

LE CONTRÔLE TOPOGRAPHIQUE D'UNE CARTE OU D'UNE BASE DE DONNÉES CONSTITUÉES PAR VOIE PHOTOGRAMMÉTRIQUE

P. Grussenmeyer (ENSAIS, Strasbourg),
P. Hottier (IGN), I. Abbas (ENSG).



Résumé

A partir de concepts mathématiques et statistiques, on peut définir la qualité géométrique d'une restitution par voie photogrammétrique.

En comparant des échantillons saisis par voie photogrammétrique sur des prises de vues (par exemple à l'échelle 1:30000) à des échantillons de référence (observations géodésiques ou saisis sur prises de vues à l'échelle 1:2500), on estime l'exactitude (EMQ) de la restitution et la précision des données. L'homme, la machine (station de travail photogrammétrique), les modes opératoires sont des éléments susceptibles d'influencer le résultat final.

Pour le contrôle ponctuel, qui repose sur l'existence de points homologues, nous proposons des techniques statistiques conduisant au calcul de l'erreur moyenne quadratique planimétrique et altimétrique standard d'un échantillon d'erreurs de mesures.



Pour le contrôle linéaire, où l'élément contrôlé est le contour d'un objet, nous appliquons la notion de distance de Hausdorff.

Nous proposons une méthodologie pour surveiller la production d'une base de données topographiques. Un programme en Turbo-Pascal intégrant ces méthodes de calculs permet concrètement d'analyser tout échantillon de points ou de contours d'objets.

1. GÉNÉRALITÉS

Pour de nombreux projets, comme par exemple la saisie de la base de données topographiques à l'I.G.N., l'acquisition des données est réalisée par voie photogrammétrique.

Notre objectif est d'aboutir à une méthodologie de contrôle de la saisie.

Nous n'avons pas la possibilité dans cet article d'aborder en détail les principes de l'acquisition des données par voie photogrammétrique. Disons simplement que les stations de travail photogrammétriques permettent en l'espace de quelques minutes de mettre en place et de calculer les données d'orientation d'un couple de prises de vues. Les résultats de ces opérations méritent d'être sérieusement analysés et contrôlés avant d'aborder la restitution.

Nous nous sommes intéressés au problème de l'évaluation de l'exactitude (erreur moyenne quadratique) planimétrique et altimétrique d'une restitution photogrammétrique pour différentes échelles de prises de vues. Dans un système d'information, l'objet est caractérisé par un modèle géométrique et des propriétés sémantiques. Nous avons étudié l'aspect *géométrique* à partir d'échantillons de points (aspect ponctuel) et de contours d'objets (aspect linéaire) issus d'une restitution.

2. CONTRÔLE SYSTÉMATIQUE OU STATISTIQUE ?

Nous rappelons la distinction entre "contrôle systématique" et "contrôle statistique".

- Un contrôle de pièces en usine est un "contrôle systématique" : chaque pièce doit satisfaire à certaines "tolérances" ; dans les techniques topographiques on peut de même vérifier que les écarts relevés sur un nombre fini et petit de points sont en deçà d'une tolérance : c'est l'objet des contrôles de stabilité par exemple.

- Le "contrôle statistique" est de nature toute différente : il s'agit par sondage d'évaluer les caractéristiques d'une population quasi-infinie (par exemple celle de points relatifs à telle classe de détails de la BD Topo), et non plus d'un ou d'un petit nombre d'individus. Or la confusion est vite faite entre ces deux sortes de contrôles, et conduit à des erreurs graves.

Lorsqu'on recherche des "fautes" dans un échantillon de n erreurs censées obéir par exemple à la loi normale $N(0, \sigma)$, on dit souvent qu'étant donné un seuil α de probabilité négligeable (par exemple $\alpha = 1\%$) il faut éliminer toutes les erreurs supérieures à 2.57σ .

Mais il y a une erreur de principe : plus un échantillon est grand plus la probabilité de grandes erreurs même en l'absence de faute est grande : la tolérance T doit donc dépendre non seulement de α , mais aussi de la taille n de l'échantillon des erreurs. Cela conduit à des valeurs de T bien plus fortes que 2.57σ .

Mais les conséquences sont beaucoup plus graves sur les échantillons réels, à cause de la présence d'un taux important d'erreurs hors tolérance : l'emploi de la méthode du contrôle systématique a alors l'effet de réduire considérablement (parfois de 30%) l'estimation de l'emq, et souvent de doubler le taux de rejet.

On présente souvent le problème du contrôle d'une saisie (sur une zone et pour une classe donnée de détails par exemple) en disant que la saisie est valide si 90% des erreurs sont inférieures à la tolérance T (on donne T).

Cet énoncé est particulièrement ambigu et à notre avis dangereux :

- il n'a d'abord de sens que pour une population *infinitie* d'erreurs ; il est évidemment faux, en principe, de vérifier sur un échantillon de 100 points que la tolérance est satisfaite et de déclarer le travail valide,

- à tout esprit non prévenu il laisse croire que les 10% d'erreurs qui excèdent T sont distribuées (il s'agit d'erreurs simples) selon la loi normale, autrement dit que l'écart-type σ de celle-ci est $T/1.64$.

Or ceci, dans la pratique, est absolument faux : les erreurs aberrantes -par définition même- n'obéissent pas à la loi normale.

La méthode saine consiste à notre avis :

- à détecter selon une méthodologie rigoureuse les erreurs hors tolérance (fautes),
- à estimer l'emq sans les fautes, et à fournir simultanément, cette emq, la taille de l'échantillon et le taux de rejet.

3. LE CONTRÔLE PONCTUEL

3.1. Introduction

Pour une catégorie bien définie de la base de données (coins de constructions, points d'une limite de culture, intersections de chemins...), nous considérons un ensemble de "points" pris dans la base de données et les "points homologues" pris sur une référence. On peut tout aussi bien envisager de saisir un seul point d'un objet (un point par construction par exemple) ou saisir le contour d'un objet (un point par brisure sur le contour de la construction).

L'estimation de l'exactitude métrique du contrôle ponctuel repose sur le principe suivant :

- On choisit au hasard sur la carte ou dans la base de données, mais non pas sur la référence et sur une surface assez étendue pour être représentative de la zone à contrôler, n points-carte $m_{i1} (x_{i1}, y_{i1}, z_{i1})$ de la classe de détails dont on désire estimer l'exactitude. En faisant le contraire, on peut accroître considérablement l'emq (la raison en étant que les objets-terrain ou référence sont plus compliqués que les objets saisis).

- On identifie leurs homologues sur la référence (qui peut être le terrain par observations géodésiques, ou bien une carte plus précise ou bien une saisie photogrammétrique sur des clichés à grande échelle); cette référence doit être si possible "exacte" autrement dit les erreurs des points-référence $m_{i2} (x_{i2}, y_{i2}, z_{i2})$ négligeables par rapport à celles des points-carte, sinon ce n'est pas l'exactitude de la carte qui sera chiffrée mais son écart à la référence.

L'objectif poursuivi est l'appréciation de l'exactitude ponctuelle. Comme il n'y a pas de rapport évident entre les emq planimétriques et altimétriques, nous pouvons étudier la planimétrie et l'altimétrie séparément.

On veillera aussi à l'homogénéité des échantillons (au moins 100 points) : on ne peut sans précautions regrouper plusieurs catégories de points sous prétexte d'obtenir des effectifs intéressants.

3.2. Principe du calcul

Il s'agit de calculer les emq planimétrique et altimétrique (tableau 1 page suivante).

Pour la planimétrie, le critère choisi est pour un "point" l'écart entre la détermination-base (x, y) (base de données) et la détermination nominale (\hat{x}, \hat{y}) , c'est-à-dire son erreur planimétrique :

$$e = \sqrt{(x - \hat{x})^2 + (y - \hat{y})^2} \quad (3-1)$$

L'exactitude planimétrique est alors la moyenne quadratique des écarts, estimée après rejet des points aberrants par

$$emq_{plani} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum e_i^2} \quad (3-2)$$

où n est le nombre de points de contrôle retenus.

A cette estimation il faut impérativement joindre :

1. la taille de l'échantillon n_0 , initial, ainsi que le nombre de points rejetés n_1 (ou bien le taux de rejet $\tau = n_1/n_0$)

2. les biais en x , y et z , s'ils sont significatifs

3. les précisions des estimations des emq

4. les grilles des systématismes (planimétrique et altimétrique) circonscrites au chantier

Nous traitons le cas de l'altimétrie dans le paragraphe 3.4.

3.3. Détection des valeurs aberrantes

Avant de calculer l'estimation finale de l'emq planimétrique, on applique à l'échantillon d'effectif n un processus de détermination des valeurs aberrantes (c'est-à-dire excédant la tolérance au seuil de $\alpha\%$) :

$$T_{n,\alpha} = \sqrt{-1_n [1 - (1 - \alpha)^{1/n}]} emq_{plani} \quad (3-3)$$

Dans cette formule, emq_{plani} doit être estimée par un estimateur robuste : on classe l'échantillon par valeurs croissantes, on détermine sa médiane empirique M et on prend :

$$emq_{plani} = (1/\sqrt{1_n^2}) \tilde{M} \approx 1.201 \tilde{M} \quad (3-4)$$

et non pas à partir d'une valeur standard de l'emq. En effet la pratique montre qu'à l'heure actuelle, les divers chantiers donnent des résultats hétérogènes, et qu'il n'existe donc pas de valeur standard.

Dans le cas de grands échantillons de contours d'objets (100 objets au 1:30000 donnent lieu environ à 1000 points) on peut préconiser l'algorithme du double-filtre :

1. A chaque couple d'objet carte-référence on applique d'abord la formule (3-3), avec cette fois une valeur à partir de emq_{plani} largement par excès. Cette première étape a pour but d'éliminer les fautes très grossières.

CONTRÔLE PONCTUEL (lots urbains ou bâtiments) Chantiers 1 à 3: points homologues Chantiers 4 et 5: contours homologues				Résultats bruts: Mise en évidence des systématismes globaux: biais en x (Moy x), en y (Moy y), en z (Moy z) HT: hors tolérances τ : taux de rejet						Résultats après élimination des systématismes régionaux			
Chantier	Echelle saisie	référence	n	τ %	emq plani	Moy x	Moy y	emq alti	Moy z	emq plani	HT	emq alti	HT
1	1:30000	1:2500	113	-	0.74 ₇	-0.15	-0.08	0.90 ₉	-0.03	0.68 ₆	1	0.88 ₈	2
2	1:30000	1:2500	92	-	1.37 ₁₄	-0.50	+0.26	0.95 ₁₀	+0.21	1.25 ₁₃	1	0.86 ₉	0
3	1:30000	terrain	72	-	1.40 ₁₆	+0.42	+0.05	0.89 ₁₀	+0.33	1.07 ₁₃	1	0.72 ₉	0
4	1:30000	1:17000	2132	10%	2.12 ₅	+0.74	+0.06	On obtient le fichier purgé en supprimant interactivement les désaccords locaux graves entre le contour-objet carte et le contour objet référence		1.66 ₄	76	Le chiffre en indice est un écart-type unité: cm exemple: 1.66 ₄ : 4 cm d'écart-type	
4 "purgé"	1:30000	1:17000	-	10.9%	1.92 ₅	+0.70	+0.07			1.61 ₄	60		
5	1:30000	1:17000	1889	11%	1.29 ₃	+0.38	+0.09			1.17 ₃	45		
5 "purgé"	1:30000	1:17000	-	12%	1.25 ₃	+0.37	+0.10			1.11 ₃	20		

Tableau 1: Comparaison des emq brutes (en planimétrie et en altimétrie) et des emq après correction du systématisme régionalisé (unité: m)

2. On réunit tous les sommets-carte, en un unique échantillon, et on applique alors la tolérance (3-3), avec une valeur de emq_{plani} estimée alors par la médiane (3-4).

Il faut alors posséder un algorithme de reconnaissance de sommets homologues carte-référence ; bien entendu ce sont les points-carte dont il faut rechercher les homologues, et non pas l'inverse.

3.4. Biais

3.4.1. Systématisme global

Sur certains chantiers, on obtient des systématismes globaux en x, en y, en z (biais différent significativement de zéro) très prononcés.

Pour détecter un biais en x, β_x par exemple, on peut procéder de la façon suivante :

- on commence par chercher une estimation "robuste" de β_x , la médiane des erreurs en x, m_x

- on estime alors l'écart-type en x par (estimation robuste) :

$$\tilde{\sigma}_x = 1.484 m_x \quad (3-5)$$

où m'_x est la médiane des valeurs absolues

$$|e_{xi} - m_x|$$

- il y a alors biais global en x, si

$$\left| \frac{1}{n} \sum e_{xi} \right| > 2.57 \tilde{\sigma}_x \quad (3-6)$$

(pour le risque de 1ère espèce de 1%), et le biais est

$$\frac{1}{n} \sum e_{xi}$$

3.4.2. Systématismes régionaux (figure 1)

Une majorité d'échantillons étudiés font apparaître, même en l'absence de systématisme global, un systématisme régionalisé important (absence de systématismes dans certaines zones, systématisme important dans d'autres).

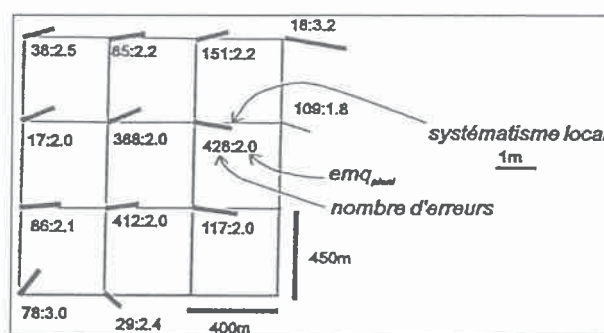


Figure 1: systématisme de la saisie chantier 4 (carte 1:30000; référence 1:17000)

Pour le mettre en évidence, on considère une grille (par exemple 3x3) circonscrite au chantier, chaque rectangle ayant pour côtés a et b :

1. On prend la moyenne algébrique des erreurs en x, y ou z aux noeuds de la grille. Par exemple au noeud 22, on prend la moyenne des erreurs des points situés dans le rectangle (a,b) centré en ce noeud.

2. Avant d'évaluer le systématisme il est rationnel d'éliminer par une méthode "robuste" les points aberrants en estimant l'emq planimétrique et altimétrique par la méthode de la médiane.

3. Si on désire constater ce qu'on aurait obtenu sans le systématisme (ou si on désire le corriger), il suffit de retrancher à chaque erreur la valeur du systématisme local.

3.5. Ajustement des histogrammes d'erreurs à la loi normale

Pour les grands échantillons (taille > 400), cet ajustement ne se fait jamais : il y a toujours une proportion trop forte de petites erreurs. Heureusement ce fait, comme nous avons pu le vérifier ne semble jouer qu'un rôle négligeable dans la détection des valeurs aberrantes.

3.6. Précision de l'estimation de l'emq

Si les erreurs en x, y, ou z sont supposées normales, centrées, non corrélées et de même écart-type, on peut calculer la précision de l'estimation par :

$$\sigma_{emq_{plani}} \approx \frac{emq_{plani}}{2\sqrt{n}} ; \sigma_{emq_{alti}} \approx \frac{emq_{alti}}{\sqrt{2n}} \quad (3-7)$$

Avec un niveau de confiance de 95% on a :

$$emq_{plani} = \tilde{emq}_{plani} \pm \frac{1.96 \times emq_{plani}}{2\sqrt{n}} \quad (3-8)$$

3.7. Conclusion

La méthode du contrôle ponctuel paraît simple mais nous avons été surpris par la fréquence des systématismes tant en planimétrie qu'en altimétrie sur de nombreux chantiers (tableau 1). On peut suspecter l'aéro-triangulation analytique qui reste un maillon amont fragile ou des déformations irréversibles des clichés, mais rien n'a été formellement prouvé.

Dans la pratique, il faut joindre à l'estimation de l'exactitude planimétrique ou altimétrique, la taille de l'échantillon, le taux de rejet, le calcul des biais (systématismes), la précision des estimations.

4. LE CONTROLE LINÉAIRE

4.1 Introduction

La méthode du contrôle ponctuel repose sur l'existence de "couples de points homologues".

Mais le contrôle ponctuel présente certaines limites :

- la notion de points homologues devient floue quand la différence d'échelle entre carte et référence est trop grande
- on imagine les difficultés de mise en œuvre sur des objets sinueux et linéaires : routes, cours d'eau car les points "bien identifiables" n'existent plus (figure 2)
- l'interprétation du pourcentage de points rejetés par le contrôle est difficile. Le pourcentage de points rejetés ne signifie pas forcément que le même pourcentage de la carte est "fausse".

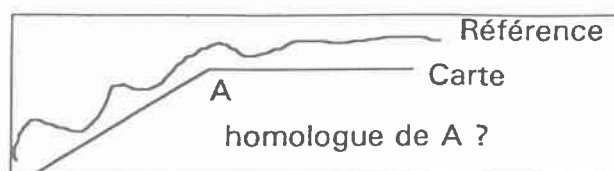


Figure 2: le problème des couples de points homologues

Une autre solution qu'il est possible de mettre en œuvre pour apprécier l'exactitude métrique consiste à étudier le problème de l'accord entre le trait-carte (ou vecteur de la base de données) et le trait-référence. L'élément contrôlé est le contour d'un objet.

L'idée de départ a été d'utiliser une notion mathématique (la distance de Hausdorff de 2 ensembles), et de l'appliquer à la mesure de l'écart entre un contour-carte et son contour-référence, c'est-à-dire pratiquement à des suites de segments.

4.2. Définition de la distance de Hausdorff de deux contours

Soit **K1** qui désigne le contour-carte (ou contour issu de la base de données) de l'objet, c'est-à-dire une suite de segments (le contour n'est pas nécessairement fermé ; les segments ne sont pas nécessairement consé-

cutifs) et **K2** qui désigne le contour "nominal" (une autre suite de segments) :

La distance de Hausdorff dH de 2 contours **K1** et **K2** est définie par :

$$dH = \max \{d_{12}, d_{21}\} \quad (4-1)$$

$d_{12} = \max$ des plus courtes distances des points de **K1** à **K2**

$d_{21} = \max$ des plus courtes distances des points de **K2** à **K1**

La distance de Hausdorff chiffre l'écart entre les deux contours ; pour le calcul de ces quantités (exemple figure 3), on fait circuler sur **K1** une boule centrée à rayon variable qui touche **K2** (de même pour **K2** par rapport à **K1**).

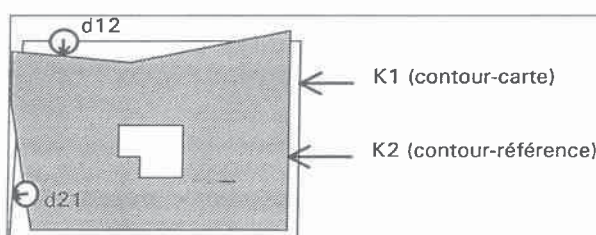


Figure 3: distance de Hausdorff entre deux contours K1 et K2

Quand $d_{12} = 0$, cela signifie que le contour **K1** est dans **K2** (tout le contour saisi est correct), mais il peut être incomplet : il y a eu généralisation "positive" (détails significatifs omis) ; si $d_{21} = 0$, inversement, **K2** est dans **K1** : il y a généralisation "négative" (détails non pertinents ajoutés).

4.3. Finalité

L'objectif est d'estimer l'erreur moyenne quadratique planimétrique emq_{plani} à partir de cette notion.

Nous cherchons à définir des outils statistiques crédibles. Pour cela il faut :

- fournir une procédure de définition des objets nominaux
- pouvoir distinguer entre l'aberration ("fautes" de généralisation positive : détails oubliés ; "fautes" de généralisation négative : détails ajoutés) et la normalité
- chiffrer, pour une classe donnée d'objets, la normalité par des indices si possible indépendants de la forme, de la taille et du nombre de segments qui définissent un objet (ou à défaut variant peu, pas plus de 10%)
- chiffrer les aberrations par des indices analogues

4.4. Détection de l'aberration au niveau de l'objet

On calcule d_{12} et d_{21} , composantes de la distance de Hausdorff et l'indice de généralisation :

$$i = \frac{d_{21} - d_{12}}{(d_{12} + d_{21})/2} \in [-2, +2] \quad (4-2)$$

il prend une valeur voisine de 2 en cas de généralisation positive (détails oubliés), -2 en cas de généralisation négative (détails ajoutés) ; il reste très faible en l'absence de généralisation.

Dans la pratique, la moyenne de cette quantité sur un grand nombre (>100) d'objets, est systématiquement positive, bien que faible (et difficile à calculer avec précision).

L'inégalité :

$$\text{moy } \bar{d}_{12} < \text{moy } \bar{d}_{21} \quad (4-3)$$

apparue d'abord lors de simulations puis confirmée sur des échantillons réels a une explication triviale (figure 4), et permet de dire

- qu'un bon modèle (la carte) est proche de la réalité (le terrain) !

- la réalité par contre peut rester loin du modèle.

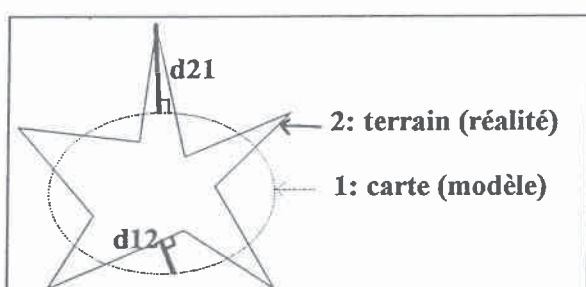


Figure 4: la réalité (le terrain) est loin du modèle (la carte)

4.5. Estimation de l'exactitude de la saisie

4.5.1. Critères

La distance de Hausdorff varie très nettement en fonction de la complexité (taille, nombre de segments) de l'objet (tableau 2 voir page suivante). On résout cette difficulté de la façon suivante :

Pour tout contour d'objet (K1 carte, K2 référence), on définit les 3 écarts standards :

$$e_{12} = \frac{d_{12}}{d_{120}} \text{ emq}_0 ; e_{21} = \frac{d_{21}}{d_{210}} \text{ emq}_0 ; e_H = \frac{d_H}{d_{H0}} \text{ emq}_0$$

$$\text{avec } \text{emq}_0 = \sqrt{\text{emq}_{10}^2 + \text{emq}_{20}^2} \quad (4-4)$$

où \bar{d}_{120} , \bar{d}_{210} , \bar{d}_{H0} sont les moyennes de distances \bar{d}_{12} , \bar{d}_{21} , \bar{d}_H , calculées par simulation à partir d'emq a priori grossières : emq_{10} pour la carte, emq_{20} pour la référence.

Nous avons pu montrer, par simulation et par raisonnements théoriques simples que les "écarts moyens standards" calculés pour n couples d'objets (K1, K2) :

$$\text{ems}_{12} = \frac{1}{n} \sum e_{12_i} ; \text{ems}_{21} = \frac{1}{n} \sum e_{21_i} ; \text{ems}_H = \frac{1}{n} \sum e_{H_i} \quad (4-5)$$

étaient des estimations sans biais de l'emq planimétrique à condition que les emq a priori emq_{10} et emq_{20} ne soient pas trop éloignées de la réalité ; sinon il faut

réitérer ; on s'arrête quand les trois écarts-moyens standards ne diffèrent pas significativement et quand l'indice moyen réel de généralisation I ne diffère pas trop de l'indice I_0 simulé.

On adopte comme estimation finale

$$\tilde{\text{emq}} = \frac{1}{3} (\text{ems}_{12} + \text{ems}_{21} + \text{ems}_H) \quad (4-6)$$

4.5.2. Solution proposée

Les essais - ceux portant en particulier sur les îlots urbains, ont permis de constater des désaccords locaux fréquents et graves (figure 5) ; il est dès lors impossible de chiffrer la qualité d'une saisie en donnant par exemple le pourcentage des objets correctement restitués.

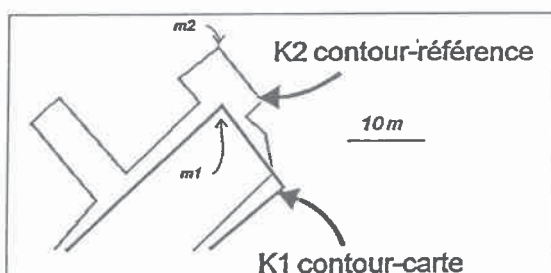


Figure 5: le désaccord entre le contour-carte et le contour-référence: le point saisi m1 "résume" une partie du contour-référence d'où une erreur planimétrique aberrante entre m1 et m2.

La seule solution est de procéder à une "purge" des contours homologues avant calcul, opération analogue à celle de la détection des erreurs aberrantes dans le contrôle ponctuel, et de renoncer à la notion d'objets dans l'énoncé des résultats.

L'exactitude de la saisie s'évalue alors en donnant les trois éléments suivants :

1. L'estimation $\tilde{\text{emq}}$ de l'emq planimétrique carte-référence

2. Le pourcentage p_1 de trait-carte en accord avec le trait-référence, ainsi que $(1 - p_1 = p_{11} + p_{12})$ les pourcentages :

- p_{11} : ajouté ou hors tolérances (fautes)
- p_{12} : généralisation (spécifications de saisie), désaccords divers

3. Le pourcentage p_2 de trait-référence en accord avec le trait-carte, ainsi que $(1 - p_2 = p_{21} + p_{22})$:

- p_{21} : omis, ou restitué hors tolérances (fautes)
- p_{22} : généralisé-désaccords divers

Remarque :

La "purge" permet de déterminer les parties bien identifiables des 2 contours : tous les détails incongrus sont coupés mais **conservés** ; chaque fois qu'un détail est coupé, une **décision** est à prendre compte tenu des informations disponibles (fautes, généralisation inévitable, ombres...)

Dans les essais de validation, la purge a été essentiellement interactive ; il n'est peut être pas souhaitable de l'automatiser totalement. La méthode paraît assez

CONTRÔLE LINEAIRE: Chantier 4 à 6: îlots urbains ou bâtiments Chantier 7 et 8: axes de routes				emq_P : emq plani contrôle ponctuel τ : taux de rejet		emq_L : emq plani (contrôle linéaire) I: indice de généralisation p11, p12: désaccords carte-référence I ₀ : indice simulé p21, p22: désaccords référence-carte						
Chantier	Echelle saisie	Echelle référence	nombre objets	emq_P	τ	emq_L	p11	p12	p21	p22	I	I ₀
4 "purgé"	1:30000	1:17000	180	1.92 ₅	10.9%	1.63 ₅	3.5%	12.1%	5.4%	15.4%	-0.017 ₁₈	0.012 ₇
5 "purgé" 156 objets	1:30000	1:17000	156	1.25 ₃	12%	1.26 ₃	4.4%	3.2%	2.7%	5.3%	0.042 ₁₂	0.048 ₁₂
5 "purgé" 80 objets	1:30000	1:17000	80	1.25 ₃	11.5%	1.26 ₅	4.6%	2.7%	2.6%	5.8%	-0.012 ₃₁	0.044 ₉
6: reprise chantier 5	1:30000	1:17000	80	1.20 ₃	11.7%	1.25 ₅	2.9%	3.5%	3.6%	3.1%	0.025 ₃	0.053 ₁₅
7: axes routes	1:30000	1:8000	47	-	-	1.00 ₅	5.3%	0.4%	5.3%	0.5%	-0.014 ₁₉	0.041 ₆
8: axes routes	1:30000	1:8000	66	-	-	1.05 ₄	2.0%	0.3%	2.1%	0.3%	0.009 ₂₃	0.055 ₁₀

Tableau 2: Calcul de l'emq planimétrique par la méthode du contrôle linéaire (unité:m)
 En indice on lit la précision des estimations pour emq_P et emq_L (unité:cm)

robuste et ne semble pas entraîner une part de subjectivité à condition de toujours "couper un peu plus", ce qui améliore emq sans modifier substantiellement les pourcentages p_1 et p_2 .

4.6.Conclusion

Le contrôle linéaire est une alternative valable au contrôle ponctuel à condition de satisfaire à une méthodologie assez rigoureuse.

Il n'exclut nullement le contrôle ponctuel qui doit être simultanément pratiqué quand les points homologues existent en nombre suffisant. Il est plus général :

- il ne suppose pas l'existence de points homologues mais seulement celle de contours homologues,
- il oblige à préciser et à quantifier les causes de désaccord référence-carte (le pourcentage d'accord représentant certainement une façon plus pertinente de chiffrer les manques que le taux de rejet du contrôle ponctuel),
- il inclut la dissymétrie carte-référence,
- il ne nécessite que des travaux d'atelier : si on dispose d'une référence (une autre saisie à grande échelle,

une carte, une base de données) suffisamment exacte. Le moyen de disposer d'une telle référence pourrait être prévu dès la prise de vues,

- mais nécessite des logiciels plus délicats à mettre au point.

Deux thèses (I. ABBAS, ENSG-IGN et P. GRUSSEN-MEYER, ENSAIS) concernant ces problèmes de contrôle seront soutenues en 1994.

Bibliographie :

HOTTIER Philippe (1992). Techniques statistiques pour l'estimation de l'exactitude et de la précision à partir d'un échantillon d'erreurs de mesures, rapport interne IGN-ENSG.

Adresses des auteurs :

Philippe HOTTIER, Ingénieur Général Géographe (ENSG-IGN) et ABBAS I. (ENSG), 2, Avenue Pasteur 94160 Saint Mandé, et Pierre GRUSSEN-MEYER, Professeur à l'ENSAIS, Filière Topographie, 24, Bd de la Victoire 67084 Strasbourg Cedex