

14^{ème} CONGRES DE LA SOCIETE INTERNATIONALE
DE PHOTOGRAMMETRIE - HAMBOURG 1980

Commission II - Groupe de travail 2

Rapport du groupe de travail - Hottier (Institut géographique
national - PARIS).

*

* *

TESTS GLOBAUX D'EXACTITUDE POUR LES
RESTITUTEURS ANALYTIQUES

Summary. - The proposed tests were conventional ones : 8 stereo-pairs concerning various configurations (aerial and terrestrial photogrammetry) with a mean of 10 control points and 30 check-points for each one. The accuracy was defined from the r.m.s. discrepancies at check-points ; other criterious more particularly relative to precision were also used. The analysis of results shows no significant difference of accuracy between available analytical plotters on one hand, and on the other hand no significant difference with a conventional analytical system (comparator + software).

1. Introduction. Le groupe de travail avait pour objectif de tenter d'évaluer l'exactitude des restituteurs analytiques actuellement disponibles sur le marché ; non pour les classer par ordre de mérite - but malsain et vain étant donné la complexité de ce type d'appareil et qui serait d'ailleurs fort difficile à atteindre, j'y reviendrai - mais pour aider les utilisateurs potentiels à s'en faire une idée.

2. Les tests

Le principe de ces tests est ultra-classique : former un modèle (orientation relative, mise à l'échelle et basculement) à l'aide de 9 points fixés à l'avance, et évaluer l'exactitude d'après les écarts en n points de coordonnées connues (points de contrôle - check-points), distincts des précédents, n'ayant donc pas contribué aux opérations de mise en place.

Huit tests étaient proposés dont voici brièvement les caractéristiques essentielles :

a) Cinq couples terrestres (axes de prise de vue sensiblement horizontaux) dont quatre couples pris avec la chambre UMK Zeiss (p = 210 mm) sur le "polygone 71"

...

Numéro du couple	Rapport base/éloignement	Echelle moyenne
106	1/3	1/70 cas normal
107	1/3	1/70 "
111	1/7	1/70 "
101	0.8	1/70 axes convergents (40 gr)

Les couples 101 et 107 ont été pris exactement dans les mêmes conditions.

Les dimensions de polygone sont approximativement (fig. 1) les suivantes : largeur 10 m, hauteur 10 m, profondeur 1 m, alors que la distance de prise de vue est de 7 m environ ; il est équipé de mirettes triples comportant chacune 3 cibles dont les centres ont été déterminés par microtriangulation au Wild T3 (estimation de l'exactitude : emq de 20 μ m en x et y ; 70 μ m en z).

On notera le choix des rapports base/éloignement variant de 1/7 à 0.8 ; nous avons pensé en effet qu'il était intéressant d'envisager de telles configurations très fréquentes dans les applications non cartographiques.

Le dernier couple terrestre (SMK 11 ; $p \approx 60$ mm) a été pris sur un polygone de type très différent (fig. 1 - dessin de droite) : grande profondeur, 4 m, pour une distance de prise de vue moyenne de 7 m (échelle moyenne de prise de vue : 1/100) ; les mirettes ne portent qu'une seule cible et ont été déterminées par microtriangulation (exactitude : emq ≈ 0.1 mm)

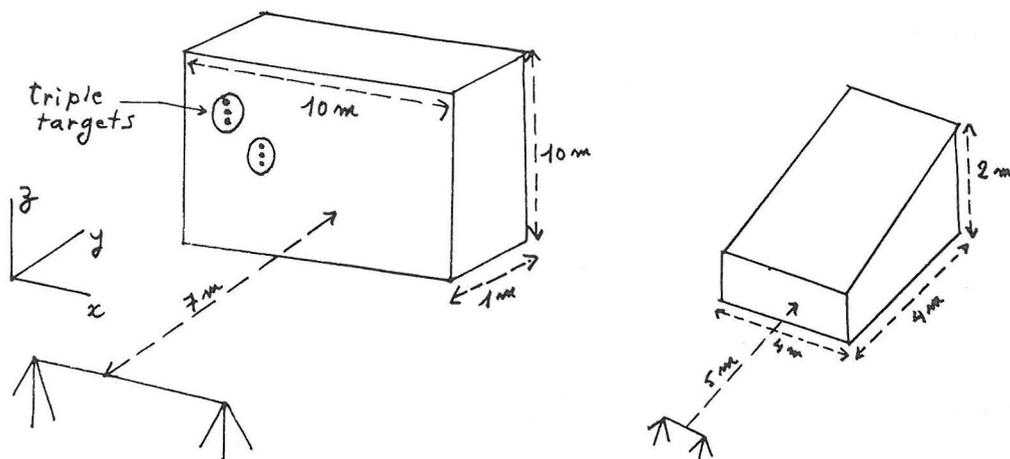


figure 1 . Polygone 71 (à gauche) ; polygone escalier (à droite)

b) Trois couples aériens

- Couple 126-128 ("Sudbury area") - Echelle 1/12000 ; $p = 152$ mm ; prébalisé * ; exactitude des déterminations au sol : emq de 1 cm pour les 3 coordonnées).

(*) - Fourni par le National Research Council (Canada).

- Couple 34 Minervois - Echelle 1/18500 ; p = 152 mm ; prébalisé ; exactitude des déterminations au sol : emq de 2 cm en x y z.

- Couple 89 Charlieu (1/12500) ; p = 152 mm ; non prébalisé.

Les deux derniers couples ont eu peu de succès ; les panneaux de balisage du couple 34 sont un peu petits (mais ont pu néanmoins être pointés à l'I.G.N. sur Traster et Planimat) et les contretypes fournis (par l'I.G.N.) de qualité médiocre ; quant au couple 89 Charlieu, il dérange ; il n'y a pas de balisage ; on demandait de pointer des détails naturels dont on fournissait les coordonnées planimétriques approximatives. En dépit des réticences, je continue à penser qu'un ensemble complet de tests doit comporter ce type de couple : se contenter de chiffrer l'exactitude obtenue dans des conditions parfaites, rarement offertes en pratique est insuffisant.

Tous les participants ont reçu un jeu de contretypes (sur plaque pour les couples 101, 106, 107, 111, 11 et 126 ; sur film pour les couples 34 et 89).

3. Critères d'exactitude

Le critère essentiel ici retenu est l'écart-moyen quadratique aux n points de contrôle (check-points) selon les 3 coordonnées x, y et z, auquel on a joint l'écart maximal constaté, toutes quantités ramenées au plan du cliché par multiplication de l'échelle moyenne E et exprimées en μm .

On a ainsi en x (idem pour les coordonnées y et z) :

$$r_x = E \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_{i,PH} - x_{i,T})^2} ; r_{max} = E \text{Max} \| x_{i,PH} - x_{i,T} \| \quad (1)$$

(E : échelle moyenne ; x_{PH} valeur obtenue par photogrammétrie
 x_T valeur "vraie")

Ces 6 quantités peuvent être résumées par l'écart moyen quadratique et l'écart maximal spatial.

$$r_{xyz} = \sqrt{r_x^2 + r_y^2 + r_z^2}$$

$$r_{maxxyz} = E \text{Max} \sqrt{(x_{i,PH} - x_{i,T})^2 + (y_{i,PH} - y_{i,T})^2 + (z_{i,PH} - z_{i,T})^2} \quad (2)$$

Naturellement la question qui vient à l'esprit est : combien faut-il en choisir pour exprimer correctement l'exactitude obtenue et comment faut-il les choisir ?

Aussi étrange que cela paraisse, il me semble qu'on ne peut actuellement répondre à cette question sans hypothèses très simplificatrices. (Du reste l'obligation de recourir à des points de contrôle traduit bien notre impuissance théorique devant le problème de l'exactitude en photogrammétrie). Ces hypothèses et l'expérience incitent à prendre un minimum de 15 points de contrôle si l'on désire apprécier seulement l'exactitude globale (r_{xyz} : formule 2), de 30 si on veut chiffrer l'exactitude selon les 3 axes de coordonnées ; quant à leur répartition il est de bon sens de la choisir la plus uniforme possible. Ce sont ces règles que nous nous sommes efforcés de respecter.

Le deuxième critère retenu est l'estimation s_0 de l'emq σ_0 des mesures

(celles effectuées grâce aux règles codées pour former le modèle et le mettre en place) d'après les résidus après compensation ; si on calcule l'orientation relative sur q points, s_0 est donné par :

$$s_0 = \sqrt{\frac{q}{q-5} \sum_{i=1}^q (v_{x_i}^2 + v_{y_i}^2 + v_{x'_i}^2 + v_{y'_i}^2)} ; \text{ unité : le } \mu\text{m} \quad (3)$$

v_{x_i} et v_{y_i} désignent les résidus aux coordonnées-cliché gauche, $v_{x'_i}$, $v_{y'_i}$ aux coordonnées-cliché droit du $i^{\text{ème}}$ point de formation d'image.

Ce critère très séduisant par sa simplicité (il ne fait pas intervenir la configuration de prise de vue) présente en revanche les deux graves inconvénients : pour l'orientation relative proprement dite il est fragile : si l'image est formée sur 20 points, l'intervalle de confiance de σ_0 au seuil de 95 % est $[0.74 s_0, 1.55 s_0]$; de plus, estimer l'erreur de mesure n'est pas estimer pour autant l'exactitude des inconnues ...

En soi même, il est cependant intéressant ; d'autant plus qu'on peut comparer s_0 , à une estimation directe s'_0 de la dispersion des mesures au niveau des règles codées, obtenues par comparaison de mesures de distances (entre doublets de cibles) faites à deux reprises (8 à 10 distances par couple) :

$$s'_0 = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n [d_{i1} - d_{i2} - \overline{(d_{i1} - d_{i2})}]^2} ; \text{ unité : le } \mu\text{m} \quad (4)$$

Les deux derniers critères enfin que nous avons envisagé sont des critères de "précision" : précision de répétition et précision de pointé.

Nous définirons la première en disant qu'elle chiffre la dispersion des résultats lorsqu'on répète deux fois de suite et dans des conditions stationnaires (même appareil) toutes les opérations de mise en place ; pour la coordonnée x on la chiffrera par :

$$s_{1,x} = E \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (e_{i1} - e_{i2})^2} ; \text{ unité : le } \mu\text{m} \quad (5)$$

e_{i1} et e_{i2} désignant les erreurs en x au même point de contrôle i lors des reprises 1 et 2, E étant l'échelle moyenne de prise de vue ; et pour les 3 coordonnées par :

$$s_2 = \sqrt{s_{1,x}^2 + s_{1,y}^2 + s_{1,z}^2} \quad (6)$$

Quant à la seconde, nous dirons que c'est celle qui chiffre la dispersion locale des erreurs, soit qu'on repointe à plusieurs reprises les mêmes cibles (sans répéter les opérations de mise en place), soit qu'on considère les erreurs en des points voisins ; il a été possible de la chiffrer sur les couples 101, 106, 107 et 111 grâce aux mirettes à 3 cibles : les erreurs pour de tels groupes de cibles sont en effet - comme le montre l'expérience - très fortement corrélées, et leur dispersion est essentiellement due à l'erreur de pointé

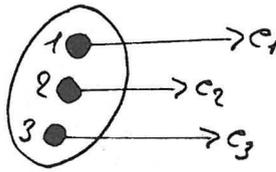


Fig. 2 : Mirette triple n° i

Pour la mirette i, la précision de pointé selon la coordonnée x est alors estimée par :

$$s_{\sigma, x, i} = E \sqrt{\frac{1}{2} \sum_{i=1}^3 (e_{i,x} - \bar{e}_{i,x})^2} \quad (5)$$

et sur l'ensemble du couple (n mirettes triples) on prend :

$$s_{\sigma, x} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum s_{\sigma, x, i}^2} ; \quad s_{\sigma} = \sqrt{s_{\sigma, x}^2 + s_{\sigma, y}^2 + s_{\sigma, z}^2} \quad (6)$$

En principe, on ne devrait constater aucune différence sensible entre précision de répétition et précision de pointé ; s'il en est une elle témoigne d'un bruit propre aux opérations de mise en place.

4. Fiabilité des tests

Point fort délicat, dans quelle mesure les résultats sont-ils affectés par des facteurs autres que l'appareil testé ? Une réponse partielle ressort de l'examen de la dispersion des résultats des écarts moyens quadratiques spatiaux (rxyz en μm ; formule 2) obtenus en répétant les tests dans des conditions identiques :

Couple	Anaplot		Traster		
	Essai 1	Essai 2	Essai 1	Essai 2	
101	10,1	12,2	14,0	16,3	(7)
106	10,8	11,7	10,5	12,5	
107	25,0	18,0	23,3	24,3	
111	40,9	35,2	34,3	29,4	
11	20,1	20,7	40,1	27,5	
126-128	17,6	14,7	14,3	13,5	

On voit que cette répétabilité est bonne (exception faite du couple 11, le plus difficile à traiter, mal avalé par le Traster).

Mais une bonne répétabilité n'est pas suffisante ; il faudrait prouver que d'autres facteurs tels que l'habileté de l'opérateur choisi, le plus ou moins bon rendu du contre-type sont sous influence significative ; les essais limités (1) exécutés à l'I.G.N. en 1978 semblent montrer que de tels effets ne sont pas trop à craindre.

5. Résultats

Ces résultats sont consignés dans le tableau ci-dessous. Pour l'interpréter convenablement, il faut savoir

a) que les résultats relatifs à l'Anaplot (tests exécutés par le National Research Council - Canada) et au Traster (IGN - Paris) proviennent de l'analyse des sorties XYZ aux points de contrôle, et que pour ces deux appareils, il y a eu pour chaque test deux essais consécutifs réalisés par le même opérateur ; pour le Planicomp (Technische Universität München) comme par suite d'un malentendu les sorties XYZ n'étaient pas disponibles (à l'exception du couple 111), les résultats figurant dans le tableau ont été recalculés à l'I.G.N. à partir des coordonnées-cliché $x_i y_i$, x'_i et y'_i ; de plus il n'y a eu qu'un essai par couple (sauf pour le couple 11 où il y a eu cinq reprises ...).

b) que les résultats analogues obtenus pour un système analytique classique (mono-comparateur Asco-Record Zeiss + programme IGN - sans inconnues de systématique) sont les suivants :

Couple	rx	ry	rz	rxyz	s ₀
	rmx	rmy	rmz	rmxyz	
101	3.6	6.3	6.6	9.4	2.2
	9.6	15.1	21.8	22.9	
106	7.0	15.1	5.9	17.7	3.0
	17.1	42.6	13.3	45.4	
107	6.1	18.2	6.3	20.2	3.7
	14.0	46.5	14.9	49.8	
110	17.2	31.8	24.7	43.9	2.1
	49.1	80.3	74.1	98.7	
11	12.7	18.3	3.8	22.6	2.1
	12.5	38.8	7.7	43.3	

(8)

c) qu'il s'agit d'exactitude minimale, entendons par là de celle qu'on obtient pour chacun de ces couples en formant l'image sur une dizaine de points d'appui, et en ne faisant qu'un seul pointé.

On constate alors :

- d'abord conclusion principale, que les tests ne mettent en évidence aucune différence significative d'exactitude entre les restituteurs analytiques étudiés d'une part, et d'autre part aucune différence significative avec un système analytique plus classique (Monocomparateur + programme : (8)).

C'est particulièrement net pour les couples 101, 106, 107, 111 et 126 ; pour le couple 11, le plus difficile, noter l'excellence du résultat obtenu à l'Anaplot, et la médiocrité de celui obtenu au Planicomp (peut-être dû à un contre-type de médiocre qualité ?) ; les chiffres du tableau sont les moyennes de cinq essais successifs).

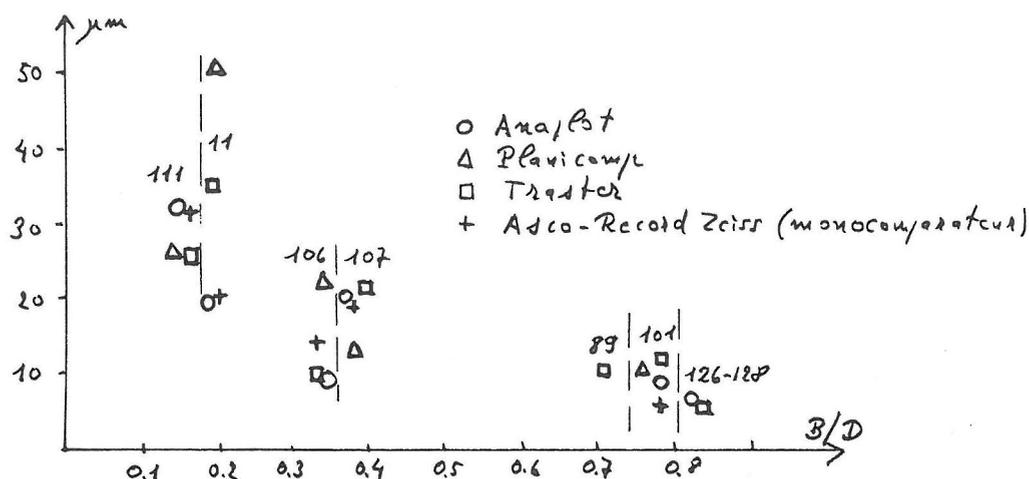


Fig. 3 - Exactitude obtenue en éloignement (écart moyen quadratique en éloignement ramené au plan du cliché) en fonction du rapport base/éloignement moyen B/D .

Il est intéressant de comparer les estimations moyennes de l'emq des mesures s_0 et s'_0 (formules 3 et 4) pour l'Anaplot et le Traster ; on trouve

Anaplot	Traster	
$s_0 = 4.77 \mu m$	$s_0 = 4.13 \mu m$	(9)
$s'_0 = 3.69 \mu m$	$s'_0 = 4.32 \mu m$	

(la précision de chacune de ses estimations est environ $0.4 \mu m$ en écart-type). Les chiffres analogues pour l'Asco-Record Zeiss étaient $s_0 = 2.76 \mu m$ et $s'_0 = 1.63 \mu m$ avec pour intervalles de confiance à 95 % respectifs [2.74, 3.18] et [1.52, 1.84] ; l'emq des mesures semble donc plus élevée sur les restitu-teurs analytiques, sans pour autant entraîner diminution de l'exactitude.

- que la "précision de pointé" ($s_{p,x} \dots s_{p,xyz}$) dans tous les cas où elle a pu être évaluée est légèrement supérieure à la "précision de répétition" ($s_{r,x} \dots s_{r,xyz}$), mais si peu qu'on peut affirmer que le bruit dû aux opérations de mise en place est faible.

- que la précision (de pointé ou de répétition) est deux fois meilleure en moyenne que l'exactitude minimale, preuve s'il en était besoin que l'erreur de pointé n'est qu'une composante faible de l'erreur totale.

On remarque d'ailleurs qu'elle semble un peu meilleure pour le Traster que pour l'Anaplot ; mais cette formulation est incorrecte, car il est bien possible que cette différence reflète les aptitudes de l'opérateur Anaplot ou de l'opérateur Traster qui ont exécuté les tests.

6. Autres remarques

a) Dans le rapport (1) présenté au Symposium de la Commission II à Paris, on trouvera d'autres chiffres relatifs à un restituteur analogique, le Planimat ; pour les couples terrestres on avait conclu sans aucun doute possible que l'emploi d'un restituteur analytique conduit à des résultats en moyenne bien meilleurs ; très probablement parce que pour les couples à grande profondeur de

Couple (pair)	Appareil	r_{0x} r_{mx}	r_{0y} r_{my}	r_{0z} r_{mz}	r_{0xy} r_{mxy}	s_0	s'_0	s_{0x} s_{px}	s_{0y} s_{py}	s_{0z} s_{pz}	s_{0xy} s_{pxy}
101 $E \approx 1/70$ $B/D \approx 0.8$ axes convergents	HmaxPot	4.8 11.2	9.3 21.7	6.8 22.2	12.5 29.3	4.0	4.2	3.3 2.2	5.3 5.2	3.7 4.3	7.3 4.3
	Planicompl	4.2 9.1	10.3 25.2	4.8	14.8 33.8	2.8					
	Traster	6.6 14.6	12.1 36.2	6.3 19.3	15.2 40.5	5.8	6.9	2.8 3.0	4.9 4.7	3.9 2.6	6.9 6.1
106 $E \approx 1/70$ $B/D \approx 1/3$	HmaxPot	4.3 11.9	9.6 27.5	4.0 12.3	11.3 29.8	3.8	4.0	3.3 2.7	7.2 8.1	4.3 3.3	9.0 9.1
	Planicompl	9.7 32.1	23.1 60.9	12.6 33.4	28.0 74.0	3.1					
	Traster	3.3 7.7	9.8 25.0	4.7 9.9	11.3 25.3	3.2	3.3	2.3 1.8	5.0 4.7	3.6 2.6	6.6 5.7
107 $E \approx 1/70$ $B/D \approx 1/3$	HmaxPot	7.1 17.5	20.1 55.0	4.7 11.1	21.8 59.0	3.5	2.8	3.5 3.0	10.1 9.4	3.3 3.4	11.2 10.4
	Planicompl	5.6 13.0	14.8 41.3	8.6 27.7	18.0 51.4	4.8					
	Traster	10.6 22.1	20.2 49.0	6.9 17.0	23.8 54.0	4.1	3.1	3.8 3.2	7.7 5.8	4.8 2.2	9.8 7.4
111 $E \approx 1/70$ $B/D \approx 1/7$	HmaxPot	12.7 44.0	23.6 73.4	12.8 31.0	38.1 88.1	4.7	3.7	5.9 4.8	17.1 16.5	8.3 6.3	19.9 18.3
	Planicompl	15.2 60.3	27.1 68.9	16.7 44.7	35.3 95.8	3.7					
	Traster	10.9 28.8	26.7 62.5	13.8 38.4	31.9 70.9	4.1	4.5	5.4 3.7	15.9 8.6	6.3 4.4	17.9 10.3
11 $E \approx 1/100$ $B/D \approx 0.7$	HmaxPot	4.4 11.0	19.1 38.0	6.1 13.3	20.5 38.4	5.9	3.7	3.7	17.5	3.8	18.3
	Planicompl	11.3 17.3	42.3 31.2	30.4 137.0	53.2 139.0	3.4					
	Traster	10.1 20.3	31.2 60.0	11.4 17.9	34.6 61.0	3.8	2.1	10.9	16.2	15.6	25.0
126-128 $E = 1/2000$	HmaxPot	4.5 14.6	7.2 23.7	13.6 44.1	16.2 50.8	6.1		2.5	2.5	6.2	7.5
	Traster	5.2 12.5	5.8 19.1	11.5 32.9	13.9 28.8	3.2		2.2	3.2	3.7	5.4

TABLEAU 1 : Résultats des tests

champ le recours à un restituteur analytique résout parfaitement la question alors cruciale du centrage des clichés ; pour les couples aériens, il n'a pas été possible de trancher.

b) Le pointé sur détails naturels peut donner de forts bons résultats ; voici ainsi le résultat du test Charlieu sur Traster (1/12500 ; 2 essais successifs - IGN) :

$$rz = 14.8 \mu\text{m} ; \quad rmz = 36,4 \quad ; \quad s_0 = 3,4 \mu\text{m}$$

c) Le gain d'exactitude consécutif à deux pointés est significatif mais insensible ... ainsi qu'en fait foi le tableau qui suit

Couple	Anaplot	rxyz	rxyz	Traster	rxyz	rxyz	
		1 pointé	2 pointés		1 pointé	2 pointés	
101		12,5	10,9		15,2	14,5	(10)
106		11,3	11,2		11,3	10,3	
107		21,8	20,3		23,8	22,7	
111		38,1	33,3		31,9	29,4	
11		20,5	16,4		34,6	29,5	
126-128		16,2	15,5		13,9	13,4	

A peine 10 % .

d) Mais la précision, elle, s'améliore notablement avec 2 pointés, de 25 % environ

Couple	Anaplot	$s_{p,xyz}$	$s_{p,xyz}$	Traster	$s_{p,xyz}$	$s_{p,xyz}$	
		1pointé	2pointés		1pointé	2pointés	
101		7,1	6,1		6,1	5,3	(11)
106		9,1	7,6		5,7	4,1	
107		10,4	8,2		7,3	5,6	
111		18,3	14,7		10,3	8,2	

e) Enfin dernier point, la curiosité nous a pris de voir si en prenant la moyenne de résultats obtenus de part et d'autre de l'Atlantique on améliorerait l'exactitude ; pour cela nous avons comparé les valeurs moyennes obtenues avec 2 pointés Anaplot ou 2 pointés Traster, avec les valeurs moyennes obtenues en prenant 1 pointé Anaplot et 1 pointé Traster

Couple	1 pointé Anaplot	2 pointés Anaplot	1 pointé Anaplot	
	ou Traster	ou	et	
	ry	2 pointés Traster	1 pointé Traster	
		ry	ry	
101	10,26	10,20	6,10	(12)
106	9,70	9,40	8,50	
107	20,15	19,15	17,90	
111	30,35	29,32	27,10	
126	rz = 12.46	rz = 12.35	rz = 10.6	

Il vaut donc mieux semble-t-il faire 1 pointé à Paris et 1 pointé à Ottawa que 2 pointés à Paris ou 2 pointés à Ottawa.. Noter aussi la différence à nouveau significative entre les couples 106 et 107 (conditions de prises de vue identiques) : il faut donc bien l'attribuer à la prise de vue et non aux contre-typage ; et la spectaculaire amélioration pour le couple 101 (axes de prise de vue convergents).

(1) Bibliographie.

PH. HOTIER : Global accuracy tests for analytical plotters. (Les équipements en photogrammétrie analytique et de télédétection - Paris - Septembre 1978 - Editions technip).