

Les nouveaux textes réglementaires français en matière de précision des levés

■ Michel KASSER

Un nouveau texte réglementaire va être publié à brève échéance sous forme d'un arrêté, spécifiant les modalités d'évaluation des précisions de levés effectués sur fonds publics. Cet arrêté va se substituer avantageusement à celui de janvier 1980, et il introduit une analyse complètement nouvelle des travaux topographiques. Ce premier article présente les aspects généraux de cet arrêté : des spécifications de résultats au lieu de spécifications de moyens, une analyse des écarts avec des levés de contrôles au lieu d'études d'erreurs, et la systématisation de la mesure de l'écart moyen en position au lieu d'études d'erreurs moyennes quadratiques.

■ MOTS CLES

Spécifications techniques, précision des levés, évaluation de la précision.

Le groupe de travail "textes réglementaires" a été réuni par le CNIG en 2001 et 2002 pour étudier, dans le cadre de la loi LOADT (loi 95-115 d'orientation pour l'aménagement et le développement du territoire, modifiée par la loi n° 99-533), notamment son article 89, et du décret d'application 2000-1276 (relatif aux conditions d'exécution et de publication des levés de plans entrepris par les services publics), un texte permettant de remplacer l'arrêté de janvier 1980 relatif aux tolérances sur les levés aux grandes échelles, devenu largement obsolète et assez discutable dans le fond. Le présent dossier est destiné à vous permettre de prendre connaissance de ce nouveau texte, au travers de trois documents.

C'est afin de permettre un premier niveau d'approfondissement de l'arrêté que le premier document qui suit a été rédigé et longuement mis au point par ce groupe de travail. Il vous est proposé ici de le lire en premier, avant même le texte de l'arrêté, mais bien évidemment ces trois documents pourront très bien être lus dans un autre ordre. Il a été envisagé que ce texte puisse être publié comme une circulaire du Ministère de l'Équipement,

mais peu importe sa forme de diffusion officielle et finale : il est proposé ici comme une introduction au texte de l'arrêté, texte qui va impliquer de façon lourde l'ensemble des activités de topographie lorsqu'il sera publié. Et il s'agit d'une rédaction collective, le groupe de travail a essayé de ne pas y laisser subsister trop d'expressions difficiles à comprendre, ou dont l'interprétation pourrait être ambiguë.

Par ailleurs, le groupe a cherché à appuyer ses travaux sur une analyse statistique solide. Pour ce faire il s'est adjoint régulièrement les compétences de Patrick Sillard, alors ingénieur ENSG, docteur en Géodésie et chercheur au LAREG, et qui depuis 2002 travaille à l'INSEE après y avoir réussi le concours d'Administrateur. Il a également publié dans la collection de l'ENSG (Hermès-Sciences) un remarquable ouvrage sur la théorie des moindres carrés.

Nous présentons donc, comme seconde étude proposée dans ce dossier, les bases statistiques sur lesquelles sont basées les différentes formules utilisées au sein du texte de l'arrêté, rédigées donc par P. Sillard à la demande du groupe de travail. Il est essentiel en effet de bien comprendre pourquoi la notion d'écart moyen en position,

notion peu pratiquée jusqu'ici dans nos milieux professionnels, a été préférée finalement à la notion de moyenne quadratique, qui à un niveau très élémentaire au moins est très familière à beaucoup de praticiens. De même, il est important de bien comprendre pourquoi dans ce texte réglementaire on ne parle plus d'erreurs, mais simplement d'écarts par rapport aux mesures de contrôle. Et finalement, il faut insister aussi sur le fait que ce texte propose deux outils statistiques complètement différents. L'un, dont les bases sont expliquées dans cet article de P. Sillard, est le modèle dit "standard", et nous avons pensé qu'il serait employé de façon très courante, en quelque sorte par défaut. Il est en effet très facile à utiliser. Mais il ne faut surtout pas omettre l'autre possibilité qui est ouverte, celle du "gabarit d'erreurs", qui permet de traiter des situations plus particulières : on est ici dans le domaine du "cousu main", dont le modèle standard précédemment évoqué n'est qu'une des innombrables variantes.

Le troisième document du dossier est le texte de l'arrêté à proprement parler, approuvé par le CNIG en novembre 2002 et en cours de promulgation. Il a fait l'objet d'un gros travail

■■■ préparatoire, et a regroupé les efforts de tous les volontaires qui se sont manifestés au niveau national, en particulier de l'AFT (représentée par notre collègue J. Fleury), du Cadastre, de l'IGN, de l'OGE, etc.... Il n'a pas fallu moins d'une vingtaine de réunions de travail, menées dans un véritable enthousiasme compte tenu de l'importance de l'enjeu, pour que tous se mettent d'accord sur cette version, tant ce texte couvre des domaines divers.

Il y a longtemps (en 1993), je m'étais ouvert dans les présentes colonnes de mes inquiétudes face à l'obsolescence rapide de l'arrêté de 80, devenu presque inutilisable dans un nombre croissant de cas, et j'ai eu évidemment à cœur de participer auprès de mes collègues à ce travail que je crois très important pour nos professions. C'est donc avec beaucoup de plaisir que je vous présente ces premiers textes, par ailleurs assez innovants par rapport aux travaux menés à l'étranger, et qui montrent que l'impulsion donnée au CITOP de 1992 grâce à l'AFT, après une décennie, aura finalement été fructueuse. Dès que ce texte sera entré en vigueur, ce qui ne saurait tarder, nous publierons d'autres textes permettant de l'illustrer au mieux afin d'en faciliter la compréhension. Par ailleurs le CNIG a manifesté son désir de rester très actif pendant quelques années pour promouvoir ce nouveau cadre réglementaire et accompagner les professionnels afin qu'ils en perçoivent bien les tenants et aboutissants. Et parmi ceux-ci en particulier tous les bénéficiaires qui en résulteront dans leurs relations avec les donneurs d'ordres. Vous allez donc trouver pendant quelques trimestres dans les revues professionnelles françaises des publications régulières sur ce sujet, donc la présente commence simplement la série.

De toutes façons, vos réactions seront bienvenues, n'hésitez pas à faire remonter à votre revue les questions que vous vous posez, ceci permettra d'orienter au mieux les prochains articles.

Premier article

Conseils pour l'application de l'arrêté

Conseils pour l'application de l'arrêté du... portant sur les classes de précision applicables aux catégories de travaux topographiques réalisés par l'État, les collectivités locales ou pour leur compte.

1. Introduction

Le texte de l'arrêté considéré remplace l'arrêté de janvier 1980 sur les tolérances applicables aux levés à grandes échelles. Il a été conçu dans le but de tenir compte des évolutions des technologiques de la saisie et de traitement des données, ceci afin de faciliter les relations entre les donneurs d'ordre et les entreprises prestataires exécutant les travaux topographiques divers.

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 (article 2.2. de l'arrêté) offerte est celle d'une définition sur mesures d'un gabarit d'erreurs. On peut ainsi, entre autres possibilités et à titre d'exemple, changer les seuils adoptés du modèle standard décrit dans l'article 2.3. de l'arrêté.

2. 2. Le taux de rejet

Le modèle standard (article 2.3. de l'arrêté) 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 (2.3 de l'arrêté). Elle se substitue aux anciennes classes de précision de l'arrêté de 80, 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 Epos 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 $E_{\text{moy pos}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_{\text{contrôle}} - X_{\text{objet}})^2}{n}}$ pour un test portant uniquement sur deux coordonnées planimétriques d'un objet donné,
- pour un test portant sur une coordonnée planimétrique $= E_{\text{pos}} |X_{\text{contrôle}} - X_{\text{objet}}|$
- $E_{\text{moy pos}} = \frac{E_{\text{pos}_1} + E_{\text{pos}_2} + \dots + E_{\text{pos}_n}}{n}$ pour n objets testés.

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'aus-

cultation 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 lever 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 (art 3.2.2.), 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 (p. ex. 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 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 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 strict 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 soignée 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 lever 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 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 auto-évaluation 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 21-1-80

L'arrêté de 80 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 rap-

prochement 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 80, soit donc : (voir le tableau)

Cette correspondance ne peut pas être rigoureuse compte tenu des bases statistiques de l'arrêté de 80 qui sont différentes de celle du présent arrêté. Par exemple, dans l'arrêté de 80 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 de 80 au lieu de deux dans le nouvel arrêté). ●

ABSTRACT

Key words : Evaluation of surveys, precision, legal specifications

All topographic surveys performed by national or local Administrations on public funds in France have to be specified and checked according to the precision specifications described in a new legal text that is about to be published officially. The text aims at easing the relations between the administrations and the contractors providing the surveys. The text does not specify in any way the technical solutions to use, but only the statistical formulas to use for the quality evaluation of a given survey, in order to leave the maximum of responsibility to the contractors.

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		

Arrêté sur les classes de précision applicables aux catégories de travaux topographiques : quelques aspects statistiques

■ Patrick SILLARD

Cet article explicite les notions statistiques utilisées dans le texte du futur arrêté sur la précision des levés topographiques effectués en France sur fonds publics. Il explique le choix de la notion d'écart moyen en position, qui a été préféré aux outils plus classiques mais inadaptés comme l'erreur moyenne quadratique. Il explique également l'origine des valeurs numériques et des différentes formules employées dans le texte du futur arrêté.

■ MOTS CLES

Précision d'un lever topographique, erreur moyenne en position, écarts avec un lever de contrôle.

L'objectif de ce texte est d'exposer les principes qui ont conduit à la détermination des tolérances statistiques retenues dans l'article 2, §3 de l'arrêté.

1 Considérations générales

L'article 2 de l'arrêté vise à définir un ensemble de critères cohérents et faciles à mettre en œuvre pour caractériser la précision de levés. Il est évident que la moyenne des erreurs propres aux objets d'un lever ou tout échantillon de l'ensemble d'objets n'est pas suffisante pour caractériser le comportement statistique de l'erreur. Par exemple, considérons deux ensembles de 20 objets. Les moyennes des erreurs des deux levés sont les mêmes, par exemple 5 cm. Supposons que pour le premier lever, il y ait deux objets pour lesquels l'erreur dépasse 30 cm, alors qu'il n'y en a pas dans le second : intuitivement le second semble de meilleure qualité que le premier. **Ainsi, le critère de moyenne ne sera pas suffisant à lui seul.**

La démarche sous-jacente au texte de l'arrêté est, puisque la moyenne n'est pas suffisante, de compléter la procédure en vérifiant la concordance de la fréquence de certains événements avec l'hypothèse d'erreurs gaussiennes.

En pratique, on fait intervenir deux niveaux de tolérance (les seuils retenus sont 1% et 0.01%), ainsi qu'une « erreur moyenne en position ». Leur utilisation dans la qualification d'un lever pour une classe de précision <xx> est la suivante :

1. L'erreur moyenne en position du lever est inférieure ou égale à <xx> cm.
2. Le nombre d'objets pouvant dépasser le premier seuil de tolérance à 1% est strictement quantifié¹. Le nombre maximal d'objets hors tolérance autorisé se déduit de la distribution gaussienne des erreurs et d'un seuil de confiance fixé ici à 99%².
3. Afin d'éviter que des objets ne soient affectés d'erreurs grossières incompatibles avec l'hypothèse d'erreurs gaussiennes, une troisième quantité intervient : il s'agit du deuxième seuil de tolérance, à 0.01%. Elle constitue la borne supérieure de l'erreur en position réputée admissible pour un objet quelconque, et ceci indépendamment du nombre d'objets considéré.

Un lever dont l'erreur moyenne sur les objets bien définis est supérieure à <xx>, ou bien dont le nombre d'objets dépassant la tolérance à 1% est supérieur au nombre requis (nombre issu de l'hypothèse d'une erreur moyenne de <xx>), ou enfin qui possède un objet dont l'erreur en position est supérieure au deuxième seuil de tolérance n'est pas de *classe de précision* <xx>.

¹ Rappelons qu'en moyenne, le rapport du nombre d'objets dépassant la tolérance à 1% sur le nombre total d'objets considéré dans un échantillon est, par définition, de 1%. Cette proportion est respectée en moyenne, donc en pratique, pour un échantillon donné, elle ne l'est pas nécessairement. Cet apparent paradoxe vient du fait que distribution empirique et distribution théorique d'un échantillon sont deux notions qui ne coïncident que lorsque la taille de l'échantillon est infinie. Néanmoins, le rapport entre nombre d'objets hors tolérance et taille de l'échantillon pour un échantillon donné reste un élément de contrôle de la distribution. Il faut juste tenir compte du fait que l'on travaille à taille d'échantillon finie.

² En d'autres termes, ce nombre d'objets est déterminé de sorte que la probabilité théorique de trouver davantage d'objets hors tolérance pour un échantillon réellement gaussien soit inférieure à 1%.

2 Etude de l'erreur en position

2.1 Choix de la variable « erreur en position »

On introduit l'hypothèse gaussienne de la façon suivante : si l'objet est un point, c'est-à-dire que sa position est représentée avec plus d'une coordonnée, il faut définir une variable aléatoire issue des coordonnées représentant l'erreur en position. C'est à partir de cette variable que l'on décidera si un point est hors tolérance ou non. Cette variable doit donc être indépendante du système de coordonnées. Le choix naturel retenu dans ces conditions est la distance euclidienne. Moyennant quoi, l'erreur en position sera exprimée par :

$$\Delta = \sqrt{\sum_{i=1}^n e_i^2} \quad (1)$$

où n est le nombre de coordonnées définissant la position du point ($n \in \{1, 2, 3\}$), et e_i l'erreur commise sur la coordonnée i .

Comme par construction $\Delta > 0$, on ne peut pas supposer que Δ suive une loi normale (pour laquelle Δ pourrait être négative). Afin de construire des seuils basés sur un estimateur de Δ , il convient de déterminer la loi de Δ sous des hypothèses simples relatives à l'erreur de mesure. Nous supposons donc que l'erreur sur chaque coordonnée suit une loi normale $N(0, \sigma^2)$ (dans un système de coordonnées quelconque pourvu qu'il soit orthonormé).

2.2 Construction de la tolérance à deux seuils

Considérons la variable aléatoire Δ . On peut définir de manière générale une borne B dépendant d'un seuil α par la relation³

$$P[\Delta > B(\alpha)] = \alpha$$

La probabilité que Δ soit plus grande que $B(\alpha)$ correspond ainsi simplement au seuil α .

La loi de Δ est dérivée de la loi gaussienne suivie par les coordonnées des objets. Cette loi est différente selon que le nombre n de coordonnées caractérisant la position d'un objet est de 1, 2 ou 3. B dépend de ce nombre de coordonnées⁴.

Formellement, B dépend aussi du paramètre σ caractérisant l'écart-type de la loi gaussienne. On peut aussi caractériser B via le paramètre de moyenne de Δ . On note δ cette quantité, qui se déduit de σ par des relations analytiques simples. On montre que

$$B(\alpha, \delta) = \delta \tau(\alpha) = \sigma \tau'(\alpha)$$

τ' étant indépendant de σ et τ étant indépendant de δ . **La symétrie des relations montre qu'il est équivalent de définir B à partir de σ ou à partir de δ .** Pour des raisons qui sont exposées dans le paragraphe suivant, la relation de définition retenue pour la suite de l'exposé est la relation :

$$B(\alpha, \delta) = \delta \tau(\alpha) \quad (2)$$

Ainsi qu'il a été précisé en introduction, le texte de l'arrêté fait intervenir deux seuils de tolérance : un seuil $T1$ correspondant à 1%, et un seuil $T2$ correspondant à 0.01%. Formellement,

$$\begin{cases} T1 &= B(1\%, \delta) = \tau(1\%) \times \delta \\ T2 &= B(0.01\%, \delta) = \tau(0.01\%) \times \delta \end{cases}$$

Les tables (1) et (2) donnent les valeurs de τ calculées pour $\alpha = 1\%$ et $\alpha = 0.01\%$ respectivement. Le rapport $\frac{\tau(0.01\%)}{\tau(1\%)}$ est toujours inférieur à 1.5. On convient donc, dans le texte de l'arrêté, que $T2 = 1.5 \times T1$.

³ $P[\mathcal{A}]$ désigne la probabilité de l'évènement \mathcal{A}

⁴ Les densités de Δ sont respectivement pour $n = 1, 2$ et 3 : $f_1(x) = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \frac{1}{\sigma} \exp\left(-\frac{x^2}{2\sigma^2}\right)$; $f_2(x) = \frac{x}{\sigma^2} \exp\left(-\frac{x^2}{2\sigma^2}\right)$ (loi de Rayleigh); $f_3(x) = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \frac{x^2}{\sigma^3} \exp\left(-\frac{x^2}{2\sigma^2}\right)$ (loi de Maxwell). Toutes ces densités sont définies pour $x \geq 0$. Elles sont nulles pour $x < 0$

n	1	2	3
τ	3.23	2.42	2.11

TAB. 1 – Valeurs du facteur τ en fonction du nombre n de coordonnées caractéristiques de la position d'un objet, au seuil de 1%.

n	1	2	3
τ	4.88	3.42	2.88

TAB. 2 – Valeurs du facteur τ en fonction du nombre n de coordonnées caractéristiques de la position d'un objet, au seuil de 0.01%.

n	1	2	3
τ'	2.58	3.03	3.37

TAB. 3 – Valeurs du facteur τ' en fonction du nombre n de coordonnées caractéristiques de la position d'un objet, au seuil de 1%.

n	1	2	3
τ'	3.90	4.28	4.60

TAB. 4 – Valeurs du facteur τ' en fonction du nombre n de coordonnées caractéristiques de la position d'un objet, au seuil de 0.01%.

Il aurait été possible à ce stade d'adopter comme paramètre σ et non δ . Dans ce cas, le paramètre $\tau'(\alpha = 1\%)$ est différent du paramètre $\tau(\alpha = 1\%)$. Les valeurs de $\tau'(\alpha = 1\%)$ sont indiquées à la table (3). Le rapport des seuils à 1% et 0.01% est conservé. Pour mémoire, les valeurs de $\tau'(\alpha = 0.01\%)$ sont indiquées à la table (4).

Qu'il s'agisse du paramètre δ ou du paramètre σ , l'un comme l'autre interviennent comme facteurs d'échelle inconnus de la loi de Δ . Il faut donc estimer l'un de ces paramètres à l'aide d'un échantillon pour déterminer l'ensemble des valeurs numériques entrant dans le processus de qualification. On montre dans le paragraphe suivant qu'il est plus efficace d'estimer δ que σ ce qui justifie l'adoption du premier pour le texte de l'arrêté.

3 Estimation de δ et σ via un échantillon d'erreurs en position

δ ou σ jouent un rôle de facteur d'échelle de la loi de Δ . Un échantillon d'erreurs permet de construire un estimateur de l'un ou l'autre de ces paramètres.

Considérons un échantillon de N objets pour lesquels on dispose d'une réalisation de N variables « erreur en position » notées $(\Delta^j)_{j \in \{1, \dots, N\}}$. On suppose que toutes les Δ^j suivent la même loi de variable parente Δ étudiée à la section précédente.

Un estimateur de δ est donné simplement par la moyenne arithmétique des Δ^j . C'est un estimateur sans biais et efficace (il n'est pas possible de construire un estimateur de δ plus précis que la moyenne arithmétique sur la base de l'échantillon proposé).

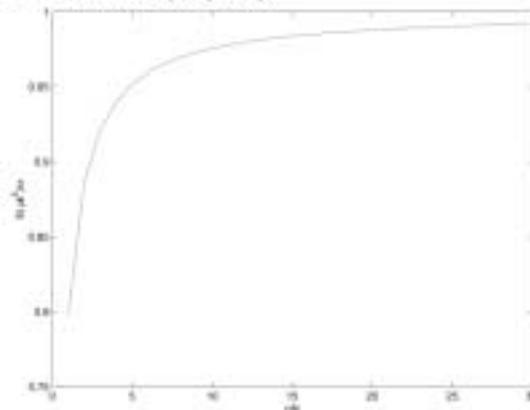


FIG. 1 – Tracé du rapport $\frac{E(\sqrt{s^2})}{\sigma}$ en fonction de nN

- ■ ■ Pour σ , la construction d'un estimateur est plus compliquée : la moyenne quadratique des erreurs sur chaque coordonnée conduit à un estimateur sans biais de σ^2 ,

$$\hat{s}^2 = \frac{1}{nN} \sum_{j=1}^N \Delta_j^2 = \frac{1}{n \times N} \sum_{\substack{i \in \{1, \dots, n\} \\ j \in \{1, \dots, N\}}} (e_i^j)^2$$

Malheureusement, $\sqrt{\hat{s}^2}$ n'est nullement un estimateur sans biais de σ . Le graphique (1) montre le rapport⁵ $\frac{E(\sqrt{\hat{s}^2})}{\sigma}$ pour les premières valeurs du produit $n \times N$ (c'est à dire du nombre de coordonnées contrôlées). Pour les premières valeurs (c'est-à-dire pour des échantillons de faible taille), les différences peuvent être considérables (jusqu'à 20%). Lorsque nN devient grand, le rapport précédent tend vers 1. De sorte que $\sqrt{\hat{s}^2}$ conduit à une bonne estimation de σ . Ainsi, si cette estimation devait être utilisée pour déterminer la tolérance, il conviendrait pour les échantillons de faible taille de corriger l'estimation d'un facteur inverse aux valeurs tracées à la figure (1).

Devant la relative complexité d'utilisation de la moyenne quadratique des erreurs et la grande simplicité de la moyenne arithmétique, il a été décidé de ne faire référence, dans le texte de l'arrêté, qu'à la moyenne arithmétique.

Lorsque la taille des échantillons est grande (typiquement lorsque $nN > 25$), on peut utiliser la moyenne quadratique des erreurs pour déterminer la tolérance. Dans ce cas, la formule *ad hoc* est

$$B(\alpha, \sigma) = \sigma \times \tau'(\alpha)$$

où les valeurs prises par τ' sont données aux tables (3) et (4).

4 Etude du nombre de points dépassant la tolérance à 1%

Considérons un échantillon de N objets pour lesquels on dispose d'une réalisation de N variables « erreur en position » notées $(\Delta^j)_{j \in \{1, \dots, N\}}$. On suppose que toutes les Δ^j suivent la même loi de variable parente Δ . La première composante de la tolérance est par définition la borne $T1$ telle que

$$P[\Delta > T1] = 1\%$$

⁵E désigne l'espérance mathématique ; si $\sqrt{\hat{s}^2}$ était un estimateur de σ , alors par définition $E(\sqrt{\hat{s}^2}) = \sigma$

Soit n le nombre d'objets hors tolérance dans un échantillon de taille N . Alors on montre que n suit une loi binomiale de paramètres N et 1%. Compte tenu de cette relation, on dispose pour tout k de la probabilité $P[n \geq k]$. Ceci permet en particulier de trouver k_0 tel que

$$\begin{cases} P[n > k_0] < 1\% \\ P[n \geq k_0] \geq 1\% \end{cases}$$

Dans ce cas, k_0 apparaît comme le nombre maximal d'objets que l'on peut trouver hors tolérance avec un seuil de confiance de 99%. Autrement dit, dans le cas gaussien, la probabilité de trouver plus de k_0 objets hors tolérance est strictement inférieure à 1%. Dans cette construction, 1% est à la fois le seuil qui détermine la tolérance et celui qui détermine la fréquence d'objets hors tolérance.

On montre qu'une approximation de k_0 est donnée par (application du théorème central limite)

$$k_0(N) = 0.01 \times N + 0.232 \times \sqrt{N}$$

On retiendra donc pour k_0 l'entier immédiatement supérieur à cette quantité.

5 Problème posé par les erreurs des mesures de contrôle.

Les coordonnées établies lors du contrôle sur certains points du lever sont elles-mêmes imprécises, et on les suppose modélisées par une loi normale centrée et d'écart type s . L'erreur en position mesurable s'écrit alors

$$\Delta' = \sqrt{\sum_{i=1}^n (e_i + \varepsilon_i)^2}$$

où e_i est la variable aléatoire erreur sur la coordonnée i de l'objet considéré, ε_i l'erreur sur la coordonnée i de l'objet de référence considéré. Δ' est l'erreur en position mesurable, à comparer à Δ (équation 1). En supposant que les e_i et ε_i sont toutes indépendantes, alors la variable $(e_i + \varepsilon_i)$ suit la loi $\mathcal{N}(0, \sigma^2 + s^2)$, de sorte que les σ apparaissant dans les expressions précédentes doivent être remplacés par $\sqrt{\sigma^2 + s^2}$. Il s'ensuit que l'erreur moyenne en position mesurable Δ' est dilatée du facteur

$$\frac{\sqrt{\sigma^2 + s^2}}{\sigma} = \left(1 + \frac{s^2}{\sigma^2}\right)^{1/2}$$

par rapport à l'erreur moyenne vraie Δ (celle qu'on obtiendrait si le contrôle était parfaitement exact). Or ce n'est que par rapport à Δ' que peut être construite la tolérance T , alors que c'est Δ qui doit caractériser la classe de précision. Le rapport τ reste égal au rapport entre $T1'$ et Δ' . Par contre, l'« écart moyen en position »⁶ (caractérisé par Δ') est supérieur à la classe de précision $\langle xx \rangle$ (caractérisée par Δ) d'un facteur $\left(1 + \frac{s^2}{\sigma^2}\right)$. L'écart moyen sur les points de contrôle (erreur moyenne en position lorsque la référence est exacte) ne doit donc pas être supérieur à $\left(1 + \frac{s^2}{\sigma^2}\right)^{1/2}$ fois la classe de précision.

Comme on ne considère que les cas où s est petit devant σ (les coordonnées des points de contrôle sont nettement plus précises que dans le lever original), on peut alors utiliser l'approximation :

$$\left(1 + \frac{s^2}{\sigma^2}\right)^{1/2} \simeq 1 + \frac{s^2}{2\sigma^2}$$

Cette dernière relation étant un majorant de $\left(1 + \frac{s^2}{\sigma^2}\right)^{1/2}$, c'est cette expression qui est retenue dans l'arrêté.

⁶on abandonne le terme d'erreur qui devient impropre

ABSTRACT

Key words : precision of surveys, mean error in position, discrepancies with reference surveys.

This paper presents the statistical tools used in the new legal texts that will be soon in force in France. It explains why the notion of mean discrepancy in position has been preferred to the more classical notion of mean quadratic error. It explains also the various numeric figures that appear in the formulas used for the standard model.

Projet d'arrêté

texte soumis au visa du Ministre et approuvé par le CNIG

MINISTÈRE DE L'ÉQUIPEMENT, DES TRANSPORTS ET DU LOGEMENT

Arrêté du portant sur les classes de précision applicables aux catégories de travaux topographiques réalisés par l'État, les collectivités locales, ou pour leur compte.

NOR : EQUIP.....

Le ministre de l'équipement, des transports et du logement,

Vu la loi n° 95-115 du 4 février 1995 d'orientation pour l'aménagement et le développement du territoire, modifiée par la loi n° 99-533 du 25 juin 1999 d'orientation pour l'aménagement et le développement durable du territoire, notamment son article 89,

Vu le décret n° 2000-1276 du 26 décembre 2000 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 ;

Vu le décret n° 92-706 du 21 juillet 1992 modifiant le décret n° 85-790 du 26 juillet 1985 relatif au rôle et à la composition du Conseil national de l'information géographique ;

Vu l'arrêté interministériel du 20 mai 1948 fixant les conditions d'exécution et de publication des levés de plans entrepris par les services publics ;

Vu l'arrêté du 21 janvier 1980 fixant les tolérances applicables aux levés à grande échelle entrepris par les services publics ;....

Vu l'avis du Conseil national de l'information géographique dans sa séance du.....,

Arrête,

article 1. OBJET

Tous les travaux topographiques réalisés par l'État, les collectivités locales ou pour leur compte, visés à l'article 89 de

la loi du 4 février 1995 susvisée, doivent être spécifiés et évalués selon les classes de précision définies dans le présent arrêté et son annexe, à l'exception des levés hydrographiques soumis à la norme de l'Organisation Hydrographique Internationale, publication spéciale N° 44.

article 2. SPÉCIFICATIONS ET CLASSES DE PRÉCISION

Les écarts déterminés lors des contrôles des levés topographiques permettent de vérifier le respect de la classe de précision de ceux-ci. Lors des levés d'objets géographiques, les mesures d'écarts s'appliquent sur des points caractéristiques des objets levés, bien identifiés et ne présentant aucun caractère d'ambiguïté. Ces points sont comparés aux points correspondants du terrain nominal. La précision d'un lever d'objets géographiques peut être spécifiée de deux façons : soit par un gabarit d'erreurs spécifique, soit par un modèle standard.

2.1. Contrôles par échantillonnage.

La position des points est définie par 1, 2 ou 3 coordonnées, et parmi celles-ci on ne comptabilise ensemble que celles qui suivent un même modèle statistique, selon la nature des levés (un lever altimétrique concerne une coordonnée, un lever planimétrique, deux, un lever tridimensionnel isotrope, trois, mais un lever tridimensionnel dont le modèle statistique planimétrique est différent du modèle statistique altimétrique fera l'objet de traitements séparés pour les deux coordonnées planimétriques et pour la coordonnée altimétrique). L'écart en position E_{pos} pour un point donné, par rapport à sa position issue d'un contrôle, est défini par la distance euclidienne, c'est-à-dire la racine carrée de la somme des carrés des écarts sur chacune des coordonnées soumise à la même classe de précision.

Une mesure n'est considérée comme mesure de contrôle que lorsque sont mis en œuvre des procédés fournissant une précision meilleure que celle de la classe de précision recherchée, avec un coefficient de sécurité C au moins égal à 2 (C est le rapport entre la classe de précision des points à contrôler et celle des déterminations de contrôle, classe de précision qui est elle-même évaluée selon les règles de l'art). La taille et la composition de l'échantillon d'objets géographiques de contrôle sont précisées par contrat.

2.2. Classes de précision pour un gabarit d'erreurs.

Un gabarit d'erreurs est déterminé par une courbe, un histogramme ou une table de valeurs, précisant pour chaque catégorie d'objets géographiques, et pour chaque classe de valeurs d'écarts, le nombre toléré d'écarts dépassant le seuil correspondant.

Pour chaque catégorie d'objets géographiques, on spécifiera le pourcentage d'écarts pouvant dépasser un premier seuil donné, puis le pourcentage de ceux pouvant dépasser un second seuil donné, etc., et ceci pour autant de seuils que souhaité. On pourra en particulier, si besoin est, spécifier un seuil qu'aucun écart ne devra dépasser. La taille et la composition du gabarit d'erreurs sont précisées par contrat.

2.3. Classes de précision pour un modèle standard.

Pour tout échantillon comportant N objets géographiques, on calcule l'écart moyen en position E_{moy pos}. Celui-ci est défini par la moyenne arithmétique des écarts en position E_{pos} relevés sur les points des objets géographiques. On dit que la population dont est issu l'échantillon comportant N objets est de classe de précision [xx] cm lorsque simultanément les trois conditions a/ b/ et c/ sont remplies :

a/ l'écart moyen en position E_{moy pos} de l'échantillon est inférieur à $\frac{[xx]}{C}$ cm (C étant le coefficient

de sécurité des mesures de contrôle),
 b/ le nombre N' d'écarts dépassant le premier seuil $T = k \times \left[\frac{2 \times (n-1)}{1+n} \right]$ n'excède pas l'entier immédiatement supérieur à $0,01 \times N + 0,232 \times \sqrt{N}$ (où k prend les valeurs indiquées dans la Table 1 en fonction du nombre n de coordonnées caractérisant la position des objets géographiques, et suivant la même loi statistique).

n	1	2	3
k	3,23	2,42	2,11

Table 1 : valeurs du coefficient k en fonction du nombre n de coordonnées caractérisant la position des objets géographiques considérés et suivant la même loi statistique.

Lorsque $N < 5$, aucun écart supérieur à T n'est admis (cf. Table 2).

c/ aucun écart en position dans l'échantillon n'excède le second seuil

article 3. CATÉGORIES DE TRAVAUX TOPOGRAPHIQUES

3.1. Canevas

Les points de canevas sont déterminés par 1, 2 ou 3 coordonnées.

Les écarts observés sur les canevas sont issus de trois origines : les erreurs internes, les erreurs de rattachement et les erreurs propres du réseau légal de référence. Ces erreurs peuvent parfois être individualisées, en particulier lorsque les mesures présentent une surabondance suffisante. On désigne par surabondance d'un canevas, le taux formé par le rapport du nombre de mesures indépendantes observées sur un canevas au nombre minimal de mesures permettant de déterminer celui-ci.

- L'erreur interne s'analyse à partir de l'écart entre les coordonnées obtenues pour chaque point par les mesures de contrôle et celles que l'on obtient par calcul dans un système indépendant en appliquant une translation (et pour 2 ou 3 coordonnées, une rotation), la plus favorable possible, sur l'ensemble

des coordonnées fournies pour ces points. Les éventuels points d'appui inclus dans le canevas figurent avec leurs coordonnées déterminées dans le système indépendant.

- L'erreur propre au réseau légal de référence est spécifiée par son gestionnaire, avec éventuellement plusieurs niveaux possibles en fonction des éléments du réseau effectivement utilisés lors du rattachement. Si la discordance relevée entre les points du réseau légal de référence est plus importante que la précision spécifiée par le gestionnaire, alors la précision est remplacée dans toutes les évaluations ultérieures par la discordance de rattachement effectivement constatée.
- L'erreur de rattachement s'analyse, lorsque cela est possible, à partir des écarts sur les mesures permettant le lien entre le réseau légal de référence et le canevas lui-même. Un rattachement ne peut être considéré comme effectué que si le canevas considéré est rattaché à suffisamment de points du réseau légal de référence pour mettre en évidence d'éventuelles discordances dans ce réseau. En outre, la précision fournie pour le rattachement doit être cohérente avec celle des éléments du réseau légal de référence effectivement utilisés pour celui-ci. Cette erreur de rattachement ne peut pas toujours être individualisée, ce qui est en particulier le cas lorsque les mesures du canevas offrent peu de surabondance.

A partir de ces trois types d'erreurs, on définit les classes de précision totale et de précision interne d'un canevas.

3.1.1. Classe de précision totale

La classe de précision au sens de l'article 2. s'applique aux écarts entre les coordonnées fournies pour chaque point et celles que l'on obtient pour des mesures de contrôle. L'erreur totale résulte de la composition des erreurs internes, des erreurs de rattachement, et de l'erreur propre au réseau légal de référence. Donc l'erreur totale ne peut

être inférieure à l'une de ces trois sources d'erreurs, et en particulier à l'erreur propre du réseau légal de référence, telle qu'elle est spécifiée ou telle qu'elle résulte des discordances relevées lors du rattachement.

3.1.2. Classe de précision interne

La classe de précision au sens de l'article 2. s'applique à l'écart entre les coordonnées obtenues pour chaque point par les mesures de contrôle et celles que l'on obtient par calcul dans un système indépendant en appliquant une translation (et pour 2 ou 3 coordonnées, une rotation), les plus favorables possible, sur l'ensemble des coordonnées fournies pour ces points. Les éventuels points d'appui inclus dans le canevas figurent avec leurs coordonnées déterminées dans le système indépendant.

3.1.3. Critères possibles

Les classes de précision des canevas doivent être spécifiées selon tout ou partie de 4 critères possibles : classe de précision planimétrique totale, classe de précision planimétrique interne, classe de précision altimétrique totale, et classe de précision altimétrique interne, en suivant les définitions en 3.1.1 et 3.1.2 ci-dessus.

3.2. Levers d'objets géographiques

Les classes de précision de levers 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. Des classes de précision différentes peuvent être spécifiées pour des types d'objets géographiques différents dans un même lever.

3.2.1. Objets géographiques ponctuels

Si les spécifications l'indiquent, certains objets géographiques peuvent être considérés comme ponctuels. Ils sont alors déterminés par les coordonnées planimétriques et au besoin altimétriques de leur point de référence. La classe de précision s'applique à l'écart entre les coordonnées obtenues pour chaque point par une mesure de

N	de 1 à 4	de 5 à 13	de 14 à 44	de 45 à 85	de 86 à 132	de 133 à 184	de 185 à 240	de 241 à 298	de 299 à 359	de 360 à 422	de 423 à 487
N'	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10

Table 2. Exemples de nombres N' maximaux d'écarts dépassant le premier seuil T acceptés pour un échantillon de N éléments.

■ ■ ■ contrôle et les coordonnées fournies pour ces points ; les éventuels points d'appui et de canevas inclus dans le lever étant exclus des points testés.

3.2.2. Les objets géographiques linéaires, surfaciques et volumiques

Si les spécifications l'indiquent, ces objets sont définis uniquement à partir de lignes et de points, et certains de ces points peuvent ne pas être identifiables. Une surface est définie par un périmètre, un volume est défini par ses arêtes.

Les classes de précision sur les points identifiables sont spécifiées comme celles des objets géographiques ponctuels (article 3.2.1.).

On dénomme points non identifiables ceux qui servent à la détermination d'un objet géographique linéaire, et dont la position le long de cet objet n'est pas précisément identifiée. Sauf spécification contraire figurant au cahier de charges, les classes de précision sur les lignes joignant des points non identifiables s'appliquent à l'écart entre le terrain nominal et les segments de droites joignant ces points. Cet écart est mesuré par la plus petite distance entre le point de contrôle et la ligne levée, chaque point de contrôle étant choisi le plus près possible de l'un des points levés.

3.2.3. Spécifications de contenu

Les objets géographiques faisant l'objet du lever sont rangés par classes en fonction des spécifications de contenu qui précisent aussi les critères de sélection retenus, conformément au terrain nominal. Les spécifications s'appliquent indépendamment aux objets mal classés et aux objets oubliés ou surnuméraires, en spécifiant les gabarits d'erreurs correspondants décrits à l'article 2.2.

3.2.4. Représentation altimétrique du terrain

La représentation altimétrique du terrain utilise des points du terrain nominal définis par des coordonnées altimétriques et planimétriques. Ces points sont reliés par des arêtes destinées à structurer un modèle de surface (maillage régulier, triangulation, courbe de niveau etc.). Les classes de précision s'appliquent à l'écart entre le terrain nominal et la surface levée. Les points

de contrôle sont pris à la verticale des points du modèle de surface.

Le terrain nominal introduit un certain niveau de simplifications et de lissage de la réalité en fonction du pas d'échantillonnage ou de l'espacement des courbes de niveau. Les écarts entre le terrain nominal et le terrain réel doivent rester inférieurs à la classe de précision spécifiée.

Les réseaux des lignes de thalweg, de crêtes et de rupture de pente sont considérés comme des objets géographiques linéaires et font l'objet de spécifications propres. Leurs classes de précision planimétrique et altimétrique suivent les spécifications de l'article 3.2.2.

3.3. Images rectifiées et cartes scannées remises en géométrie

Les spécifications de précision applicables aux images rectifiées et aux documents cartographiques scannés et remis en géométrie s'analysent selon 5 paramètres (article 3.3.1 à 3.3.5. ci-après), un au moins parmi les deux premiers étant obligatoire et les trois derniers étant facultatifs :

3.3.1. Classe de précision interne

La classe de précision au sens de l'article 2. s'applique à l'écart entre les coordonnées obtenues par les mesures de contrôle, pour des détails bien identifiés, calculées dans un système indépendant, et celles que l'on obtient par calcul en appliquant une rotation et une translation, les plus favorables possibles, sur l'ensemble des coordonnées de ces points obtenues dans l'image ou le document, également dans un système indépendant. Le système de coordonnées planes de contrôle sera caractérisé par le même système de représentation plane que celui des coordonnées des points évalués. La classe de précision ne peut être meilleure que la taille du pixel utilisé.

3.3.2. Classe de précision totale

La classe de précision au sens de l'article 2. s'applique à l'écart entre les coordonnées obtenues par les mesures de contrôle, pour des détails bien identifiés, et celles des coordonnées de ces points obtenues dans l'image ou le document. Le système de coordonnées planes de contrôle sera caractérisé par le même système de représentation plane que

celui des coordonnées des points évalués. La classe de précision ne peut être meilleure que la taille du pixel utilisé.

3.3.3. Redressement des objets géographiques du sur-sol

La spécification doit préciser si les erreurs internes décrites au 3.3.1. s'appliquent uniquement aux objets géographiques au sol, ou également aux objets du sur-sol.

3.3.4. Qualité radiométrique du mosaïquage

S'il y a effectivement eu un mosaïquage, 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, divisée par la radiométrie maximale de l'image, et exprimée sous forme de pourcentage.

3.3.5. Qualité géométrique du mosaïquage

La classe de précision s'applique, conformément aux éléments définis à l'article 2., et s'il y a effectivement eu un mosaïquage, aux distances entre les points en bordure d'une des images assemblées au sein du document final et les mêmes points tels qu'ils seraient représentés dans l'image voisine si elle était prolongée jusque là, les points étant caractérisés par des coordonnées sous forme de pixels. Ces distances sont mesurées sur des points n'offrant aucune ambiguïté d'identification sur les deux images voisines concourant au document final.

article 4

L'arrêté interministériel du 20 mai 1948, fixant les conditions d'exécution et de publication des levés de plans entrepris par les services publics, l'arrêté du 21 janvier 1980, fixant les tolérances applicables aux levés à grande échelle entrepris par les services publics, et l'instruction du 28 janvier 1980, relative à l'application de l'arrêté du 21 janvier 1980 fixant les tolérances applicables aux levés à grande échelle entrepris par les services publics, sont abrogés.

Fait à Paris le

<ministre chargé de l'équipement> ●