échantillonnage de la classe de précision totale (au sens de l'article 5 de l'arrêté) d'une série de points de liaisons d'aérotriangulation. On pourrait également très bien imaginer un contrôle de la précision interne de l'échantillon à partir des coordonnées - modèles issues de l'orientation relative d'un couple de prises de vues.

## IV. - Triangulation

On inclut sous cette terminologie tout réseau basé sur l'observation de triangles, dans lequel on effectue à la

fois des mesures d'angles et des mesures de distances, avec une forte redondance, ce qui pose peu de problèmes de détection des fautes. Un tel réseau peut être rattaché sur les points environnants, mais les déterminations doivent « mettre en jeu suffisamment de points d'appui pour que des discordances entre les points du réseau puissent être détectées » : par exemple, pour un relèvement ou une intersection, 4 points sont nécessaires. Pour des rattachements utilisant angles et distances, deux points sont nécessaires, et bien entendu l'entrepreneur est toujours encouragé à en utiliser plus si cela est possible.

#### 4.1. Précision planimétrique totale

Si un contrôle est décidé, on redéterminera les coordonnées de  $N$  points par un procédé de mesure au moins deux fois plus précis que la classe de précision visée (autre triangulation, GPS,...). Les nouvelles coordonnées obtenues sur les  $N$  points de contrôle sont comparées aux coordonnées livrées, sans aucun autre traitement : les trois critères  $a$ ,  $b$ , et  $c$

de l'article 5 sont testés pour vérifier si l'erreur totale de la triangulation (erreur interne et erreur de rattachement) est de classe  $[yy]$  : on dispose ainsi d'une série d'écarts

$$E_{\text{pos}} = E(x_{\text{contrôle}} - x_{\text{objet}})^2 + (y_{\text{contrôle}} - y_{\text{objet}})^2$$

dont on prend la moyenne comme précisé à l'article 5 de l'arrêté :

$$E_{\text{pos1}} + E_{\text{pos2}} + \dots + E_{\text{pos } N}$$

$$E_{\text{moy pos}} =$$

$$N$$

On est ici dans le cas  $n = 2$ , donc  $k = 2,42$  (table 1), et nous supposons  $C = 2$  (mesures de contrôle deux fois plus précises que  $[yy]$ ). On procède alors aux tests suivants :

- L'écart moyen en position  $E_{\text{moy pos}}$  de l'échantillon doit être inférieur à  $[yy] \times (1 + 1/8)$  ;
- Parmi les  $N$  points testés, le nombre  $N$  de ceux dépassant la valeur  $T = 2,42 \times [yy] \times (1 + 1/8)$  ne doit pas excéder l'entier immédiatement supérieur à  $0,01 \times N + 0,232 \times EN$ , sachant que si  $N < 5$ ,  $N = 0$  ;
- Aucun écart en position  $E_{\text{pos}}$  dans l'échantillon n'excède  $1,5 \times 2,42 \times [yy] \times (1 + 1/8) = 4,08 \times [yy]$ .

#### 4.2. Précision planimétrique interne

Le cas de la précision interne est traité par comparaison des coordonnées obtenues à l'issue des calculs de compensation effectués en réseau libre. Dans ce calcul on considère comme inconnues les coordonnées des points du réseau d'appui (sauf un point dont les coordonnées seront arbitrairement imposées), ainsi qu'une orientation. On ne demande d'ailleurs pas aux calculs de déterminer ces inconnues. On recherche ensuite, par moindres carrés, la translation et la rotation d'ensemble du chantier à appliquer au « réseau libre » pour que les coordonnées ainsi obtenues soient aussi proches que possible de celles des  $N$  points ayant fait l'objet de contrôles. Si l'on travaille uniquement en planimétrie, avec donc  $k = 2,42$  (table 1) et un coefficient de sécurité des mesures de contrôle  $C = 2$  (mesures de contrôles deux fois plus précises que la classe de précision  $[xx]$  visée), on procède alors aux tests suivants :

- L'écart moyen en position  $E_{\text{moy pos}}$  de l'échantillon doit être inférieur à  $[xx] \times (1 + 1/8)$  ;
- Parmi les  $N$  points testés, le nombre  $N$  de ceux dépassant la valeur  $T = 2,42 \times [xx] \times (1 + 1/8)$  ne doit pas excéder l'entier immédiatement supérieur à  $0,01 \times N + 0,232 \times EN$ , sachant que si  $N < 5$   $N = 0$  ;
- Aucun écart en position  $E_{\text{pos}}$  dans l'échantillon n'excède  $1,5 \times 2,42 \times [xx] \times (1 + 1/8) = 4,08 \times [xx]$ .

Si ces trois conditions sont vérifiées, alors les erreurs internes sont de classe  $[xx]$ .

### V. - Levé photogrammétrique urbain au 1/2 000

Les points et les lignes 3D généralement restitués par procédé photogrammétrique constituent des objets géographiques ponctuels et linéaires tels que définis aux articles 7-1 et 7-2 de l'arrêté. Il faut bien préciser ici que la classe de précision d'un levé photogrammétrique est étroitement conditionnée par la qualité des clichés à restituer. Lorsque les clichés sont fournis à une entreprise à des fins de restitution photogrammétrique, les spécifications de classe de précision à obtenir doivent donc tenir compte en particulier de l'échelle des clichés, de l'étalonnage des optiques utilisées, de la qualité radiométrique des images obtenues, etc.

L'exemple développé ici est issu du levé photogrammétrique d'une zone semi-urbaine réalisée dans le but de produire des planches graphiques à l'échelle du 1/2 000. L'échelle des clichés exploités est le 1/8 000, ces derniers ayant été réalisés à l'aide d'une chambre photogrammétrique de focale 152 mm. Un report graphique de la zone contrôlée figure ci-après.

A quelle classe de précision (au sens de l'article 5 de l'arrêté) peuvent prétendre les données présentées ci-dessus ? Pour le savoir, 7 points clairement identifiables sur le terrain ont été remesurés par méthode GPS différentiel centimétrique dans le système de coordonnées national. Dans le tableau ci-dessous, dE, dN et dA représentant (en m) respectivement l'écart dans la direction de l'Est, du Nord et en altitude.

MATRICULE	DÉSIGNATION	EST	NORD	ALTITUDE	dE	dN	dA	E POS PLANI	E POS ALTI
1	Pointe d'îlot directionnel	883 845.02	147 892.27	208.61	0.09	0.08	0.15	0.12	0.15
	Objet géographique ponctuel								
2	Pointe d'îlot directionnel	883 857.10	147 893.94	208.59	- 0.05	0.15	- 0.14	0.16	0.14
	Objet géographique ponctuel								
3	Pointe d'îlot directionnel	883 720.07	147 841.42	208.63	0.08	- 0.12	- 0.12	0.14	0.12
	Objet géographique ponctuel								
4	Bord de chaussée	883 808.73	147 937.30	206.22	-	-	0.16	0.15	0.16
	Objet géographique linéaire								
5	Bord de chaussée	883 776.42	147 945.93	206.03	-	-	0.17		
0.19		0.17							
	Objet géographique linéaire								
6	Pied de poteau de clôture	883 791.84	147 956.06	206.74	0.07	- 0.06	0.22	0.09	0.22
	Objet géographique ponctuel								
7	Bord d'îlot directionnel	883 786.79	147 866.99	208.58	-	-	- 0.17	0.19	0.17
	Objet géographique linéaire								
							Em	0.15	0.16
							T	0.36	0.52

Les points 1, 2, 3 et 6 constituent des objets géographiques ponctuels au sens de l'article 7-1 de l'arrêté. Les

différentes erreurs en position du tableau précédent sont issues de la composition quadratique des écarts en coordonnées planimétriques d'une part, et altimétriques d'autre part. Pour les objets linéaires 4, 5 et 7, la plus courte distance euclidienne du point de contrôle à la ligne 3D contrôlée a été portée directement dans la colonne  $E_{\text{pos plani}}$ .

L'écart altimétrique entre le point de contrôle GPS et sa projection orthogonale sur la ligne 3D a été porté dans la colonne  $dA$  des écarts en altitude.

$E_m$

correspond à l'erreur moyenne en position telle que définie dans l'article 5 de l'arrêté et  $T$  à la tolérance telle que définie dans le même article.

Le coefficient de sécurité à utiliser peut être estimé à  $C = 6$ , à partir des précisions totales *a priori* des méthodes considérées :

- exploitation photogrammétrique de clichés au 1 / 8 000 : 20 cm ;
- déterminations GPS soignées pour contrôle : 3 cm.

Pour la planimétrie, il apparaît que :

- a) L'écart moyen en position planimétrique de l'échantillon est inférieur à  $1,014 \times 20$  cm, soit 20,3 cm ;
- b) Le nombre  $N'$  de points dépassant le premier seuil de tolérance est nul, un point hors tolérance aurait été accepté ;
- c) Aucun écart en position planimétrique n'excède  $1,5 \times 2,42 \times 20 \times 1,014$  cm.

*Conclusion* : l'échantillon de 7 points de contrôle est de classe [20] cm en planimétrie.

Il serait acceptable de considérer que l'échantillon est de classe [15] cm en planimétrie comme en altimétrie, cependant, vu la petite taille de l'échantillon de contrôle, il est sans doute plus prudent d'en rester à une classe [20] cm, par ailleurs tout à fait conforme aux attentes légitimes de l'exploitation photogrammétrique dans les règles de l'art de clichés au 1 / 8 000.

Pour l'altimétrie, il apparaît que :

- a) L'écart moyen en position altimétrique de l'échantillon est inférieur à  $1,014 \times 20$  cm, soit 20,3 cm ;
- b) Le nombre  $N$  de points dépassant le premier seuil de tolérance est nul, un point hors tolérance aurait été accepté ;
- c) Aucun écart en position altimétrique n'excède  $1,5 \times 3,23 \times 20 \times 1,014$  cm.

*Conclusion* : l'échantillon de 7 points de contrôle est donc au moins de classe [20] cm en altimétrie.

## VI. - Orthophotographie

Le texte de l'arrêté détaille les critères de précision qui sont proposés pour spécifier des travaux d'orthophotographie, selon deux groupes : dans le premier (art. 8-1 et 8-2) relatif à la précision d'ensemble, au moins un des deux présente un caractère obligatoire, dans l'autre (art. 8-3 à 8-5) relatif à des aspects plus spécifiques, tous ont un caractère facultatif.

### 6.1. Premier groupe

Ce sont les éléments de précision qui sont équivalents à ceux utilisés pour les canevas et les levés, c'est-à-dire la précision interne et la précision totale. La seule différence pratique par rapport à ces derniers est liée au seuil de résolution imposé par la taille de pixel.

Pour effectuer un contrôle, on va sélectionner au hasard un ensemble d'objets géographiques dont l'image sur l'orthophotographie ne présente pas d'ambiguïté : par exemple et selon la taille de pixel utilisée, un angle ou le centre d'une plaque d'égout, un angle de bâtiment, une intersection de voies dont les bords sont bien délimités, etc. La qualité du détail s'apprécie en fonction de la taille relative de ses défauts (angle un peu arrondi, bordures de voies pas tout à fait rectilignes, ombres dissymétriques autour du détail) par rapport à la taille de pixel, un défaut géométrique devant rester inférieur à la moitié de la taille de pixel pour rester acceptable.

Pour évaluer la classe de précision interne ou totale, on effectue les mêmes opérations que pour un canevas (voir l'exemple 4), avec, là encore, prise en considération de la taille de pixel : ces valeurs de classe de précision ne peuvent être meilleurs que la dimension du côté du pixel employé.

### 6.2. Second groupe

Ce sont les éléments de précision couvrant des aspects plus spécifiques aux orthophotographies. Les éléments du sursol (art. 8-3) sont-ils redressés ou non ? C'est en effet un point important en zones urbaines, où

les déversements des façades peuvent au besoin être corrigés, mais au prix de travaux complémentaires qui généralement sont coûteux. Si les façades sont correctement traitées, elles n'apparaissent plus sur l'image et en contrepartie aucune zone au sol n'est masquée. C'est évidemment beaucoup moins important en zone rurale, puisqu'il n'y a en général pas d'intérêt à redresser les images des arbres. L'élément de précision consiste donc simplement à mentionner ici si les critères de précision du premier groupe s'appliquent uniquement au sol, ou également au sur-sol, ce qui impliquera alors que ces problèmes de façades et de parties cachées soient traités ou non.

La qualité radiométrique du mosaïquage (similarité des couleurs entre deux images voisines ou encore possibilité de reconnaître à l'œil la localisation de la jonction entre images) est également un aspect important, lorsqu'on regroupe plusieurs images redressées au sein d'une même orthophotographie. Les couleurs peuvent être différentes pour un même objet vu sur deux images voisines, par exemple à cause des traitements chimiques des photographies, de leur scannage, des effets de l'atmosphère, de l'éclairement solaire, de l'évolution de la végétation ou des ombres si les images considérées n'ont pas été acquises en un court laps de temps, etc. Donc, « la classe de précision sera exprimée par la différence de valeur radiométrique par canal tolérée sur les raccords entre images ne correspondant pas à un linéament naturel, divisée par la radiométrie maximale de l'image, et exprimée sous forme de pourcentage ».

La qualité géométrique du mosaïquage (art. 8-5) est un aspect dont le contrôle est mené sur des objets faciles à identifier qui traversent la ligne de jonction entre deux images consécutives, typiquement des voies de communication, des limites de parcelles, des bordures de bâtiments, etc. On prolonge alors dans l'une des images depuis un côté de la limite le linéament choisi, on mesure l'écart avec ce qui est visible dans l'autre image, et l'écart est calculé comme la distance entre ces objets exprimée en nombre de pixels. Pour une bordure de route par exemple, le franchissement de la ligne de jonction entre images peut se traduire par une baïonnette : la distance  $D$  retenue est celle entre un point pris à la limite d'une image et le prolongement du segment issu de l'image voisine. Ainsi définie, cette distance ne dépend pas de l'orientation du linéament sur lequel porte le contrôle. Avec évidemment une dépendance à la taille de pixel retenue pour le travail, une valeur courante de  $D$  employée est de 1 pixel.