

Les erreurs de mesure en topographie

**Réflexions sur leur propagation et les
moyens à mettre en œuvre pour tenter
d'en minimiser les effets.**

***François MARCHAND (S.C. du Jura)
Dominique ROS (S.C. de Montpellier)***

2024

Sommaire

Avertissement.....	4
Glossaire.....	5
1. Origines d'une interrogation.....	10
1.1. Une préoccupation déjà ancienne	10
1.2. Comparatif Disto vs théodolite	10
2. Premières ébauches	11
2.1. Justesse et fidélité.....	11
2.2. DistoX mal étalonné et imprécision	12
2.3. Erreur systématique et erreur aléatoire	12
2.4. Un exemple d'erreur aléatoire : l'erreur sur le relèvement.....	13
2.4.1. Présentation.....	13
2.4.2. Introduction de l'erreur de mesure	15
2.4.3. Pièges à cons.....	17
2.4.4. Topographie aléatoire.....	17
2.4.5. Effet de l'erreur de relèvement sur une topographie aléatoire	18
2.4.6. Effet de l'erreur de relèvement sur plusieurs topographies aléatoires.....	20
2.5. Un autre exemple d'erreur aléatoire : l'erreur de décentrement.....	21
3. Élargissement de la recherche à la propagation des erreurs.....	22
3.1. Multiplication du nombre de visées	22
3.2. Concaténer plusieurs essais avec F9	24
3.3. Ajout d'autres paramètres	25
4. Première simulation numérique aboutie	25
4.1. Objet de la simulation	25
4.2. Présentation générale.....	26
4.2.1. Principes.....	26
4.2.2. Valeur aléatoire.....	28

4.3.	Explication détaillée du fichier Excel	31
4.4.	Quelques résultats typiques	34
4.4.1.	Exemple 1.....	34
4.4.2.	Exemple 2.....	35
4.5.	Adjonction et influence d'un bruit de mesure.....	36
4.6.	Adjonction et influence d'une erreur de décentrement.....	40
4.7.	Adjonction et influence d'une erreur de non linéarité	42
4.8.	Adjonction et influence d'un décalage statique du zéro	46
4.9.	Concrètement	49
4.9.1.	Calibration d'un compas IRIS50 (septembre 2018)	49
4.9.2.	Expérimentation sur les DistoX.....	52
5.	Seconde simulation numérique aboutie.....	56
5.1.	Objectifs de cette nouvelle simulation.....	56
5.1.	Présentation générale.....	56
5.1.1.	Principes de base	56
5.1.2.	Fonctionnement.....	57
5.1.2.1.	Généralités	57
5.1.2.2.	Spécificités	58
5.1.2.1.	Rappel	58
5.1.2.2.	Résultats.....	59
5.1.3.	Autres configurations possibles	59
5.1.4.	Constats.....	60
5.1.5.	Conclusions	62
6.	Comparaison de topographies	62
6.1.	Un exemple de plan faussé, la « Caverne du Maure » (34).....	62
6.2.	Généralisation à des topographies théoriques	63
7.	Réflexions sur la compensation des erreurs topographiques	65
7.1.	Généralités	65

7.1.1.	Redondances.....	65
7.1.2.	Simulation pour compensation.....	67
7.1.3.	Points de début et de fin distants et connus	67
7.1.4.	Points de début et de fin confondus (bouclage).....	68
7.2.	Méthode de compensation (points de début et de fin distants et connus).....	68
7.2.1.	Répartition de l'erreur en fonction de la longueur de la visée	68
7.2.1.1.	Principe	68
7.2.1.2.	Décalage du zéro	70
7.2.1.3.	Non linéarité	72
7.2.1.4.	Décentrement	72
7.2.1.5.	Bruit de mesure.....	74
7.2.1.6.	Conclusion provisoire.....	75
7.3.	Méthode de compensation (points de début et de fin confondus : bouclage).....	75
7.3.1.	Répartition de l'erreur en fonction de la longueur de la visée	75
7.3.1.1.	Principe	75
7.3.1.2.	Décalage du zéro	77
7.3.1.3.	Non linéarité	77
7.3.1.4.	Décentrement	78
7.3.1.5.	Bruit de mesure.....	79
7.3.1.6.	Conclusion provisoire.....	80
8.	Mise en pratique de la compensation d'une erreur.....	80
8.1.	Prérequis et objectifs	80
8.2.	Un outil de travail « gui4cli ».....	81
8.3.	Le programme « Topocor »	81
8.3.1.	Généralités	81
8.3.2.	Prérequis	81
8.3.3.	À quoi sert « Topocor » ?	81
8.3.3.1.	Usage d'un DistoX2	82

8.3.4.	Étalonnage de l'instrument de mesure	82
8.3.4.1.	Erreurs de mesure d'un DistoX2	82
8.3.4.2.	Courbe d'étalonnage d'un DistoX2	82
8.3.5.	Convention de nommage.....	83
8.3.5.1.	Vocabulaire	83
8.3.5.2.	Description de l'écran principal	84
8.3.6.	Principes de fonctionnement de Topocor	84
8.3.7.	Installation de Topocor	85
8.3.7.1.	Exécutable.....	85
8.3.7.2.	Fichier "Courbe d'erreur du DistoX"	86
8.3.8.	Mode d'emploi.....	86
8.3.8.1.	Préalables.....	86
8.3.8.2.	Utilisation de Topocor.....	87
8.3.8.3.	Particularités	89
8.3.8.4.	Sauvegarde du contexte	90
8.3.9.	Aide	90
8.3.9.1.	Générale.....	90
8.3.9.2.	Pop-up.....	90
8.3.10.	Applications et limites de « Topocor »	90
8.3.10.1.	Corriger une erreur d'azimut avec Topocor.....	90
8.3.10.2.	Corriger une erreur de longueur avec Topocor	92
8.3.10.3.	Ce que Topocor ne peut pas faire pour vous.....	94
9.	Conclusions.....	95
10.	Questions subsidiaires	96
10.1.	Comment « étalonner » rigoureusement un Disto X au moyen des 56 mesures préconisées ?.....	96
10.2.	Comment le « pseudo-étalonnage » d'un DistoX devient-il obsolète ?	101
10.3.	La véritable courbe d'étalonnage est-elle encore valable après un « pseudo-étalonnage » ?	102
11.	Remerciements.....	102

12.	Annexe : qu'est-ce qu'un écart-type ?	102
13.	Bibliographie	104
14.	Table des illustrations	104

Avertissement

Ce petit opuscule tente de rendre compte de la démarche qu'ont suivie les auteurs pour essayer de bien cerner le risque d'erreur lors d'une activité de topographie, puis d'essayer d'y remédier au mieux.

Malgré une passion commune pour la découverte souterraine et la spéléologie, ainsi qu'une base expérimentale effective sur le terrain (voir notes 5 et 6), de nombreux écueils se dressaient sur leur route pour mener à bien cette réflexion : difficultés techniques, complexités mathématiques, différences de formation initiale et de points de vue...

De plus, même si les interrogations portaient au départ sur l'exactitude du DistoX, dans un premier temps c'est surtout (pour des raisons pratiques) autour d'un compas qu'ont tourné les différentes études. Nous avons tenté tout de même par la suite d'en tirer par extrapolation et expérimentation des conséquences pour le distancemètre laser.

Avec toute la bonne volonté du monde nous avons donc produit ce qui suit, en espérant que cela puisse être d'une quelconque utilité ne serait-ce qu'à titre purement intellectuel. Il ne s'agit donc pas d'une thèse de troisième cycle, mais du simple compte-rendu détaillé de nos travaux et de nos réflexions sur le sujet.

Comme sa rédaction à quatre mains ne fut pas simple, son contenu pourra parfois paraître redondant ou bien imparfait au lecteur averti qui, nous l'espérons, fera preuve d'indulgence à notre égard.

Par chez moi dans les Cévennes il y a un dicton occitan qui affirme non sans raison : « *Entre la faire e la dire i a tres legas de camin* » (Entre le faire et le dire il y a trois lieues de chemin)...

Domi

Glossaire

- **Point topo** : point matériel et immuable de la cavité topographiée. Par exemple, zone matérialisée au sommet d'une stalagmite, clou, marque de peinture, étiquette etc.
- **Position d'un point** : sauf spécification particulière il s'agit des coordonnées x et y du point dans un repère de référence (fixe et immuable), par exemple : coordonnées exprimées en projection Lambert III (système RGF93) ou en projection UTM (système WGS84).
- **Position réelle** : position d'un point déterminée par des instruments et un opérateur supposé parfait (par exemple un géomètre expert équipé d'un théodolite).
- **Position calculée** : position d'un point déterminé et calculée à partir de mesures entachées des fautes des appareils de mesure et de l'opérateur.

- **Écart :**

Si les coordonnées de A sont XA et YA et si les coordonnées de A' sont XA' et YA' , on distingue alors

- ✓ **l'écart simple E** qu'on calcule à l'aide de ce brave Pythagore :

$$E = \sqrt{(XA - XA')^2 + (YA - YA')^2}$$

- ✓ **l'écart géométrique** : on utilise A comme référence et on détermine les coordonnées relatives de A' par rapport à A.

- $ex = XA' - XA$

- $ey = YA' - YA$

Le couple (ex, ey) constitue l'écart géométrique.

- **Faute topographique** : (ou tout simplement faute) élément parasite ayant pour conséquence que la position calculée d'un point topo va être différente de sa position réelle. Une faute est en général causée par plusieurs fautes élémentaires qui se combinent engendrant diverses erreurs de mesure.



Figure 1 : Travaux au col de Thalys, François au théodolite



Figure 2 : Travaux à la Salamandre, François et Jean-Pierre au pied du puits

1. Origines d'une interrogation

1.1. Une préoccupation déjà ancienne

Les prémices de la question sont apparus au fil des tentatives de François Marchand d'obtenir des topographies les plus précises possibles lors de ses sorties de spéléo anthropique minière. Évidemment, avant de chercher à connaître l'influence d'erreurs éventuelles sur le résultat d'une topographie, ce qui importe le plus c'est d'en limiter le nombre. Il s'est donc employé longtemps à utiliser des méthodes et du matériel qui réduisent au minimum acceptable le risque d'effectuer des mesures incorrectes.

Nous ne reviendrons pas sur ceux-ci puisqu'ils ont déjà fait l'objet d'une première publication. Notons simplement que François utilise, entre autres, un distancemètre Leica DistoX310 pour mesurer les longueurs et les pentes ainsi qu'un compas Plastimo IRIS 50 étalonné¹ pour les mesures d'azimuts.

1.2. Comparatif Disto vs théodolite

Actuellement en topographie souterraine, de plus en plus de spéléologues se tournent vers le DistoX modifié pour relever les azimuts grâce à la carte additionnelle de Beat Heeb² et communiquant en Bluetooth avec un périphérique externe muni d'un logiciel de carnet topo électronique comme Auriga, PocketTopo ou TopoDroid³.

Tout naturellement la fréquentation de spéléos utilisant une version modifiée du Disto a poussé certains d'entre eux à s'interroger sur la précision réelle de ce type d'appareil : quelle est-elle, comment la vérifier ? Et bien que nombre d'entre nous lui fassent déjà confiance en suivant scrupuleusement les conseils donnés par Beat Heeb et Marco Corvi⁴, François se demandait : s'agit-il vraiment d'un appareil qui mériterait de changer de technique ?

Ce sont ces interrogations qui l'ont amené avec Dominique Ros (croisé sur les stages techniques FFS) à lancer une série d'expérimentations pour tenter d'y voir plus clair. En 2017 et 2018 eurent donc lieu sur le terrain deux tentatives d'évaluation de la précision d'un DistoX comparée à celle d'un théodolite de chantier Wild Heerbrugg TO5. La première⁵ fut organisée au col de Thalys près de Mélagues (12) et la seconde⁶ dans la grotte de la Salamandre à Méjannes-le-Clap (30) avec l'aide de Jean-Pierre Rouges (CLPA). Ces deux journées ont fourni un nombre intéressant de mesures qu'il a fallu ensuite essayer d'interpréter. Cette quantité de relevés ouvrait alors vers d'autres perspectives.

¹ Voir les documents d'évaluation d'un compas IRIS 50, par François Marchand, disponibles sur : http://souterweb.free.fr/boitaoutils/prospection/annexes/analyse_des_compas.pdf et sur : http://souterweb.free.fr/boitaoutils/prospection/annexes/etalonnage_compas.xls

² Voir <https://paperless.bheeb.ch/>

³ Voir <http://auriga.top/> et aussi <https://sites.google.com/site/speleoapps/home/topodroid>

⁴ Voir <http://marcocorvi.altervista.org/>

⁵ Le compte-rendu de cette première expérimentation est disponible à l'adresse : <http://souterweb.free.fr/boitaoutils/topographie/annexes/Disto%20X%20vs%20Theodolite%202017%20CR.pdf>

⁶ Le compte-rendu de cette seconde expérimentation est disponible à l'adresse : <http://souterweb.free.fr/boitaoutils/topographie/annexes/Evaluation%20DistoX%201.0.pdf>

2. Premières ébauches

C'est en particulier après l'analyse des données de l'expérience à la Salamandre, et au cours de la rédaction du compte-rendu de cette expérimentation, que nous avons commencé à nous demander comment les erreurs les plus courantes entachant les mesures topographiques influaient sur le résultat final, à savoir : le tracé du plan d'une cavité.

Mais avant d'essayer de voir ce que nous avons pu déduire de cette étude et comment nous avons traité ce problème, il est important de rappeler quelques généralités sur la notion d'erreur.

2.1. Justesse et fidélité

Tout système de mesure est inévitablement attaché d'erreurs. En topographie professionnelle, en plus de la faute grossière, les nombreuses erreurs de mesurage sont définies par une norme (AFNOR NF x 07001). On y trouve par exemple (liste non exhaustive) :

- ✓ erreur accidentelle ou fortuite,
- ✓ erreur d'interpolation,
- ✓ erreur de lecture,
- ✓ erreur de parallaxe,
- ✓ erreur systématique,
- ✓ erreur cyclique,
- ✓ erreur d'observation etc.

Toutes ces erreurs (et bien d'autres) influent à des ordres divers sur la justesse ou sur la fidélité de la mesure (voire sur les deux à la fois). De quoi s'agit-il ?

Pour être - relativement - exactes, des mesures doivent être à la fois fidèles (c'est-à-dire peu dispersées dans l'espace) et justes (c'est-à-dire concentrées dans une zone proche de la mesure réelle). Un dessin valant parfois mieux qu'un long discours, voir ci-dessous.

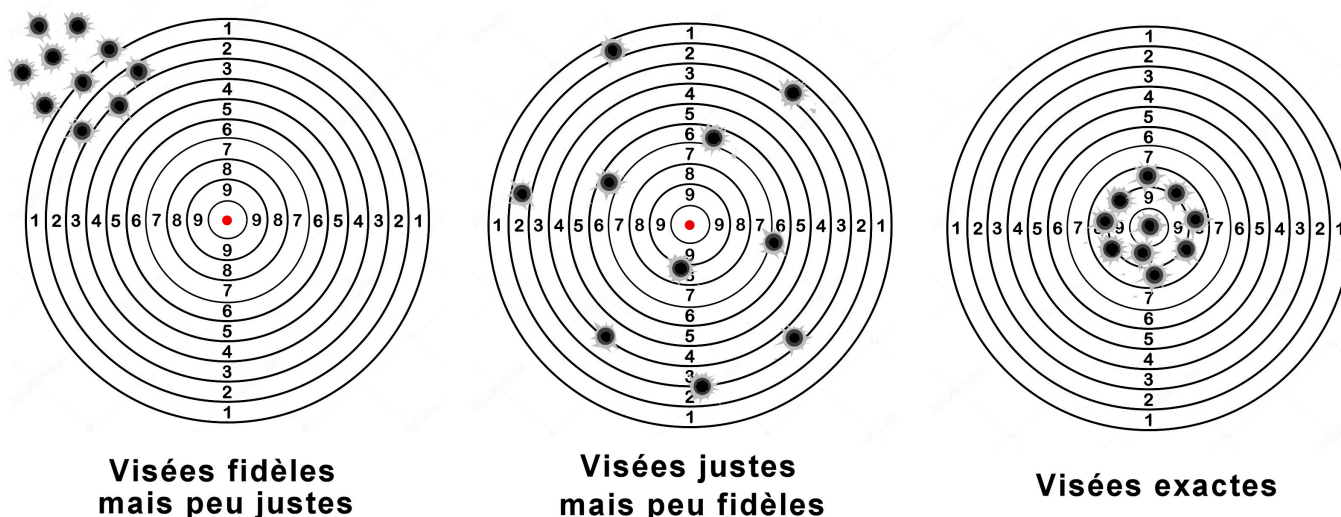


Figure 3 : Justesse, fidélité et exactitude relative d'une série de 10 mesures

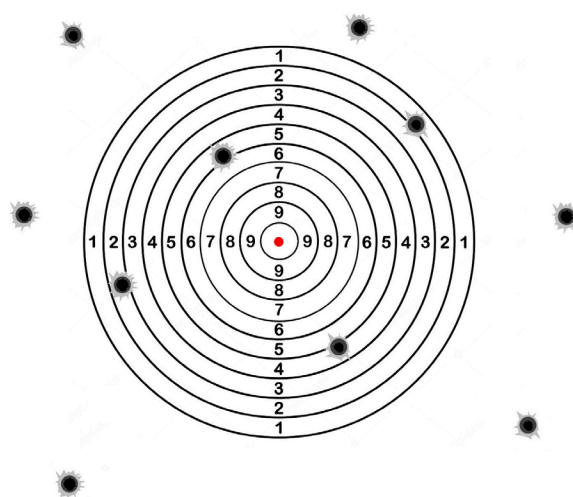
La **fidélité** d'un instrument de mesure est donc son aptitude à donner des indications très voisines les unes des autres lors de l'application répétée de l'instrument - toujours dans les mêmes conditions - au mesurande (ce que l'on souhaite mesurer).

La **justesse** d'un instrument de mesure est par contre son aptitude à donner des indications exemptes d'erreur systématique (appelée aussi erreur de justesse).

2.2. DistoX mal étalonné et imprécision

Que se passe-t-il quand un DistoX est mal étalonné ?

En plus de toutes les erreurs liées à la mesure elle-même et dont nous reparlerons, le calcul de l'azimut (gisement) est faussé par de nombreuses influences : électromagnétisme inhérent à l'appareil lui-même, mauvais alignement du laser, non linéarité des capteurs etc. L'expérience a prouvé que dans les cas les plus critiques, les mesures données sont souvent erronées. Par analogie avec un tir sur cible, on pourrait assimiler cela à un « carton » qui ne serait ni fidèle, ni juste.



Visées ni justes ni fidèles

Figure 4 : Série de 10 mesures de mauvaise qualité

Pour l'instant tenons-nous en à ces quelques généralités. C'est uniquement dans la partie 6 à la fin de cet article, que nous montrerons concrètement ce que cela peut impliquer pour une topographie réelle.

2.3. Erreur systématique et erreur aléatoire

Les erreurs dont on a parlé ci-dessus peuvent être classées en plusieurs catégories. Nous allons nous intéresser essentiellement à deux d'entre elles : les erreurs systématiques et les erreurs aléatoires. Quelle en est la définition en métrologie ?

- **Erreurs systématiques :**

Les erreurs systématiques sont des erreurs reproductibles reliées à leur cause par une loi physique, elles sont donc susceptibles d'être éliminées par des corrections adaptées. Deux valeurs mesurées comme identiques sont entachées, par définition, de la même erreur systématique. L'erreur systématique n'est pas nécessairement la même pour des valeurs différentes. Les erreurs systématiques doivent être prévenues en étalonnant les appareils de mesure afin de déterminer, à partir de la valeur lue, la valeur vraie de la mesure. En incluant uniquement des erreurs systématiques, les topographies successives (à conditions identiques) seraient fausses mais toutes semblables.

- **Erreurs aléatoires :**

Ce sont des erreurs, non reproductibles, qui se produisent de façon sporadique et inattendue. Lors d'une mesure, l'erreur aléatoire peut prendre, au hasard, n'importe quelle valeur. Dans le meilleur des cas la valeur de l'erreur satisfait à une loi de distribution c'est-à-dire que pour un grand nombre d'erreurs on peut prédire leur répartition statistique. D'une mesure à l'autre, la valeur obtenue peut être surévaluée ou sous-évaluée par rapport à la valeur réelle du fait des erreurs aléatoires.

Nous avons commencé notre étude en simulant des erreurs aléatoires sur la mesure du relèvement. Plus tard nous y ajouterons une ou plusieurs erreurs systématiques (voir au point 4.6)

2.4. Un exemple d'erreur aléatoire : l'erreur sur le relèvement

2.4.1. Présentation

C'est l'erreur qui viendrait tout de suite à l'esprit si on utilisait un compas magnétique. Supposons que ce compas de visée soit gradué en degrés d'angle (un petit trait tout les degrés) quand on vise une cible, on évalue la valeur du relèvement en lisant les écritures optiquement juste sous la cible. Avec un peu de pratique, l'opérateur va évaluer, par interpolation, le demi-degré. Ainsi l'opérateur prend conscience qu'il fait une erreur d'au moins $\pm 0.25^\circ$. Ça veut dire que, s'il n'y a pas d'autres erreurs, quand l'opérateur indique 48.5° la valeur vraie du relèvement est comprise entre 48° et 49° . En fait dans cet exemple nous mélangeons les notions de résolution et de précision. Si nous disposons d'un compas fidèle et que 5 minutes plus tard nous refaisons le même relevé, l'opérateur annoncera, de nouveau 48.5° et non pas 48° ou 49° .

Examinons en détail ce qui se produit lors d'une erreur sur le relèvement. Au passage nous verrons la nécessité de normaliser quelque peu notre langage afin d'éviter de nombreuses ambiguïtés.

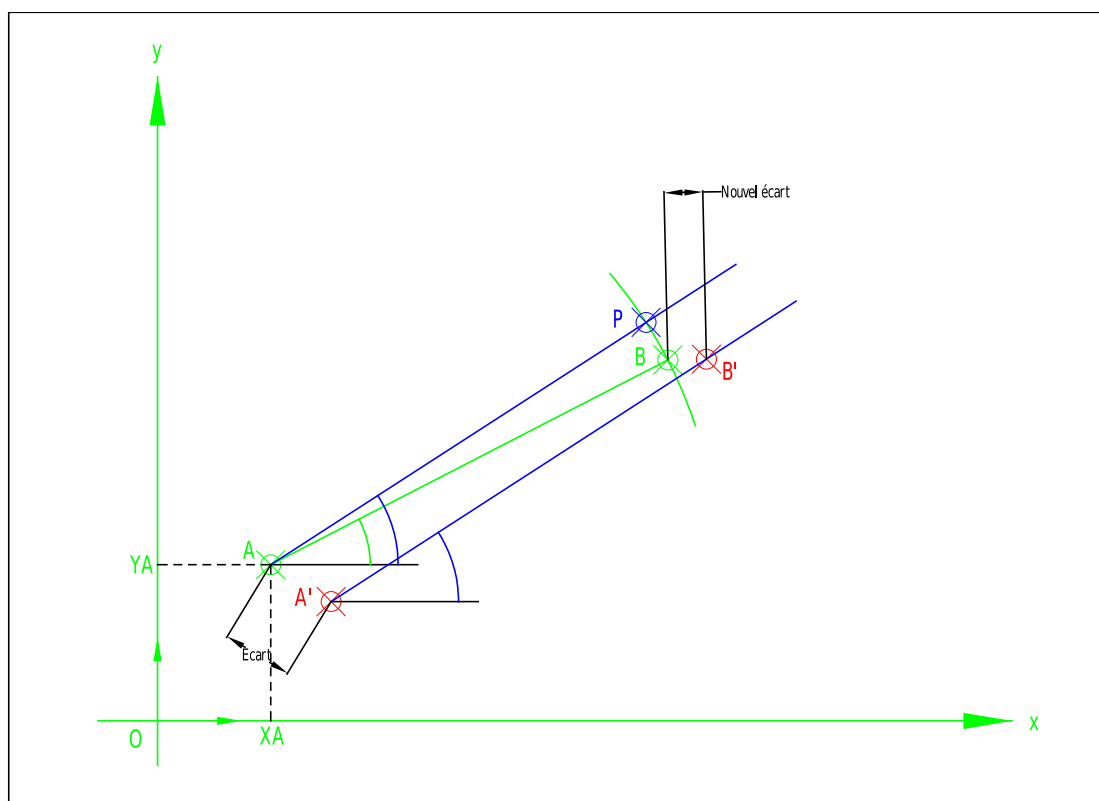


Figure 5 : Erreur sur le relèvement

Le croquis de la Figure 3 : Erreur sur le relèvement est une représentation plane (vue de dessus) d'une topographie élémentaire entre 2 points A et B. Par convention le croquis est rapporté dans un repère orthonormé x, y (les axes sont perpendiculaires et utilisent la même unité métrique sur les 2 axes). Toujours pour simplifier on suppose que tous les opérateurs de la zone utilisent un repérage dans une grille métrique et orthogonale (Lambert par exemple). Sur le croquis, nous dessinons en vert ce qui est réel : le repère, les points A et B.

En réalisant les opérations topographiques, l'opérateur se place au dessus du point matériel et réel A (une stalagmite par exemple). On suppose qu'un géomètre expert est passé avant nous et a pu déterminer les coordonnées réelles de ce point A (X_A et Y_A de la figure) mais il ne nous les a pas communiquées car on ne l'a pas encore payé.

En faisant notre topographie, nous sommes certes au dessus de A mais, comme on a topographié de proche en proche depuis une origine dont on croit connaître les coordonnées (GPS par exemple), on détermine notre propre position calculée (cf. glossaire) du point A. Si on suppose qu'on est dans le même repère que le géomètre expert, nous plaçons sur le plan un point A' à la position calculée. On dira dans le document que A' est l'image de A dans notre topographie ; c'est la même stalagmite que celle qu'a mesuré (levé) le géomètre expert. Comme ce géomètre est un expert, ses coordonnées servent de référence. Donc, au dessus de A nous avons déjà une erreur de positionnement par rapport aux coordonnées de l'expert. Dans le document on va appeler '**écart**' la distance entre A et A' .

- Si les coordonnées de A sont X_A et Y_A
- Si les coordonnées de A' sont $X_{A'}$ et $Y_{A'}$

Alors pour calculer l'écart E on utilise ce brave Pythagore :

$$E = \sqrt{(X_A - X_{A'})^2 + (Y_A - Y_{A'})^2}$$

On peut aussi utiliser A comme référence (c'est notre expert qu'il l'a fixé) et déterminer les coordonnées relatives de A' par rapport à A.

- $e_x = X_{A'} - X_A$
- $e_y = Y_{A'} - Y_A$

Ce couple de coordonnées relatives sera dénommé dans ce qui suit Ecart géométrique. On verra plus loin que la superposition dans un même graphique de ces écarts géométriques forme un nuage de points.

Poursuivons. On est donc physiquement au-dessus de la stalagmite, en A et non en A' , et on vise le point suivant B qui lui aussi est bien réel. Si on disposait d'un instrument parfait on mesurerait l'angle vert mais l'instrument fait une faute et on lit l'angle bleu. On va hélas calculer la position de P à partir de cet angle bleu et de la distance AB. Dans notre étude on supposera toujours que nous disposons de la distance sans erreur (mesure au lasermètre).

Si on disposait des coordonnées vraies du point A (celles calculées par le géomètre expert qu'on n'a toujours pas payé), on déterminerait par le calcul les coordonnées d'un point P qui serait l'image de B dans notre topographie. Mais hélas, si nous sommes bien physiquement en A, notre position calculée et mentionnée dans notre topographie est A' . De ce fait, on va réaliser, sans le savoir une translation des points A et P en A' et B' (plus précisément une translation de vecteur $\vec{AA'}$). Ainsi dans notre topo le point réel B va avoir pour image le point B', ce qui produit un nouvel écart. On constate, sur la figure, qu'il n'y a pas de relation directe évidente entre l'écart en A et l'écart en B. Et bien qu'il s'agisse d'un cumul d'erreurs, on observe même que l'écart résultant en B est plus petit que l'écart initial en A.

On va appliquer, de proche en proche, la même méthode et donc cumuler les erreurs. Les résultats de cette intervention seront détaillés au chapitre 4.5.

2.4.2. Introduction de l'erreur de mesure

Dans la figure précédente nous avons montré que la valeur du relèvement indiqué par l'instrument (angle bleu) est différente de la valeur vraie du relèvement (angle vert). Dans la figure suivante nous figurons l'angle 's' qui représente l'erreur commise par l'instrument lors de cette visée.

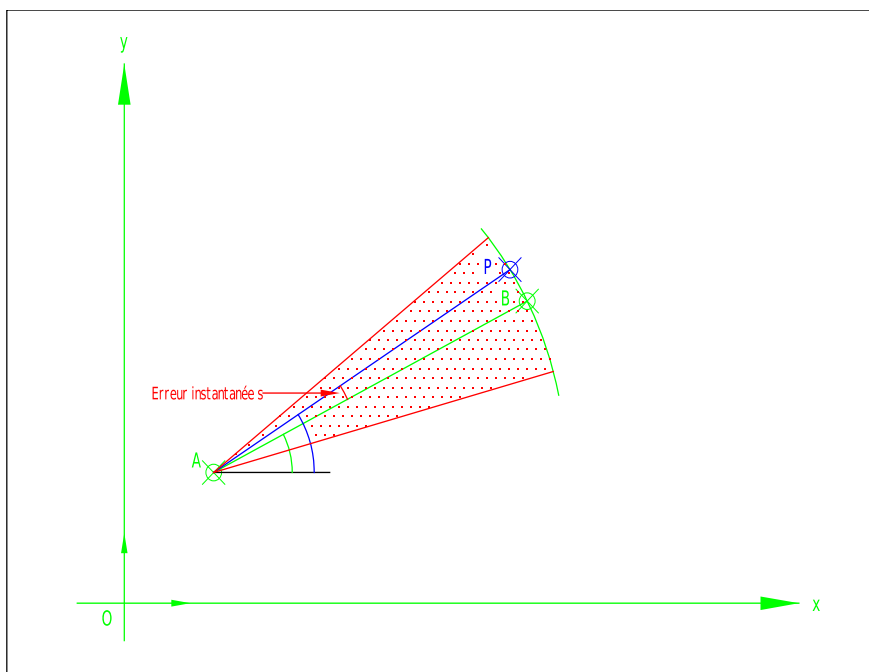


Figure 6 : Erreur instantanée et erreur maximale

Dans le cadre de la simulation numérique d'une multitude de visées on va faire en sorte que cet angle d'erreur 's' varie de façon aléatoire entre 2 visées successives. Nous convenons de plus que 's' ne peut pas prendre une valeur qui conduirait à faire sortir la visée bleue (AP) du secteur angulaire rouge zoné de petits points.

François avait décidé de réaliser nos simulations avec le tableur Excel. Nous allons donc disposer d'un ensemble de valeurs numériques, généralement dépendantes les unes des autres, au travers de formules (les formules du logiciel). Il faut maintenant que les erreurs ajoutées à chaque valeur exacte du relèvement (l'angle vert) soient aléatoires.

Faisons un petit tour dans Excel. Parmi les nombreuses formules disponibles il y a : **ALEA.ENTRE.BORNES(Min;Max)**. À chaque fois que cette formule est calculée par Excel elle renvoie un nombre aléatoire entre les valeurs Min et Max. Ce sera la source du phénomène aléatoire qu'on va utiliser durant toute cette étude. Cette fonction retourne un entier; nous allons nous servir partout de la formule suivante :

`ALEA.ENTRE.BORNES(-10000;10000)/10000`

Cette astuce permet à la formule de retourner un nombre décimal entre -1 et +1 avec une résolution de $1/10000^{\text{ème}}$. La valeur maximale de +1 ou -1 va être utile pour normaliser nos variations. Par exemple : si on ne veut pas que 's' sorte de l'intervalle $\pm 10^\circ$ alors nous écrivons que la valeur de l'erreur est :

$s = 10 * \text{ALEA.ENTRE.BORNES}(-10000;10000)/10000$

Au final, on va se trouver dans le classeur Excel avec une multitude de cellules contenant la formule ALEA.ENTRE.BORNES(-10000;10000)/10000. Chaque cellule prend une valeur différente des autres et il faut bien faire attention à utiliser une nouvelle cellule avec ladite formule pour produire à chaque fois une valeur aléatoire indépendante des précédentes.

En général un classeur Excel est paramétré pour recalculer toutes ses cellules dès qu'une seule est changée par l'opérateur. Si on ne touche plus à rien, Excel ne recalcule pas et laisse affichés les résultats. En appuyant sur la touche de fonction [F9] on force Excel à recalculer tout le classeur. Avec des formules classiques rien ne paraît changé et les mêmes résultats restent affichés.

Si on utilise une formule du genre ALEA.ENTRE.BORNES, à chaque nouveau calcul, cette fonction va retourner une nouvelle valeur (différente de la précédente) et l'ensemble du classeur va être recalculé avec toutes ces valeurs modifiées et celles qui en dépendent.

Cette fonction ALEA.ENTRE.BORNES, soit dans plusieurs cellules soit par recalcul de la feuille, produit des valeurs qui sont équiprobables dans l'intervalle Min Max. Ce qui signifie que n'importe quelle valeur de l'intervalle à la même chance qu'une autre d'être sélectionnée. On est dans le même cas de hasard que lors d'un jeté de dé ou d'un jeu de pile ou face. Nous ne sommes pas dans une distribution gaussienne où la probabilité diminue quand on s'écarte d'une valeur centrale.

Avec notre formule exemple :

$$s = 10 * \text{ALEA.ENTRE.BORNES}(-10000;10000)/10000$$

Exemple numérique :

Supposons une distance AB de 30 m, un angle vert G (relèvement trigonométrique) de 25° et un écart maxi de l'erreur 's' de $\pm 10^\circ$

Le point B a pour coordonnées :

$$x = AB * \cos(G) = 27,19 \text{ m}$$

$$y = AB * \sin(G) = 12,68 \text{ m}$$

En fonction des erreurs ajoutées, le point P va se déplacer sur l'arc de cercle de rayon AB limité par les deux segments rouges (voir Figure 4 : Erreur instantanée et erreur maximale). C'est ce que montre l'application numérique.

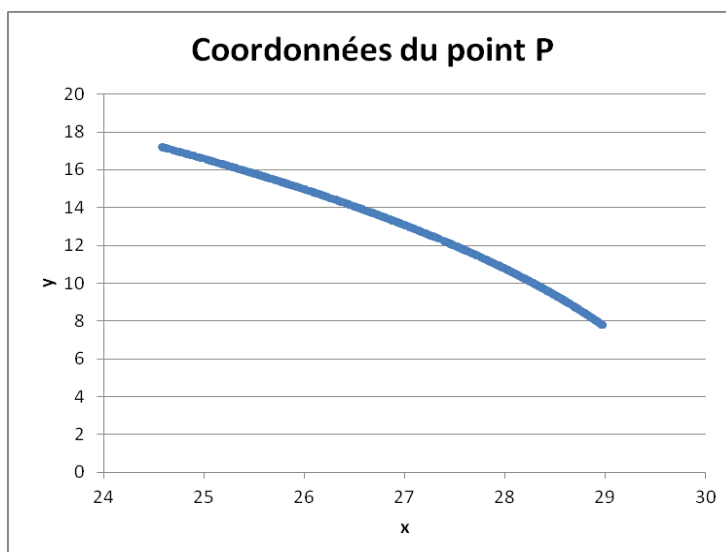


Figure 7 : D=30m G=25° Erreur $\pm 10^\circ$

2.4.3. Pièges à cons

ATTENTION : puisqu'on parle d'Excel, il faut noter que celui-ci calcule toujours en radians. Il existe des fonctions de conversion dans Excel, mais cet usage exclusif des radians dans les fonctions trigonométriques peut être redoutable si on n'y fait pas attention.

Une dernière pour la route. Les relèvements topographiques sont toujours comptés depuis un nord (dans notre cas le nord magnétique) et positivement dans le sens des aiguilles d'une montre. Dans toutes nos formules et croquis nous appellerons relèvement l'angle trigonométrique. Or celui-ci est compté depuis l'Est et positif dans le sens inverse des aiguilles d'une montre. Donc, si on devrait construire un outil topographique, il faudrait convertir incessamment le relèvement en angle trigo et vice-versa. On s'est dispensé ici de cette conversion car elle n'a, dans cette étude, aucune conséquence du fait qu'on n'utilise jamais la valeur particulière d'un relèvement.

2.4.4. Topographie aléatoire

Dans le paragraphe précédent nous nous sommes intéressés à une visée isolée; qu'en est-il au niveau d'une topographie entière qui est la juxtaposition, de proche en proche, de visées élémentaires. Quelle topographie choisir pour étudier la propagation des erreurs de proche en proche ? Nous aurions pu choisir la topo de la grotte Machin ou de la grotte Truc; c'est d'ailleurs ce que l'on a fait au début. Problème, on a toujours affaire à un cas particulier. Nous avons donc créé une topographie virtuelle :

- Toutes les visées font la même longueur et ce sera un de nos paramètres
- La somme des visées fait 1 km
- Les angles (le relèvement) des visées se succèdent de façon aléatoire

Par exemple avec des visées de 10 m il faudra 100 visées bout à bout pour arriver au kilomètre. Pour modéliser cette topographie artificielle nous allons à nouveau utiliser la fonction **ALEA.ENTRE.BORNES(Min;Max)** d'Excel. La direction de chaque visée (relèvement) en degrés d'angle devient alors : $r = 360 * \text{ALEA.ENTRE.BORNES}(-10000;10000)/10000$

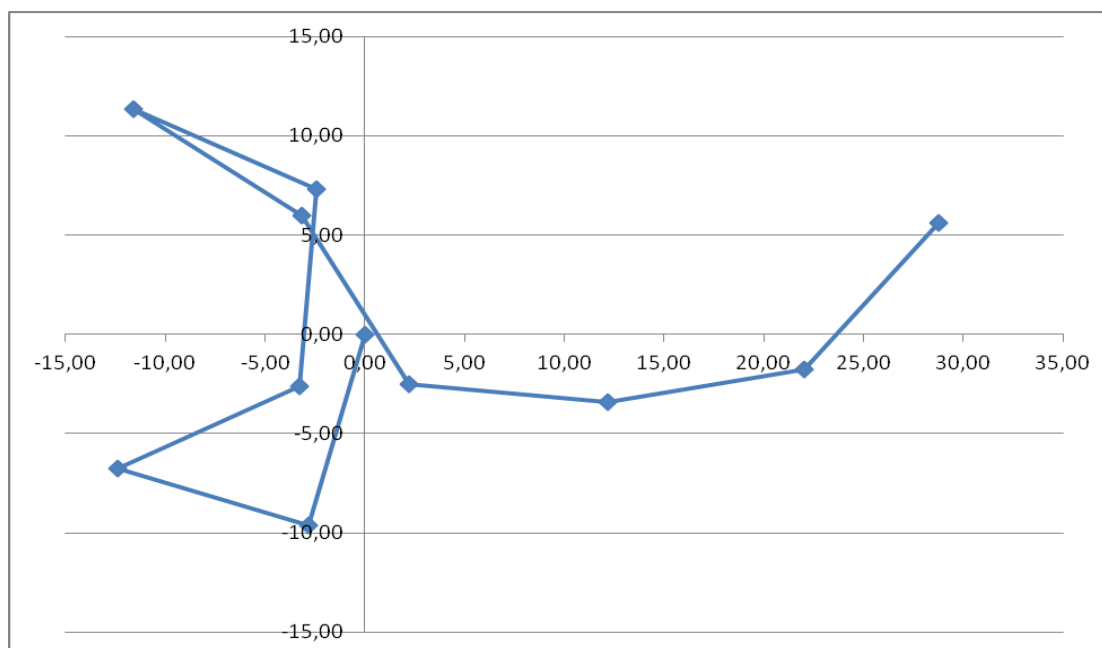


Figure 8 : Exemple de positionnement des 10 premiers points topo (visées de 10 m)

Dans la figure ci-dessus, on part de la position 0,0 et la cible de la 10^{ème} visée est à la position réelle $x=28.76$ $y=5.64$. On a alors parcouru 100 m et il resterait 90 visées à faire pour atteindre les 1000 m. L'intérêt c'est qu'on dispose alors de 100 points réels dont on connaît les coordonnées.

2.4.5. Effet de l'erreur de relèvement sur une topographie aléatoire

Chaque point réel est déterminé à partir du précédent par l'angle de visée et à la longueur de celle-ci. Rien n'est alors plus facile que d'ajouter à chaque angle de visée une erreur aléatoire afin de déterminer la position calculée.

Intéressons-nous à l'écart géométrique de chaque position calculée par rapport à la position réelle.

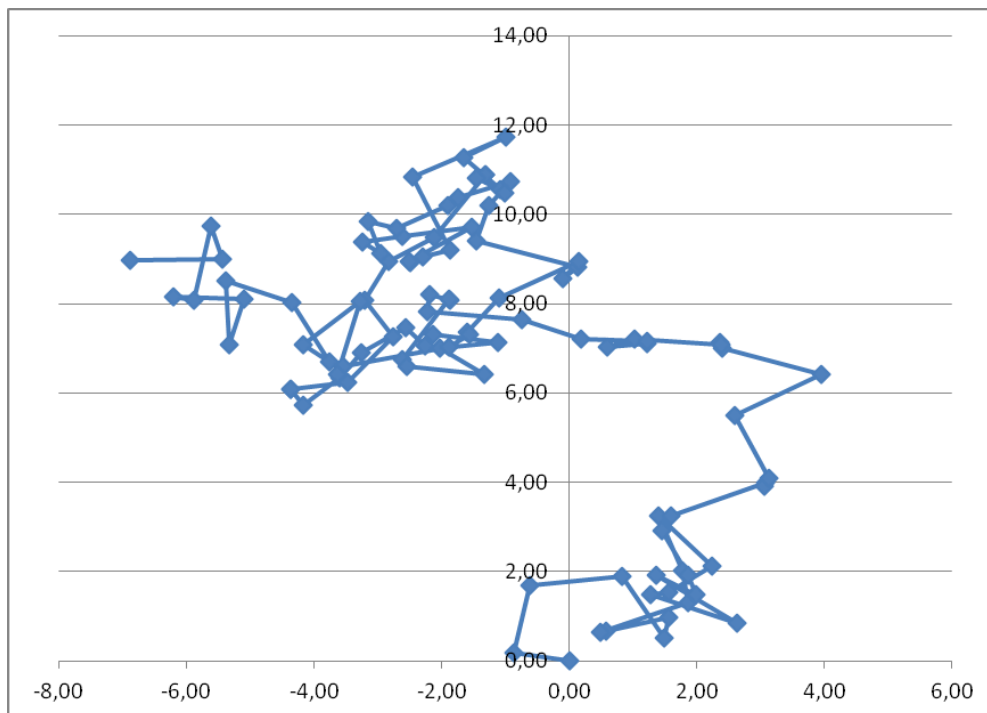


Figure 9 : Écart géométrique 100 visées de 10 m, erreur de relèvement maxi $\pm 10^\circ$

L'écart géométrique au début de la topo est nul (0,0) et il évolue comme le matérialisent les segments qui relient les points du graphique.

Le graphique ci-dessus est un cas particulier. Si nous recalculons la feuille (par [F9]) avec de nouvelles valeurs aléatoires, tant pour l'angle de visée que pour l'erreur ajoutée, nous obtenons alors un graphique totalement différent. Par exemple celui-ci :

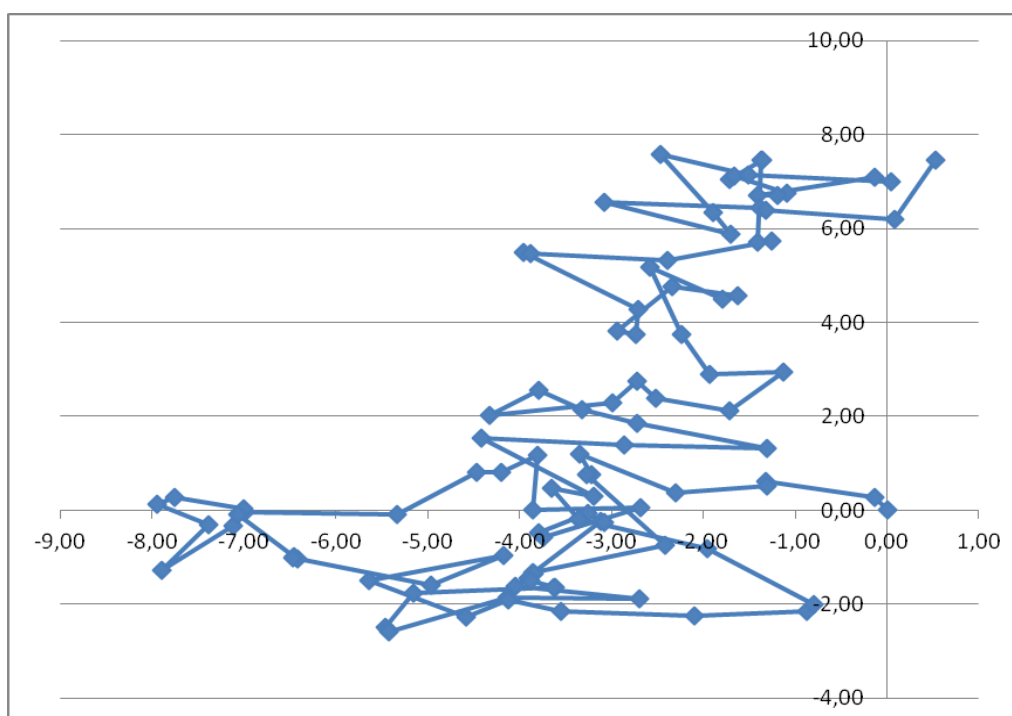


Figure 10 : Écart géométrique 100 visées de 10 m, erreur de relèvement maxi $\pm 10^\circ$

On peut s'intéresser à l'écart (la distance) entre position réelle et position calculée. Cet écart peut être régulièrement croissant tout au long de la topographie comme ci après :

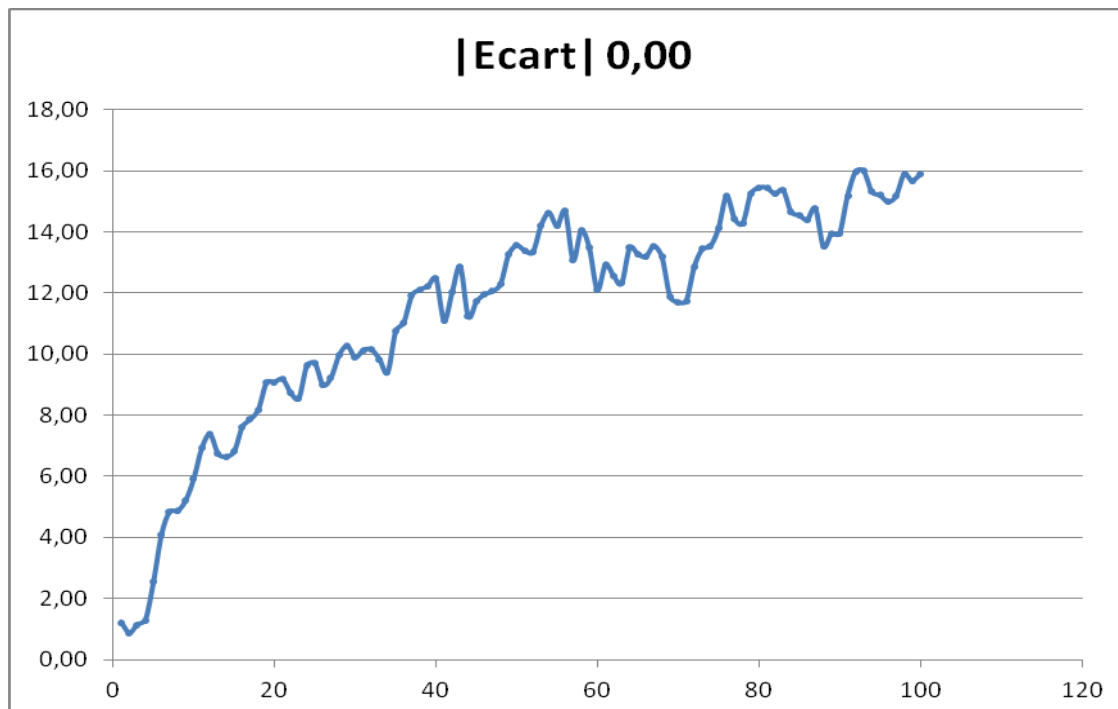


Figure 11 : Écart géométrique 100 visées de 10 m, erreur de relèvement maxi $\pm 10^\circ$

Mais parfois aussi, cet écart peut passer par un maximum en cours de topo et diminuer ensuite. C'est la forme de la topographie qui induit majoritairement ce phénomène.

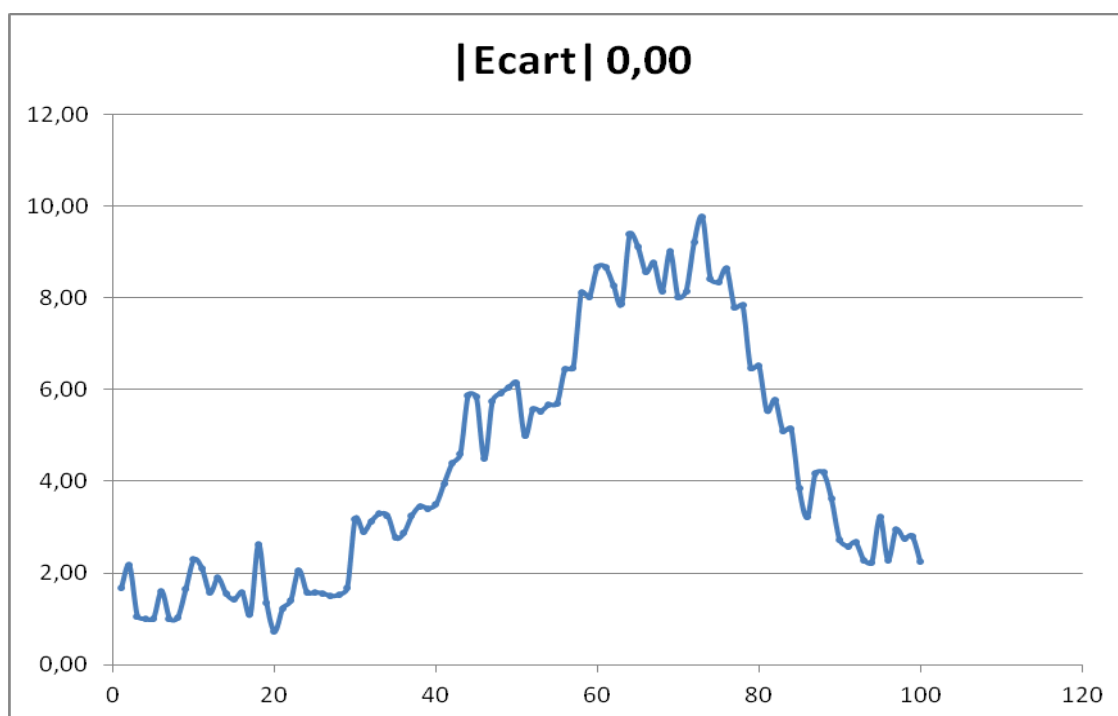


Figure 12 : Écart géométrique 100 visées de 10 m, erreur de relèvement maxi $\pm 10^\circ$

2.4.6. Effet de l'erreur de relèvement sur plusieurs topographies aléatoires

Bien que précédemment notre topographie soit aléatoire, elle est néanmoins particulière (singulière). Nous allons maintenant généraliser l'approche statistique en examinant le cas de 100 topographies de 1000 m constituées de 100 points topographiés chacune. Ce qui va nous faire désormais un total de 10 000 points.

L'écart géométrique montre un nuage de points qui peut ressembler à ceci :

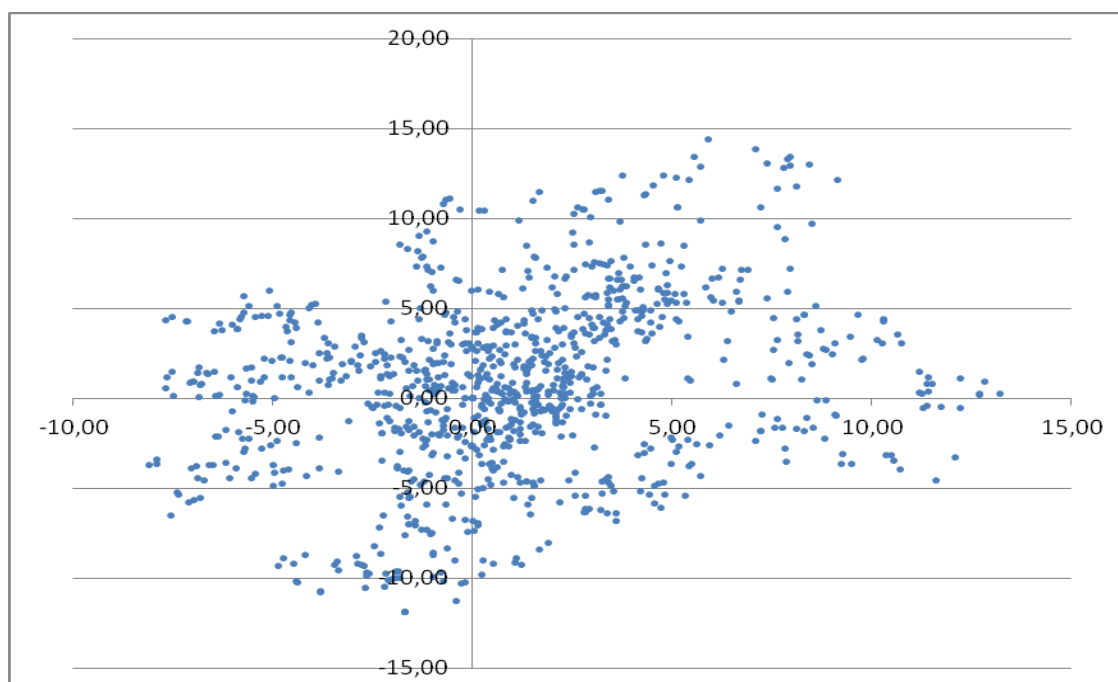


Figure 13 : Écart géométrique 10 000 visées de 10 m, erreur de relèvement maxi $\pm 10^\circ$

Mais il peut aussi ressembler à cela :

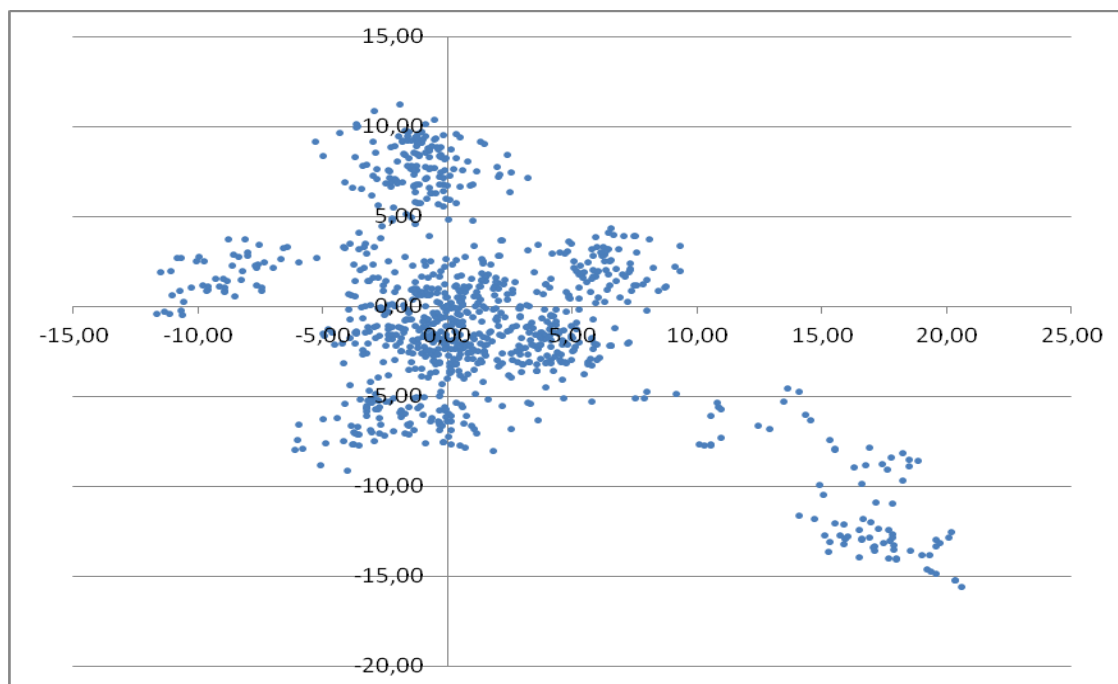


Figure 14 : Écart géométrique 10 000 visées de 10 m, erreur de relèvement maxi $\pm 10^\circ$

2.5. Un autre exemple d'erreur aléatoire : l'erreur de décentrement

Une deuxième erreur qui va être étudiée par la simulation est l'erreur de décentrement. De quoi s'agit-il ?

Imaginons qu'au cours d'un relevé, le topographe fasse une visée avec son appareil disposé sur un trépied d'un point A vers un point B. Ensuite il déplace son matériel et le pose en B (en réalité en B') pour viser un point C et ainsi de suite. B' n'est pas exactement au même endroit que B. Pour le spéléologue qui utilise un DistoX cette erreur est celle qui se produit à chaque fois que le DistoX n'est pas placé exactement sur le point qui a été frappé précédemment par le laser.

L'appellation « décentrement » provient d'une analogie avec ce qui suit. Du point A le topographe vise une cible en B. Il se déplace ensuite en C, tourne la cible B face à C et enfin vise de C vers B (visée inverse). Si le trépied de support est bon, la rotation se fait selon un axe où $B'=B$. Ensuite il déplace la cible en D face à C, tourne l'appareil et vise D. Si le trépied est parfait, alors $D'=D$; il n'y a pas d'erreur : à chaque rotation pour la visée inverse, les centres coïncident parfaitement. Dans le cas contraire, si le trépied a un léger défaut, cela induit une erreur de décentrement lors de cette rotation.

D'une manière plus générale on va simuler un déplacement du point A en A'. La simulation impose que la longueur AA' soit aléatoirement fixée entre 0 et R maxi. L'angle θ est lui aussi aléatoirement fixé entre 0 et 360° . Le point A' est donc dans le disque zoné en pointillé. De ce point A' on reprend la visée théorique (distance et relèvement). Ce décentrement fait que l'image de B apparaît en B'.

Les conséquences concrètes de l'introduction de ce type d'erreur seront détaillées au chapitre 4.6.

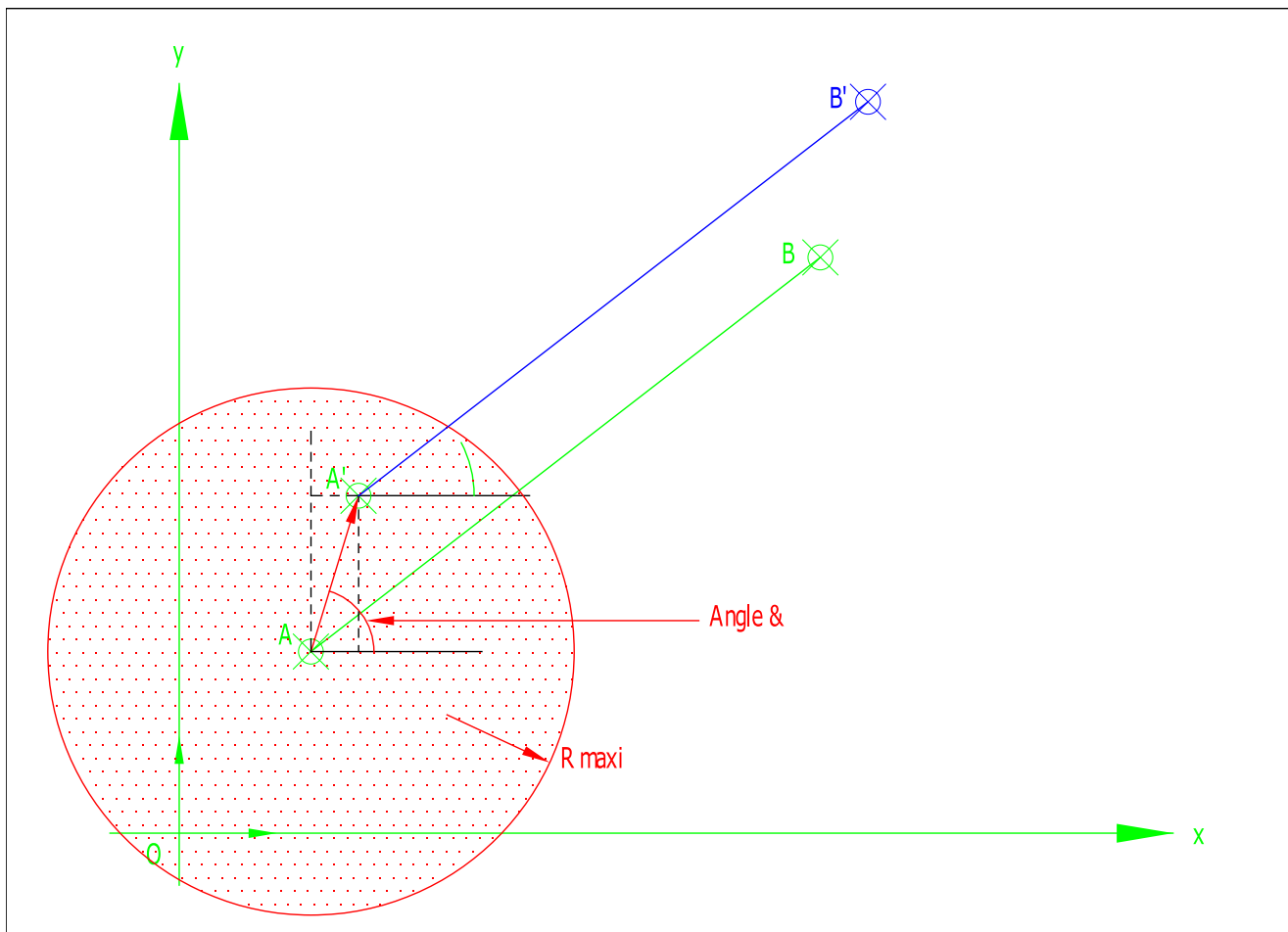


Figure 15 : Effet de l'erreur de décentrement, B et B' ne se superposent pas.

3. Élargissement de la recherche à la propagation des erreurs

3.1. Multiplication du nombre de visées

Au cours de nos réflexions, une autre hypothèse (certes farfelue) fut que, les variations de l'erreur de positionnement se reproduisaient peut-être à l'identique sur plusieurs échelles différentes. En bref que cela pouvait être fractal. Cette hypothèse aurait été élégante et très esthétique, mais cette idée était erronée comme nous l'avons pu constater en multipliant énormément le nombre de visées théoriques, donc de points topos.

On aurait pu s'en douter puisque nous ne traitons encore ici que d'erreurs aléatoires.

Les trois illustrations suivantes montrent quelques exemples de variations croissantes et irrégulières pour de longues séries de mesures (de 500 à 10 000 visées) toujours entachées d'une faute (bruit de mesure de 2°). La ligne rouge est la droite de tendance (option des graphiques Excel) qui donne une idée de l'évolution globale de l'erreur sur l'ensemble des visées.



Figure 16 : Propagation de l'erreur de positionnement pour 500 visées

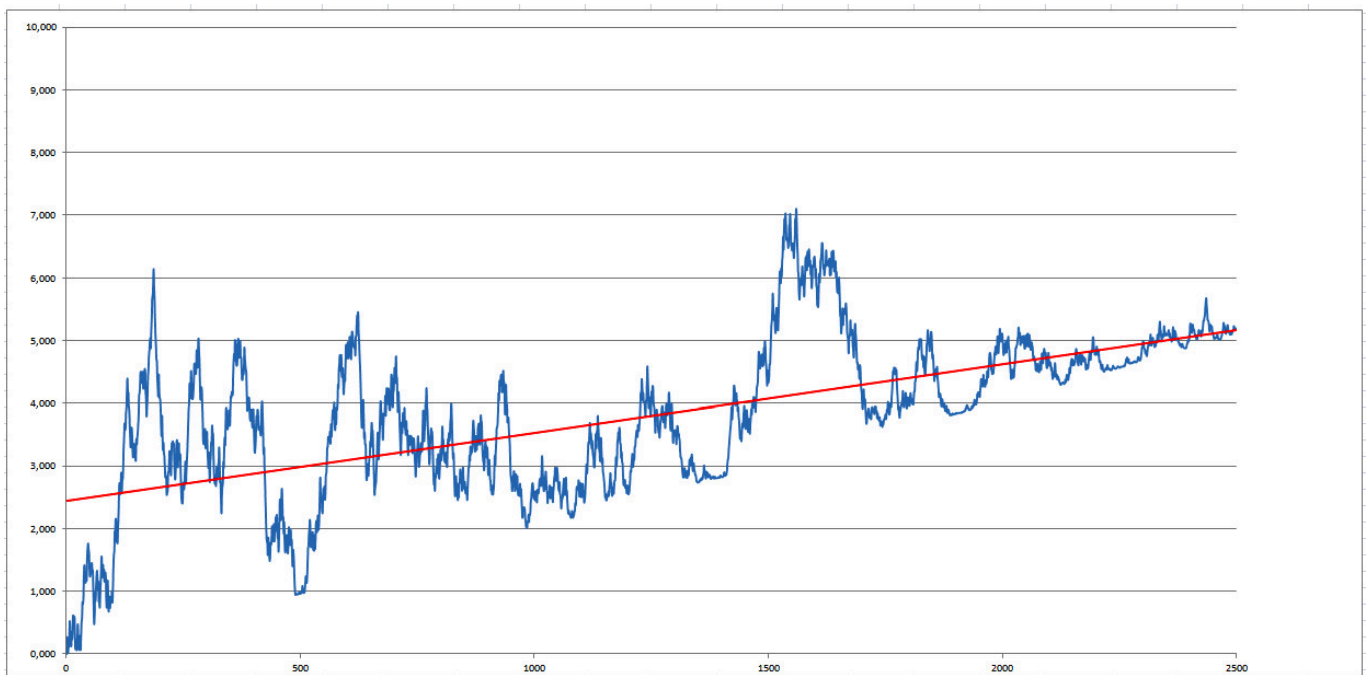


Figure 17 : Propagation de l'erreur de positionnement pour 2500 visées



Figure 18 : Propagation de l'erreur de positionnement pour 10 000 visées

3.2. Concaténer plusieurs essais avec F9

Afin de mieux visualiser les effets de plusieurs variations aléatoires différentes et de les comparer, nous avons dans un premier temps cumulé sur un même graphique les résultats de 5 mises à jour des données.

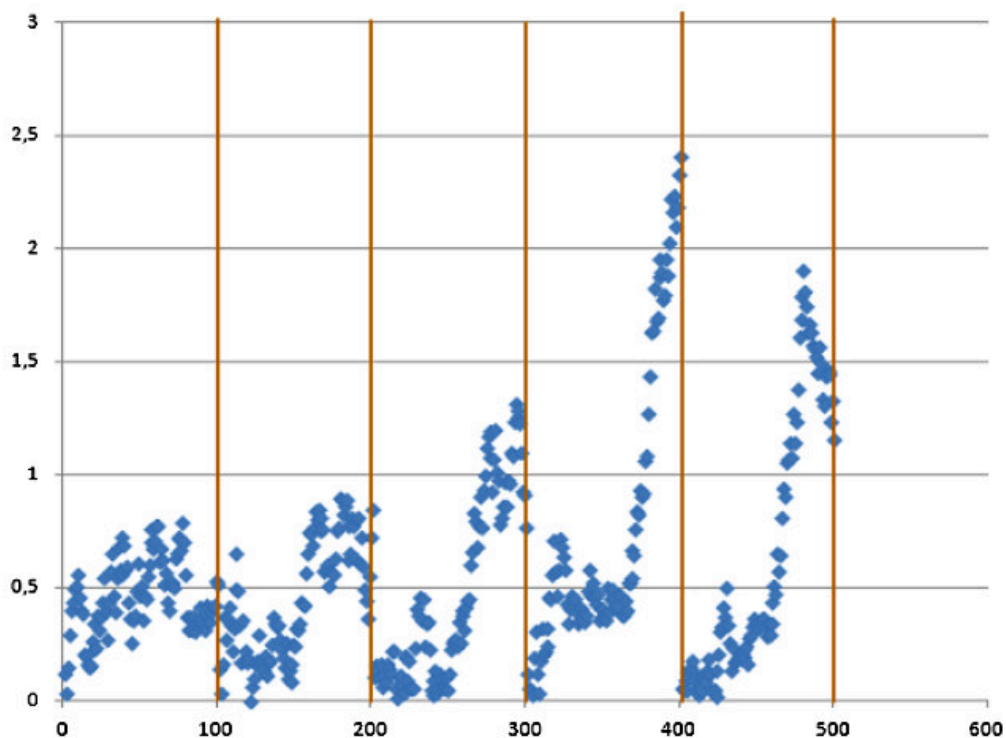


Figure 19 : 5 tranches de 100 visées

Il faut donc comprendre ce graphique comme 5 tranches successives, juxtaposées pour faciliter la lecture :

- ✓ Points compris entre 0 et 100
- ✓ Points compris entre 101 et 200
- ✓ Points compris entre 201 et 300 etc.

Après chaque tranche on repart à zéro pour la suivante, c'est ce qui cause la forme pseudo périodique du graphique. On voit bien ici que dans certains cas, comme la tranche $x=301 - x=400$, la suite défavorable d'erreurs de mesure fait qu'on diverge énormément pour atteindre un écart (en module) de 2,5 m. Dans d'autres tranches, comme la première, la distribution des erreurs fait qu'elles se compensent relativement (tout au moins au début), pour qu'au bout de 100 mesures on n'ait pas trop divergé.

Évidemment quand on fait une topographie réelle, on ne sait pas dans quel type de « tranche » on se situe. La seule chose que l'on peut évoquer c'est le **risque statistique d'erreur**. On ne peut donc parler que de la probabilité de tomber sur un cas défavorable comme la tranche 301-400 ou sur un cas qui le sera moins comme la tranche 0-100. Mais en spéléologie cela n'a pas beaucoup d'intérêt car en général on ne va pas faire et refaire la topographie un très grand nombre de fois. Il est en effet bien plus simple d'appuyer sur F9 que de se traîner pendant des heures sous terre avec un Disto et un PDA ou une tablette !

Bien entendu, sur un graphique du type (x, y) cette succession de tranches n'apparaîtra pas. L'ensemble des points représentant une multitude de moyennes ou d'écart-types, masque les valeurs élémentaires de chaque mesure. On va donc orienter nos observations sur des statistiques et se préoccuper désormais du risque d'erreur (amplitude et fréquence) : c'est beaucoup plus parlant pour avoir une idée globale de la « qualité » de la topographie que l'on pourrait obtenir.

3.3. Ajout d'autres paramètres

Afin d'améliorer encore la simulation pour qu'elle colle toujours plus à la réalité d'une topographie, ainsi que dans le but d'en faciliter l'interprétation, d'autres paramètres et modifications vont être apportés. Tout cela sera détaillé dans la partie 4. qui va suivre.

4. Première simulation numérique aboutie

4.1. Objet de la simulation

Le principe même d'une topographie c'est de mesurer un espace dont on ne connaît pas les dimensions exactes. En surface on peut éventuellement mesurer des parties de territoire qui ont déjà été mesurées par d'autres (IGN par exemple) et refaire des mesures entre des points particuliers de ce territoire. Procéder ainsi prend énormément de temps mais permet d'évaluer la maîtrise topographique de l'opérateur par un contrôle entre quelques points; néanmoins, ça ne permet pas de connaître les causes d'un résultat décevant.

Nous allons donc prendre le problème à l'envers, à partir de simulations numériques. Nous obtiendrons ainsi des résultats théoriques de quelques types de fautes identifiées, en étudiant la propagation de ces fautes.

Important :

Dans cet article, on ne s'intéresse qu'à la projection plane; c'est à dire que les dénivelés ne sont pas pris en compte. De plus, dans cette simulation, la longueur (plane) V de la visée est réputée toujours exacte et

ne sera pas entachée d'erreur simulée. Nous avons retenu ce principe simplificateur car les mesures de distance peuvent maintenant être effectuées avec un lasermètre dont la précision des mesures de longueur est beaucoup plus grande que celle fournie par nos instruments d'évaluation des angles⁷. On suppose donc toujours dans la simulation que la longueur mesurée est égale à la longueur théorique vraie V et dans chaque feuille de calcul cette longueur de visée est constante.

4.2. Présentation générale

4.2.1. Principes

On va utiliser une simulation théorique utilisant des feuilles de calcul Excel qu'on trouvera jointes⁸. Après plusieurs tâtonnements qui ne seront pas relatés ici, les principes suivants ont été retenus :

- longueur des visées constante pour une même feuille (10, 50, 100 m),
- au moins 10 000 visées simulées afin d'explorer une grande partie des cas possibles,
- une normalisation de la distance totale topographiée constante de 1000 m pour chaque topo. Il s'en suit qu'il y aura donc :
 - 1000 topos pour des visées de 100 m ($[1000/100] \times 100 = 10$ km)
 - 500 topos pour des visées de 50 m ($[1000/50] \times 50 = 10$ km)
 - 100 topos pour des visées de 10 m ($[1000/10] \times 10 = 10$ km)
- des visées en directions aléatoires produisant un cheminement en zigzag. Le relèvement (gisement) de la visée suivante est un angle de valeur aléatoire entre 0 et 360°. Pour simplifier la simulation, il s'agit en fait de l'angle trigonométrique c'est-à-dire de l'angle, compté positif dans le sens inverse de rotation des aiguilles d'une montre entre la direction de l'EST et l'axe de la visée.

Sur l'espace (théorique) en deux dimensions on peut donc calculer les coordonnées x, y de chaque point définies grâce au point d'origine de coordonnées 0, 0 et aux mesures prédéterminées par calcul. Pour cela, on part d'un point origine $x=0$ $y=0$ et on calcule de proche en proche la position des points à partir de la distance (constante) et de l'angle de relèvement (simulé et aléatoire).

La simulation se fait par l'ajout des perturbations présentées au début de cet article. Petit rappel :

- **Aléatoires :**
 - Erreur sur le relèvement
 - Décentrement
- **Statiques (systématiques)** par la non prise en compte de la courbe d'étalonnage de l'instrument :
 - Distorsion de la courbe « valeur mesurée / valeur lue » (voir exemple concret de non linéarité au 4.7)
 - Décalage du 0° (voir exemple concret au 4.8)

⁷ Leica garantit par exemple la précision de ses lasermètres. Pour le modèle qui nous intéresse en spéléologie (DistoX310) la documentation du fabricant indique : « Précision $\pm 1,6$ mm, portée maximale 120 mètres »

⁸ Pour télécharger les différents fichiers tableur utilisés dans cet article, aller sur :
http://souterweb.free.fr/boitaoutils/topographie/annexes/Fichiers_a_telecharger.zip

On trouvera ci-après quelques exemples de topographies aléatoires construites par Excel. Il faut bien garder en mémoire qu'ils intègrent les données de 1000 topographies ce qui donne donc des résultats statistiques à interpréter comme un risque d'erreur.

On identifie l'écart maximum (14,1 m par exemple), mais parmi les 1000 topographies cet écart ne se produit qu'une seule fois. Voilà pourquoi on calculera la moyenne quadratique des écarts qui ici n'est que de 4,05 m. Pour éviter d'être trompé par une distribution spéciale des valeurs, on recherche :

- le nombre de valeurs au-dessus de la moyenne quadratique qui est de l'ordre de 32 à 34 %
- le nombre de valeurs au-dessus de 3 fois la moyenne quadratique qui est de l'ordre de 3 à 4 %

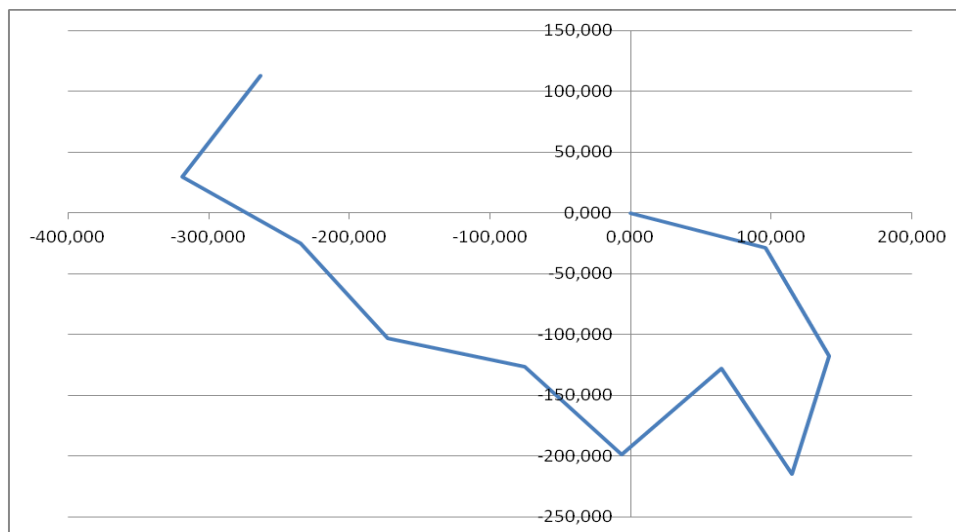


Figure 20 : Exemple d'une topographie aléatoire de 10 mesures de 100 m

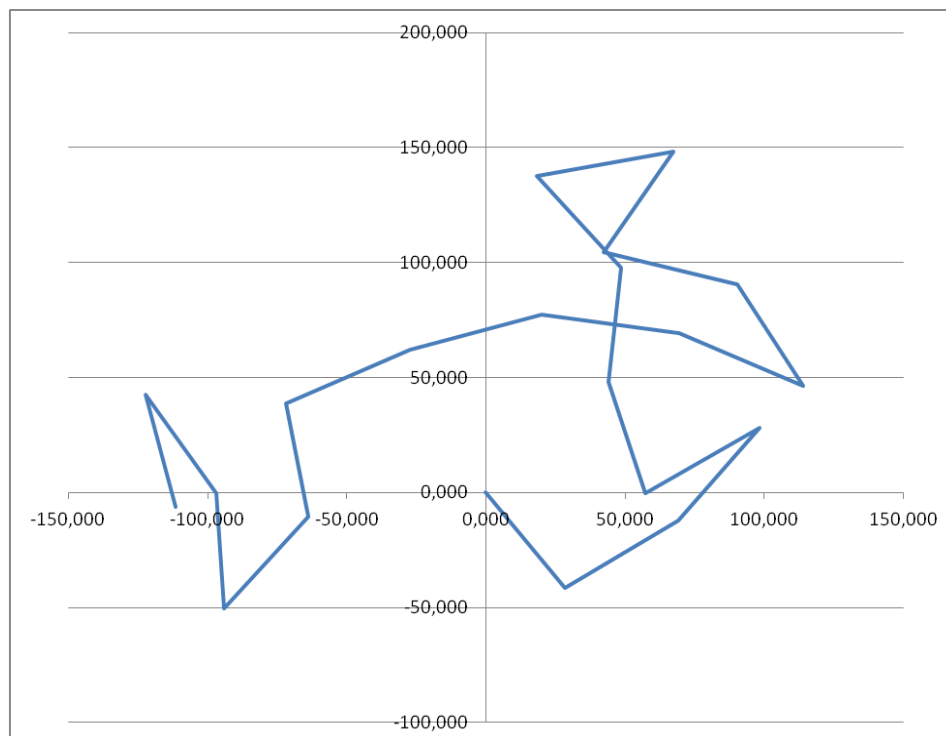


Figure 21 : Exemple d'une topographie aléatoire de 20 mesures de 50 m

4.2.2. Valeur aléatoire

Comme nous l'avons déjà indiqué au 2.4.2 le logiciel Excel dispose d'une fonction **ALEA.ENTRE.BORNES** (<borne inférieure>; <borne supérieure>).

Dans la feuille nous n'utiliserons la valeur prise par cette formule qu'une seule fois pour éviter une sorte d'auto-corrélation entre les différentes valeurs que nous voulons aléatoires entre elles.

Concrètement, dans la simulation, pour une même mesure nous avons besoin de quatre valeurs aléatoires indépendantes. C'est la raison de la présence de quatre colonnes (X, Y, Z, AA) titrées « Aléatoire [-1, +1] »

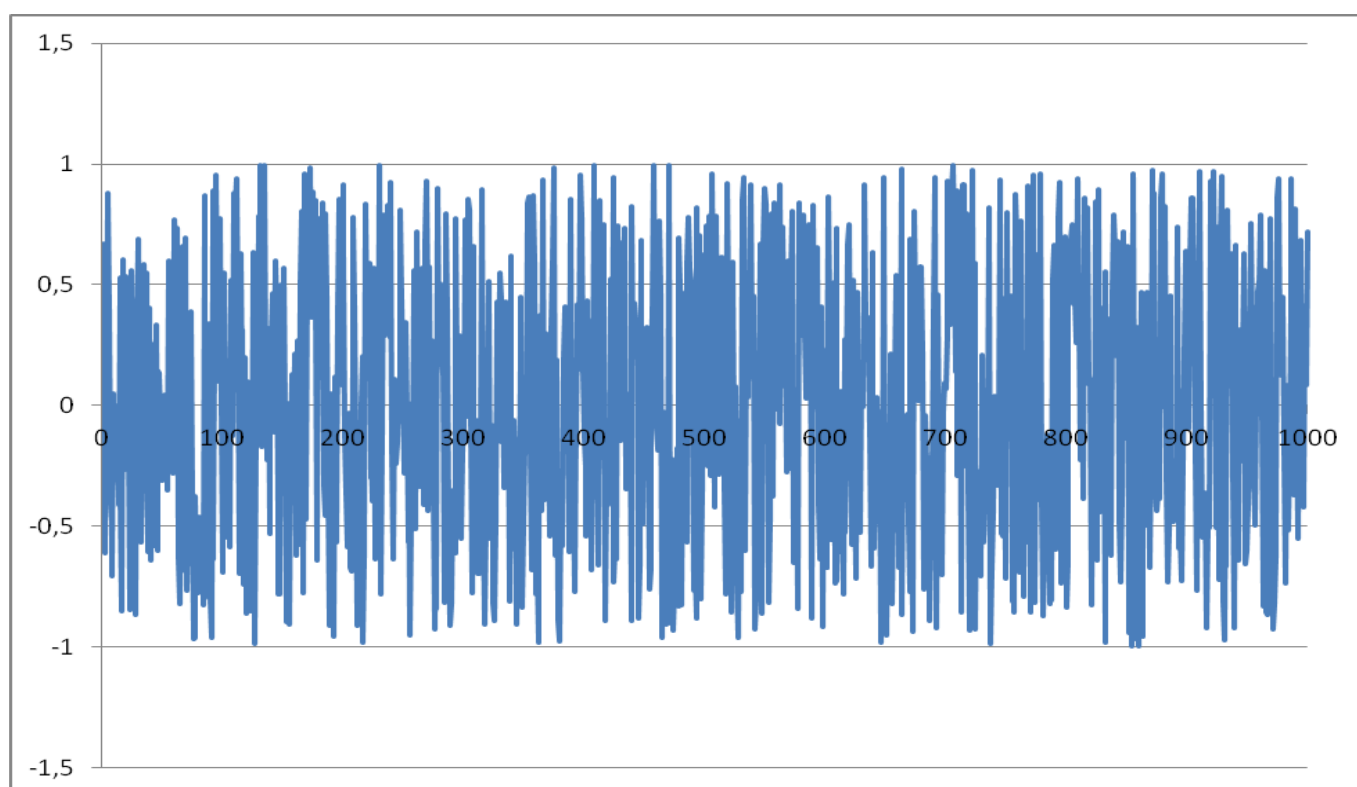


Figure 22 : Exemple des 1000 premières valeurs prises par la série aléatoire

Comme le montre la figure précédente, on obtient alors un effet qui s'apparente à ce que l'on obtiendrait avec du bruit⁹ ajouté à une mesure.

⁹ Une série de mesures permet d'enregistrer des données, relatives à un phénomène physique, qui idéalement correspondraient exactement aux valeurs réelles. Mais en pratique, au cours de la mesure, on observe l'apparition de signaux parasites qui viennent se superposer au signal dit « utile ». Ce sont ces signaux gênants que l'on appelle un « bruit » de mesure.

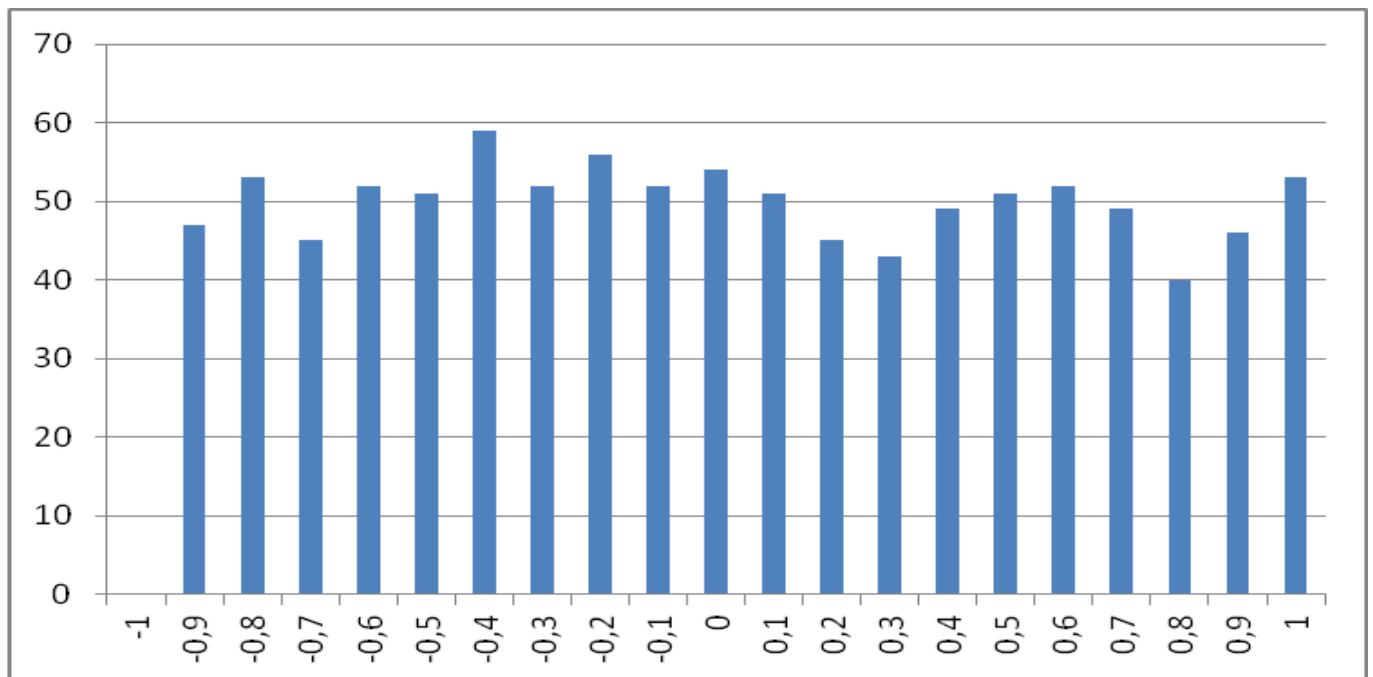


Figure 23 : Distribution de 1000 valeur de [-1, +1] par pas de 0,1

Si on réalise deux suites de 1000 valeurs et qu'on utilise ces valeurs comme couples de coordonnées dans un diagramme x, y , on obtient le nuage de points suivant. On notera que ces points sont régulièrement dispersés dans un carré de 2 unités de côté.

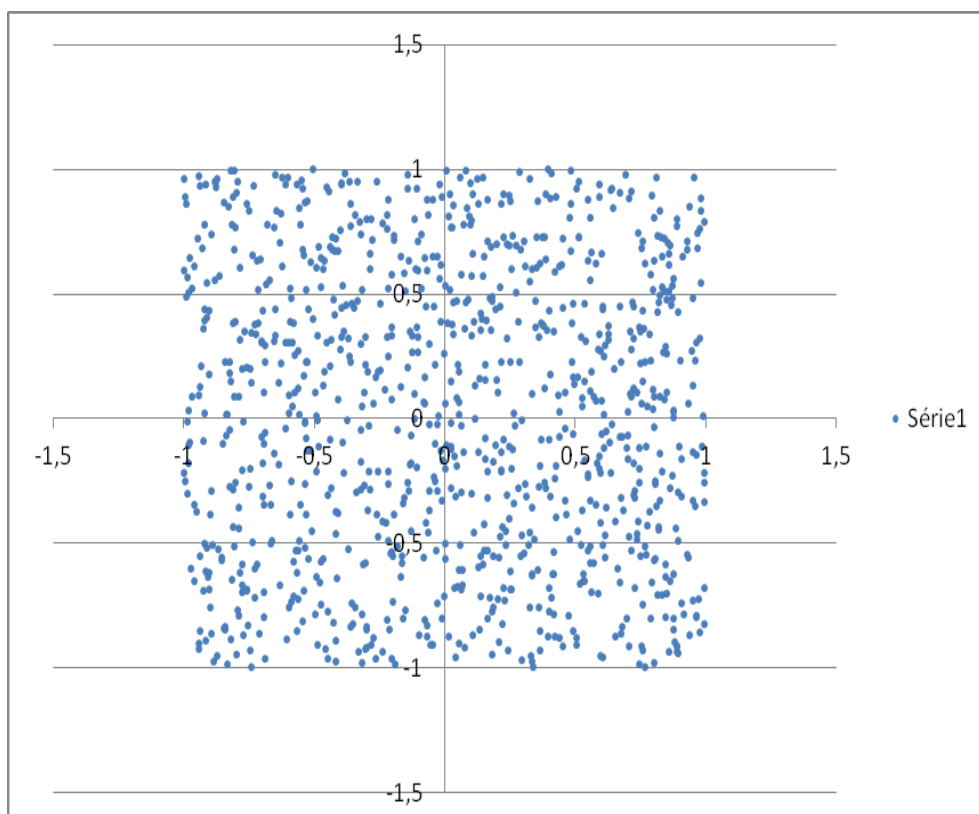


Figure 24 : Nuage sur la base de coordonnées x,y aléatoires

On calcule la distance qui sépare chaque point du centre (0,0) en appliquant le théorème de Pythagore. Ensuite on calcule la valeur de la moyenne quadratique. Pour cela on élève la distance au carré, on fait la somme de tous ces carrés et on divise par le nombre de points.

Si on représente la distance et la valeur quadratique moyenne, on peut tracer le graphique suivant où la valeur quadratique moyenne est en rouge (0,817). À noter que 99 distances sur les 1000 sont supérieures à la moyenne quadratique.

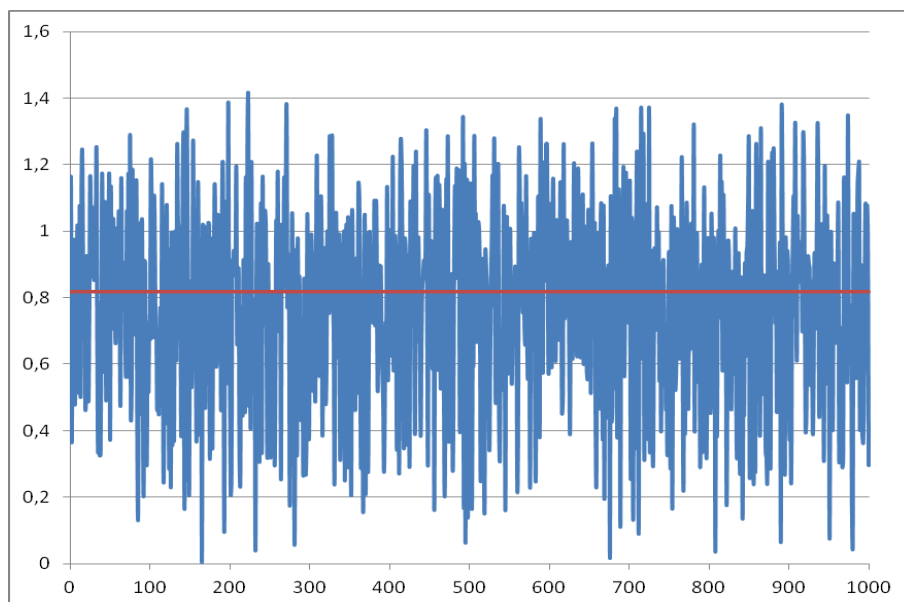


Figure 25 : Distance des points du nuage par rapport à 0,0 (numéro du point en abscisse)

En recalculant la feuille Excel, on obtient deux nouvelles séries de points. On observe qu'on atteint rarement une distance nulle (ou très faible) et que la moyenne quadratique varie peu.

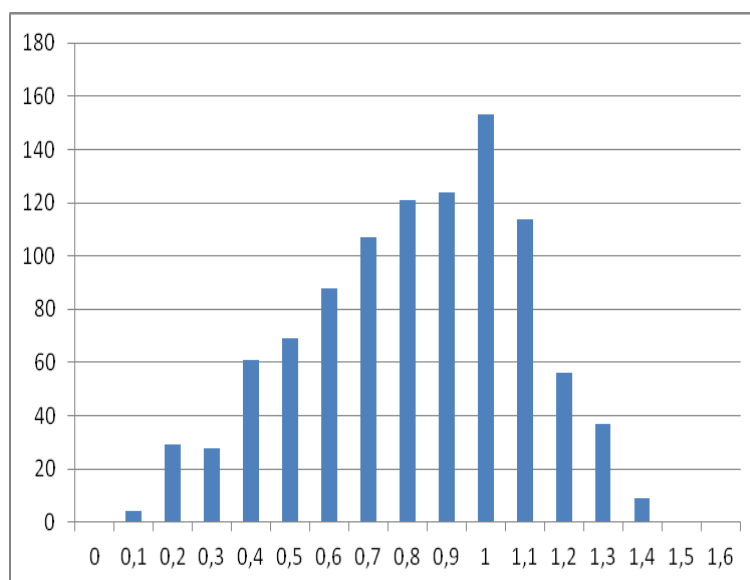


Figure 26 : Distribution des distances à 0,0 (pas d'analyse 0,1)

Une chose est néanmoins curieuse. Si on **trie les valeurs** d'une série de distances produites et qu'on les reporte en ordonnée dans le graphique ci dessous, on n'obtient pas une droite. La courbe montre que les valeurs sont moins denses aux extrémités (il n'y a pas de doublons).

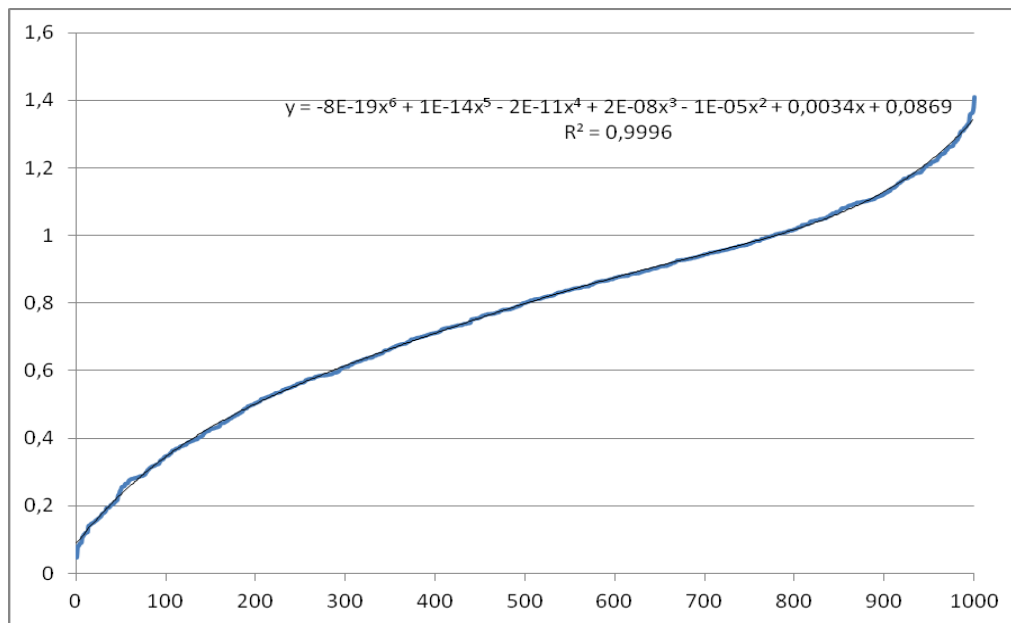


Figure 27 : Répartition des distances

NB : L'affichage d'un graphique du module de l'écart n'est pas très parlant en lui-même. Pour le rendre plus évocateur on pourrait décider de calculer trois moyennes différentes portant sur l'ensemble des points :

- moyenne algébrique¹⁰,
- moyenne quadratique¹¹,
- moyenne harmonique¹².

Parmi ces trois, la moyenne quadratique paraît être la plus intéressante. En effet elle permet d'afficher une sorte de « coefficient de défaut » que nous pourrions utiliser pour comparer les effets des différentes perturbations.

4.3. Explication détaillée du fichier Excel

Pour cette explication on se concentrera uniquement pour l'instant sur les lignes 1 à 14 des fichiers suivants :

¹⁰ Moyenne arithmétique : c'est la moyenne « classique » apprise à l'école élémentaire. C'est-à-dire, la somme des termes (valeurs à moyenner) divisée par le nombre de termes. La moyenne des notes d'un trimestre en est un exemple classique.

¹¹ Moyenne quadratique : c'est la racine carrée de la somme des carrés des différents termes divisée par le nombre de termes ; donc c'est une sorte de moyenne arithmétique des carrés. La moyenne quadratique est souvent utilisée en statistiques ; elle permet aussi par exemple de faire la moyenne de nombres négatifs et positifs.

¹² Moyenne harmonique : c'est l'inverse de la moyenne arithmétique de l'inverse des termes. La moyenne harmonique permet de calculer des moyennes sur des fractions dont le dénominateur change. Par exemple, si pour la moitié de la **distance** d'un trajet vous roulez à 40 km/h, et que pour l'autre moitié vous roulez à 60 km/h, votre vitesse moyenne est alors de 48 km/h (moyenne harmonique) et pas de 50 km/h (vous pouvez facilement le vérifier) !!! Mais attention, si vous aviez voyagé la moitié du **temps** à 40 km/h et l'autre moitié du temps à 60 km/h, alors là votre vitesse moyenne aurait bien été de 50 km/h (moyenne arithmétique).

« Propagation_erreurs_Visées_100m_07.04.xls »

« Propagation_erreurs_Visées_100m_08.00.xls »

« Propagation_erreurs_Visées_100m_09.00.xls »

On fait donc comme si toutes les lignes au-dessous de la ligne 14 du premier onglet (Calcul) étaient vides.

Le bloc de ligne de base commence en ligne 4 et se poursuit vers le bas, d'un certain nombre de lignes, fonction de la longueur de la visée. Les lignes suivantes (vers le bas) vont constituer une topographie d'une longueur de 1000 m. Par exemple, si la longueur des visées est de 100 m, il y aura; en tout 11 lignes (de 4 à 14). Chaque visée est numérotée dans la colonne A (N°). En fait chaque ligne est à associer à un point de station et la dernière ligne est la cible terminale. La première ligne (4) ne porte pas de numéro de visée car elle fixe le point de départ de la topographie aux coordonnées 0,0 Ces coordonnées sont fixées en B4 et C4 (il n'y a pas de formule dans ces cellules).

Le principe de la simulation est de déterminer un parcours théorique, de proche en proche, constitué de points dits « exacts », y compris le point origine. Les coordonnées exactes de chacun de ces points sont déterminées par :

- une distance fixe égale à ce qui est appelé (improprement) longueur de visée. Cette distance est constante pour chaque classeur (100 m par exemple),
- un azimuth qui est fixé aléatoirement entre $[0, 360]$ °. On ne reviendra pas sur le moyen utilisé pour produire la valeur aléatoire de cet azimuth (voir au point 4.2.2),

Les coordonnées exactes des points sont dans les colonnes B et C. Dans notre exemple toujours (visées de 100m), les coordonnées de la cible terminale sont en B14 C14.

On détermine parallèlement un parcours réel reposant sur des mesures effectuées depuis chaque station. Le principe de la simulation repose sur les principes qui suivent.

- La distance mesurée est égale à la constante "longueur de la visée" (100 m dans notre exemple). Pour le moment cette longueur est fixe.
- Un angle de relèvement (colonne J) qui est égal à l'angle théorique exact (colonne H) modifié par l'adjonction, en plus ou en moins, d'un petit angle (colonne I) qui a été appelé « Bruit ». La valeur de ce petit angle est aléatoirement déterminée entre deux bornes (exemple Bruit $\pm 0,5^\circ$).

Il est donc ainsi possible de calculer la topographie, c'est-à-dire les coordonnées des points résultant des mesures. Ces coordonnées apparaissent en colonnes R (Position X) et S (Position Y). En fait la feuille permet d'ajouter d'autres types d'erreurs de topographie, mais si on laisse ces autres paramètres à zéro, alors ils n'auront pas d'influence sur la topographie mesurée.

Pour chaque point de station, sauf le premier et en ajoutant la cible terminale, on calcule l'écart entre la position exacte et la position mesurée, en « écart X » colonne U et en « écart Y » colonne T. On peut alors tracer un graphique avec ces deux valeurs U et T. Ce graphe apparaît comme un nuage de points centré sur 0,0. Si on fixe l'amplitude du Bruit à 0° alors tous les points du nuage se concentrent en 0,0. Si on observe ce nuage de point et qu'on appuie sur la touche F9 (forçant ainsi le recalcul du classeur), on voit que le nuage change de forme tout en restant dans des limites qui semblent fixe. En fait, F9 produit à chaque pression un nouveau jeu de valeurs aléatoires qui modifie :

- la position des point exacts car cela modifie le relèvement nominal,
- la position des points mesurés car cela modifie aussi le petit angle ajouté ou retranché (Bruit).

Rappelons que nous sommes pour l'instant dans le cas d'une seule topographie, c'est-à-dire qu'il n'y a rien dans les lignes de l'onglet Calcul au delà de la ligne de la cible (ligne 14 dans l'exemple). Si on voulait visualiser les conséquences de plusieurs F9, il faudrait photographier les différents nuages obtenus et superposer, sur une même image, tous ces nuages. Evidemment ça serait fastidieux.

La feuille a donc été complétée de façon à calculer plusieurs topographies indépendantes les unes des autres, sauf la longueur nominale de la visée (100 m dans l'exemple). La deuxième topographie réelle couvre les lignes 15 à 25. Pour chaque topographie, on repart à 0,0. Arbitrairement, le nombre de visées a été fixée à 10 000 ce qui produit donc 10 000 écarts et donc 10 000 points dans le nuage global des valeurs des colonnes T et U. On notera, au passage, que le point origine 0,0 ne produit pas de valeur dans ces colonnes T et U. Dans notre exemple, il a donc fallu construire dans la feuille $10\ 000 / 10 = 1000$ topographies comprenant chacune 10 visées.

Avec ces 10 000 visées on observe une quasi constance dans l'image du nuage quand on fait F9 qui produit un nouveau jeu de données aléatoire pour les 10 000 visées étudiées.

Un nuage de points c'est esthétique, mais ce n'est pas très rigoureux pour qualifier une valeur qu'on souhaitera par la suite comparer à d'autres conditions de topographie (une autre longueur de visée par exemple). On calcule donc pour chaque point (grâce au théorème de Pythagore) la distance entre le point calculé et le point exact. La valeur apparaît en colonne V (Module). Elle est forcément toujours positive. On aurait pu faire la moyenne arithmétique de ces 10 000 valeurs mais le choix s'est porté sur une moyenne quadratique (voir point 4.2.2 et note 11). On calcule donc en colonne W (Quadratique) le carré de la distance. On fait la somme des 10 000 carrés, on divise par 10 000 et on prend la racine du résultat. Ce résultat désigné EQM (Ecart Quadratique Moyen) apparaît en cellule AM43. On observe qu'en faisant des F9 qu'il ne varie pas beaucoup. Cette valeur unique permet donc des comparaisons.

L'EQM est une moyenne mais ne qualifie nullement la distribution des valeurs qui ont servi à calculer ladite moyenne.

- Dans la colonne AD on détermine si la valeur de l'écart dépasse ou pas la valeur moyenne (si oui $\Rightarrow 1$, si non $\Rightarrow 0$). Si on somme le nombre de 1 qu'il ya dans la colonne AD, on obtient alors le nombre de valeurs de l'écart supérieures à l'EQM.
- Dans la colonne AE, on fait la même chose mais cette fois pour un dépassement de 2 fois la valeur de l'EQM.

Le décompte de colonne AD et AE n'est pas affiché directement, mais exprimé en pourcentage du nombre de visées. Ce sont les cellules AM44 et AM45. Pour rester rigoureux et chasser une éventuelle erreur dans la construction de la feuille Excel, on compte le nombre réel de visées dans la feuille Calcul. On utilise pour cela la colonne AC où chaque ligne de visée vient mettre un 1. On note que, par exemple, les lignes 1 à 4 ne produisent pas de 1 ni les lignes 15, 26, 37. Il suffit là aussi de compter le nombre de 1 pour déterminer le nombre de visées. Avec le choix arbitraire de 10 000 visées, ce nombre en AM41 doit donc être de 10 000.

Pour compléter la synthèse on affiche en AM46 la distance maximale qu'on peut trouver dans la colonne V (distance de l'écart). On observe que, bien que l'Écart maximum varie notablement, les deux valeurs « Ecart > EQM » et « Ecart > 2 x EQM » varient peu en faisant F9. C'est une bonne indication sur la constance de la distribution des valeurs de l'écart. À partir de la version 08.0 a été ajouté dans l'onglet « Saisie » un analyseur de la distribution des valeurs de cet écart. Cet onglet est protégé des écritures intempestives.

Pour établir ce graphique, on définit des tranches de 1/100 (cellule B2 verte) de la valeur maximum de l'écart. On compte le nombre de valeurs de l'écart dans chacune des 100 tranches. On affiche ensuite, en

fonction de la longueur de l'écart, non pas le nombre d'écarts comptés, mais une valeur normalisée par rapport au nombre maximum d'écarts comptés dans la tranche la plus chargée. On obtient ainsi un graphe auto-adaptatif. L'objectif est de vérifier qu'en faisant des F9, ce graphe conserve, en gros, la même silhouette.

À partir de la version 09.0 ont été ajoutées plusieurs choses dans l'onglet « Saisie ». Tout d'abord une notion de probabilité a été introduite. Il s'agit de repérer quel est l'écart topographique que l'on va obtenir avec une certitude pratique de 98 % pour les données de la série en cours (cellule S34). C'est-à-dire qu'en pratique pour une série de 100 topographies avec 1° de bruit vous aurez 98 chances sur 100 de ne pas dépasser un écart maximum de x mètres : par exemple 5.04 m ou 5.32 m.

Comme on le voit, la distribution de l'écart varie sensiblement d'une série de 100 topos à l'autre à chaque recalcul par F9. Il a donc ensuite été ajouté un bouton pilotant une Macro écrite en VisualBasic pour forcer le calcul de la feuille une centaine de fois (comme si on appuyait successivement 100 fois sur F9).

L'écart type entre les résultats obtenus est affiché en S37. Les résultats obtenus pour la certitude pratique de 98% peuvent donc ainsi être moyennés (cellule S35), ainsi que les écarts maximum (cellule S38).

4.4. Quelques résultats typiques

4.4.1. Exemple 1

Supposons que nous ayons paramétré la simulation suivante :

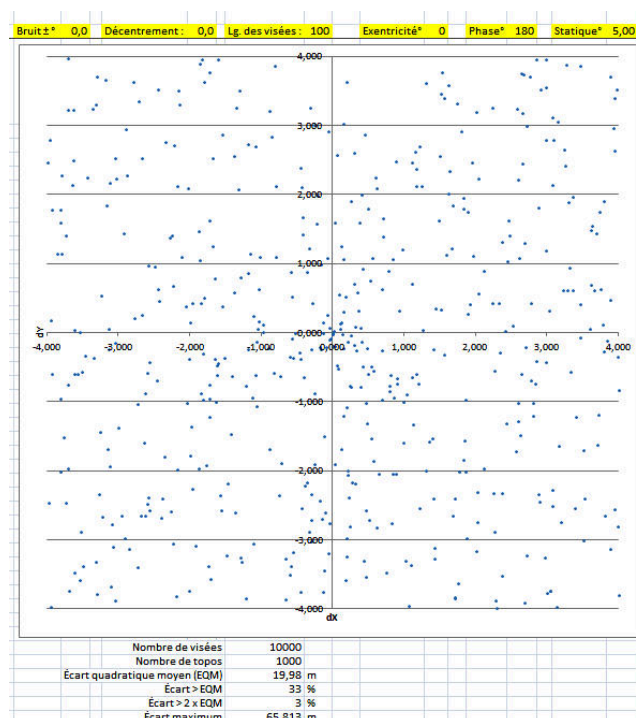


Figure 28 : Nuage des coordonnées x,y (loupe)

Si on examine la distribution des écarts voici ce que l'on obtient :

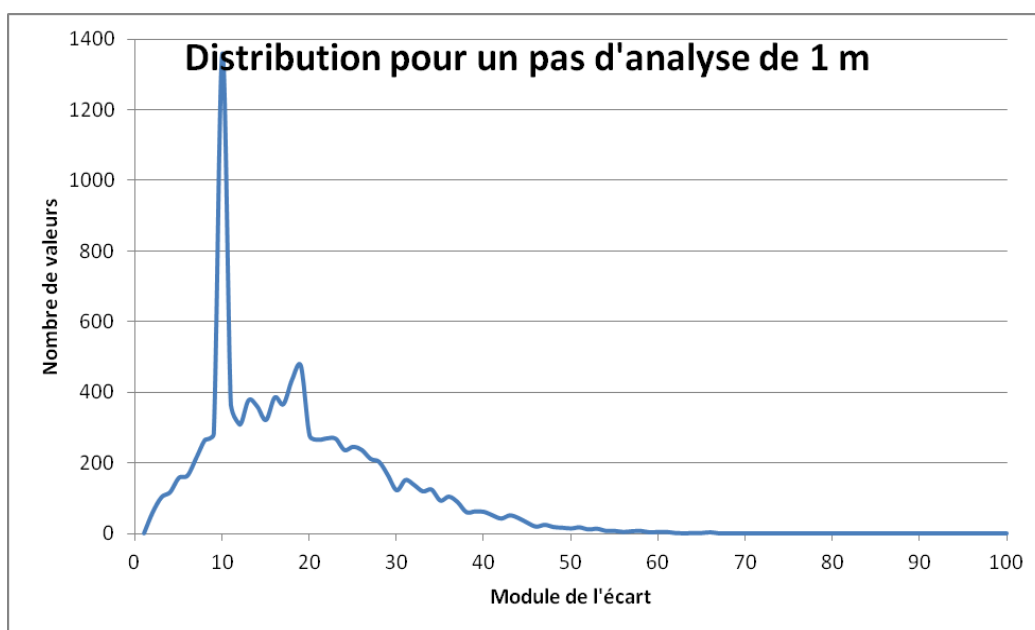


Figure 29 : Distribution des écarts

En abscisse on a créé 100 classes de 1 m de largeur, donc une résolution de 1 m. On peut lire dans Excel la valeur correspondant à la pointe 10, elle est de 1359. Cela signifie qu'il y a 1359 valeurs comprises entre 8 et 9 m d'écart, sur l'ensemble des 10 000 valeurs. On verra par la suite que, dans ce cas, de nombreux points sont concentrés sur un cercle de rayon $R = \tan(5^\circ) \times 100 \text{ m} = 8,75 \text{ m}$

4.4.2. Exemple 2

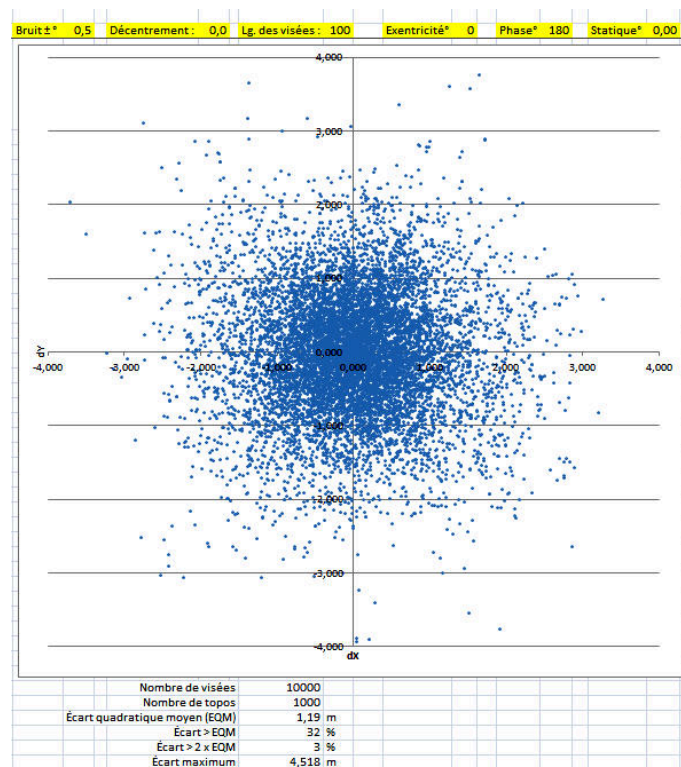


Figure 30 : Nuage des coordonnées x,y (loupe)

La distribution avec un pas d'analyse de 10 cm est la suivante :

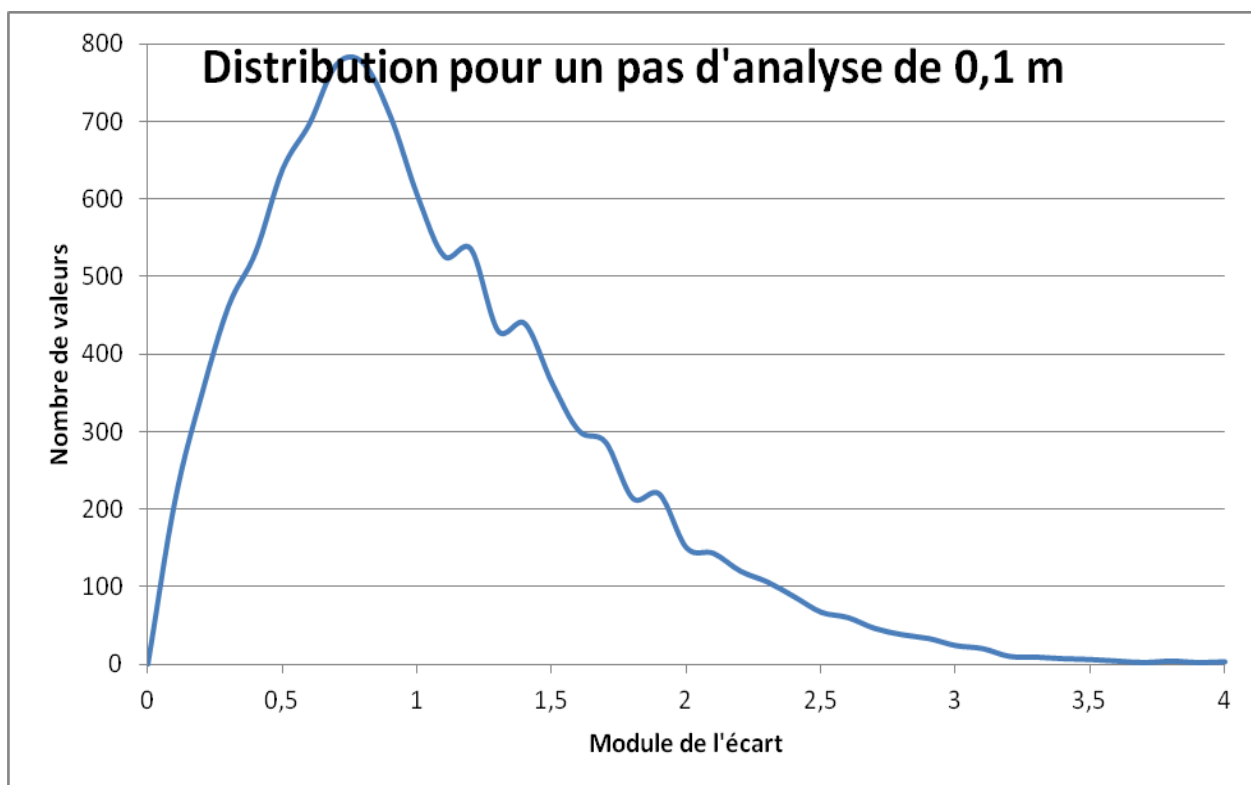


Figure 31 : Distribution des écarts

Cette fois, le maximum est situé vers 0,80 m.

Il faut tout de même rester très prudent dans l'interprétation de tous ces résultats. En effet, ils sont issus de la présente simulation qui repose sur les trois classeurs Excel que nous venons de présenter (voir note 8). L'extrapolation de cette simulation et sa transposition à des cas de topographies réelles pouvant être sujette à débat, nous invitons le lecteur à faire fonctionner lui-même ces classeurs.

4.5. Adjonction et influence d'un bruit de mesure

Par simulation dans notre classeur Excel, on va ajouter à l'angle de relèvement un petit angle de valeur aléatoire, compris en deux bornes. Comme nous l'avons vu précédemment au paragraphe 2.4., cela pourrait simuler concrètement l'incertitude due à l'interpolation au demi-degré d'un compas de relèvement gradué en degrés,

- **Conséquences**

Voici trois exemples de graphiques en nuage de points, obtenus suite à l'introduction de deux valeurs identiques de bruit de mesure, mais pour des visées de longueurs différentes :

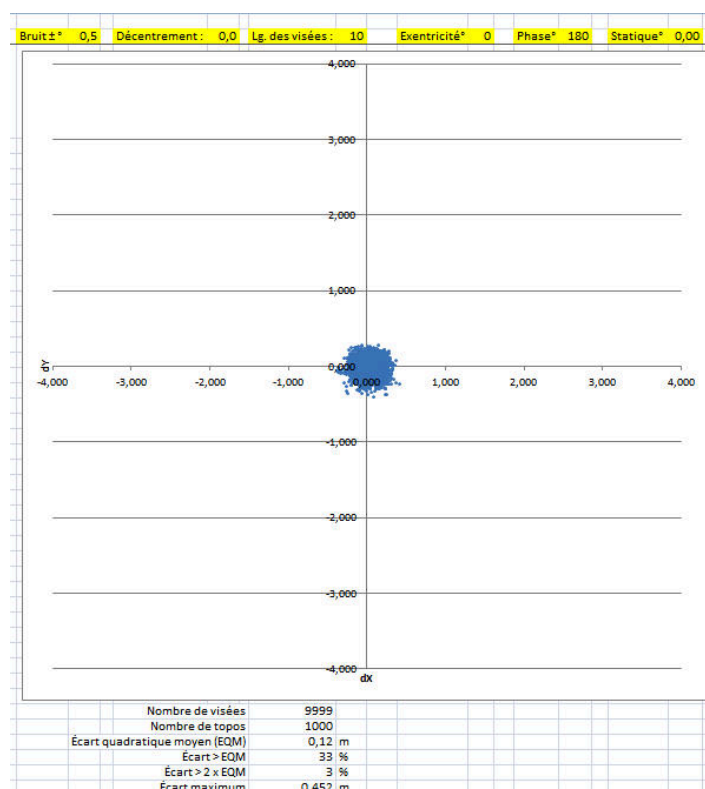


Figure 32 : Cas typique d'un bruit de mesure de $\pm 0.5^\circ$ (visées de 10 m)

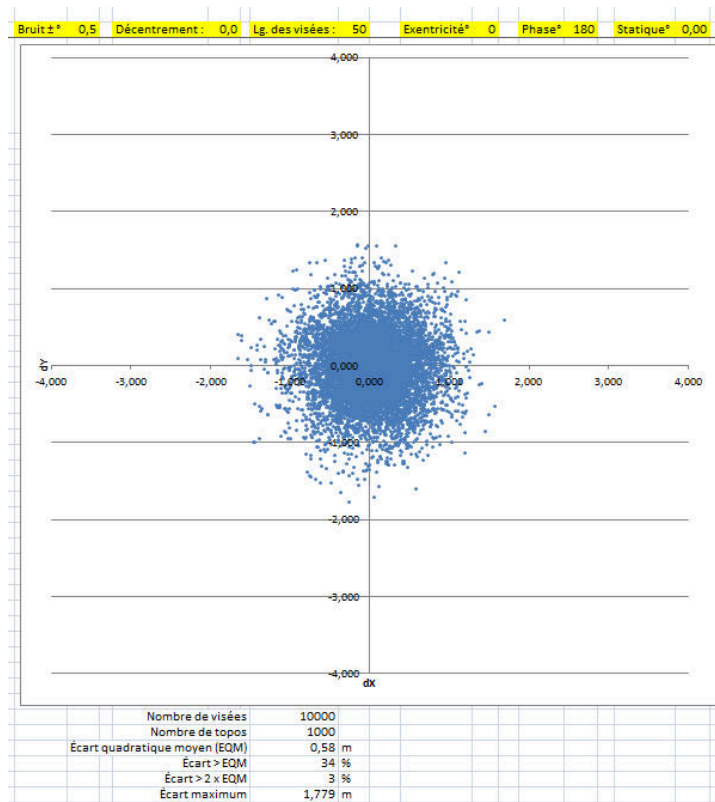


Figure 33 : Cas typique d'un bruit de mesure de $\pm 0.5^\circ$ (visées de 50 m)

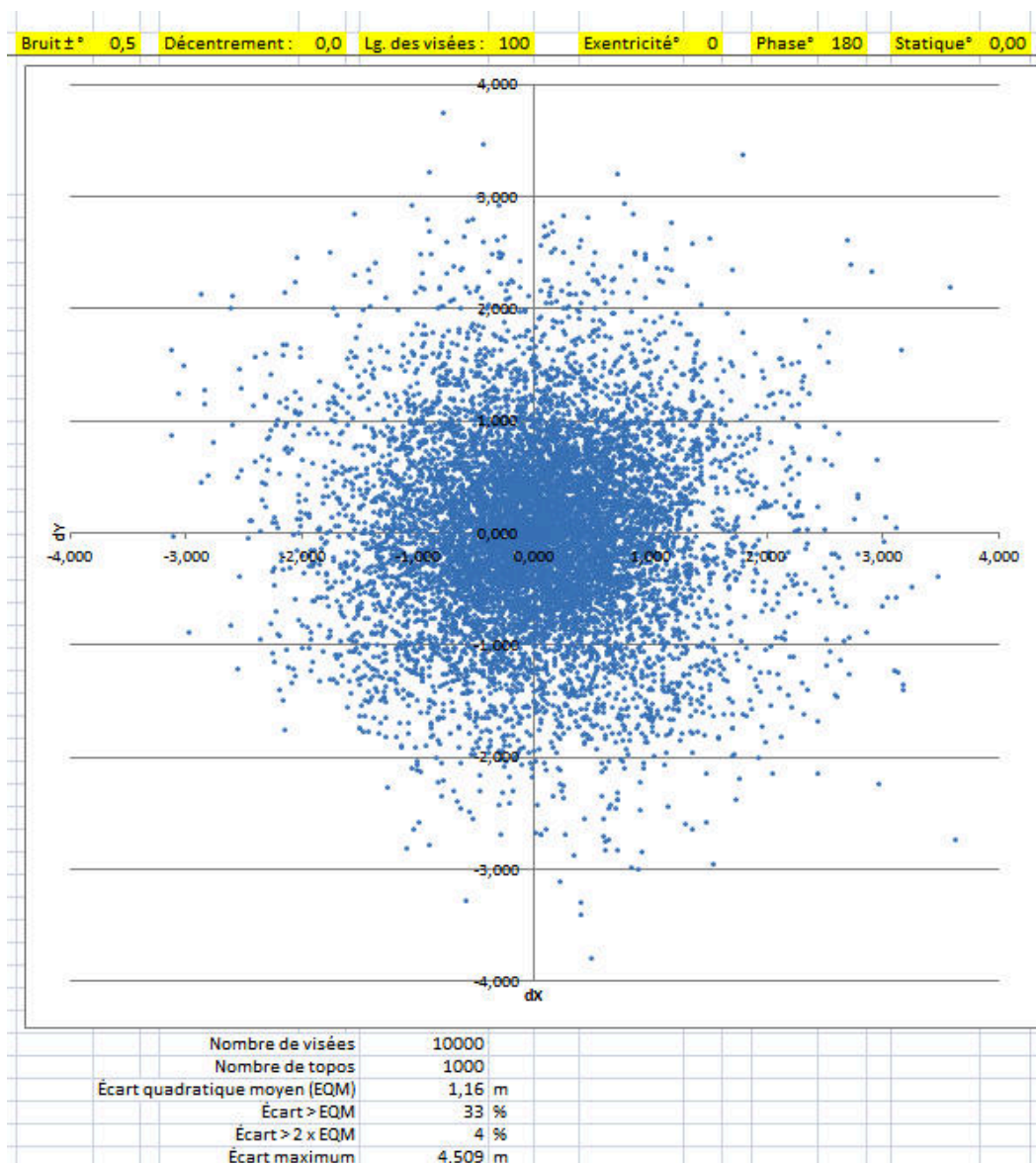


Figure 34 : Cas typique d'un bruit de mesure de $\pm 0.5^\circ$ (visées de 100 m)

○ Analyse

Avantage¹⁷ aux visées courtes : on observe que la précision se dégrade quand la longueur des visées augmente. La distribution des valeurs des écarts est du même ordre. Les graphiques ci-après montrent l'évolution de l'écart sur cinq topographies de 1 km de long, pour des visées de 100 m, puis de 10 m.

On n'a pas ici l'impression que le nombre de mesures (uniquement 10 mesures pour des visées de 100 m, mais 100 mesures pour des visées de 10 m) ait une grosse influence sur le comportement aléatoire et globalement ascendant de l'erreur.

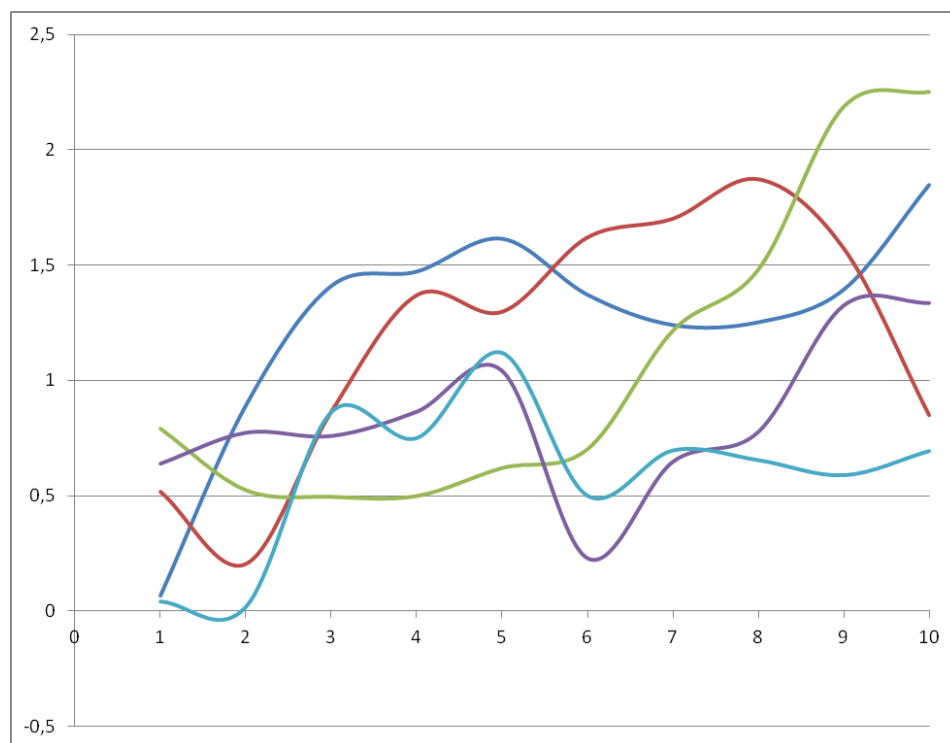


Figure 35 : Écarts constatés sur 5 topos (10 visées de 100 m)

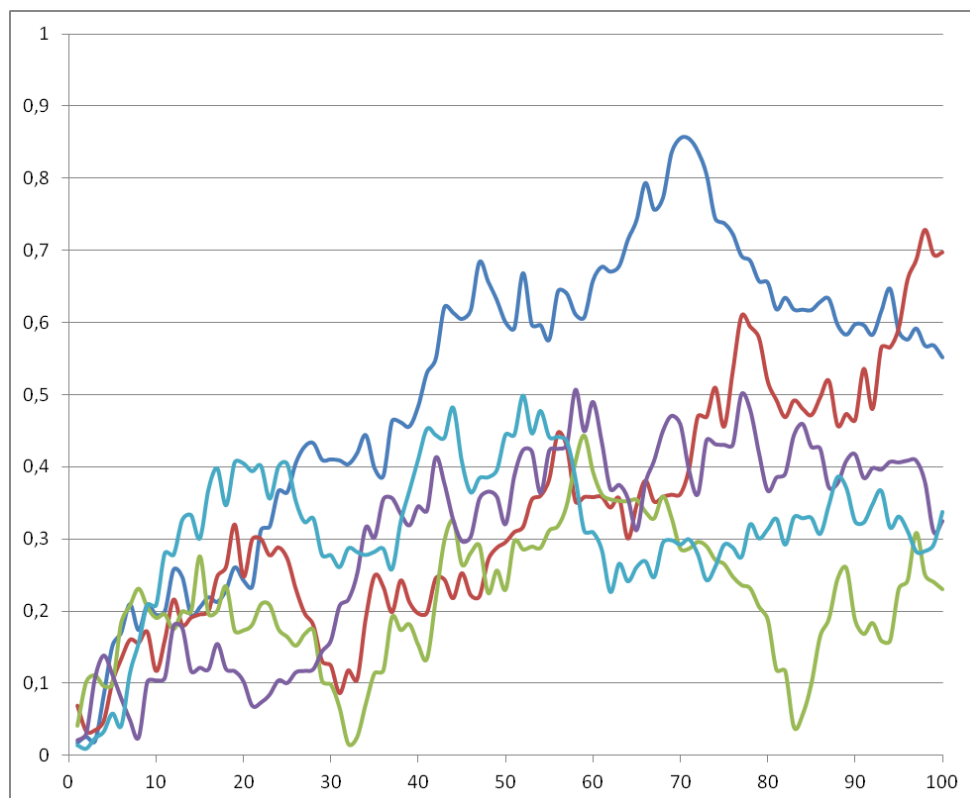


Figure 36 : Écarts constatés sur 5 topos (100 visées de 10 m)

4.6. Adjonction et influence d'une erreur de décentrement

Par simulation, on va modifier maintenant la position de reprise du point de topo suivant comme nous l'avons expliqué précédemment au paragraphe 2.5.

Pour cela, dans la simulation nous allons rendre deux valeurs aléatoires :

- le rayon, grâce à la valeur de la colonne AA modifiant le rayon fixé par l'opérateur en AH2,
- la position sur le cercle, dont le rayon est fixé par l'opérateur, par la valeur aléatoire de la colonne Z qu'on retrouve en colonne M.

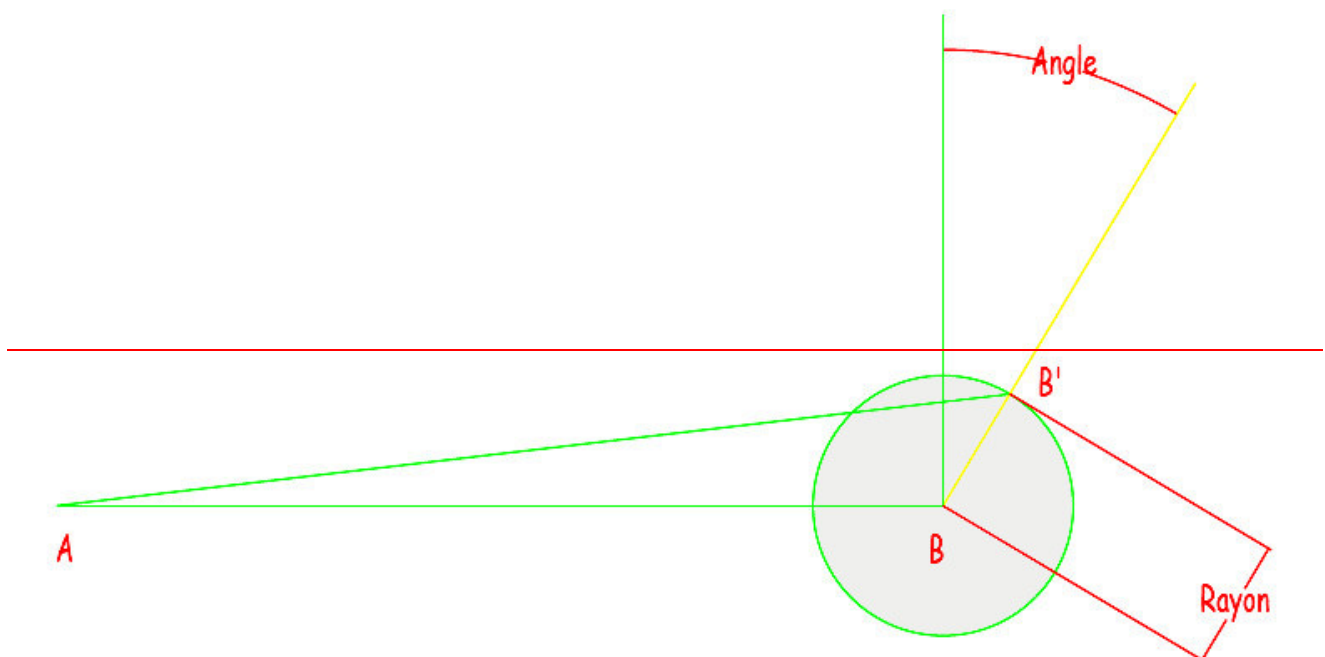


Figure 37 : les deux paramètres aléatoires de l'erreur de décentrement.

On peut donc dire que le point de reprise se retrouve quelque part dans la surface du disque dont le rayon [B B'] est fixé par l'opérateur (disque grisé sur la figure précédente).

Une représentation imagée plus détaillée de cette erreur est également disponible à la fin du chapitre 2. (si nécessaire, voir la Figure 13 : Effet de l'erreur de décentrement, B et B' ne se superposent pas).

○ **Conséquences**

Les deux graphiques suivants vont illustrer l'influence d'une erreur de décentrement maximum de 10 cm (toutes les autres étant nulles) sur la position des points mesurés, tout d'abord dans le cas de visées longues (donc peu nombreuses) et ensuite dans le cas de visées courtes (dix fois plus nombreuses).

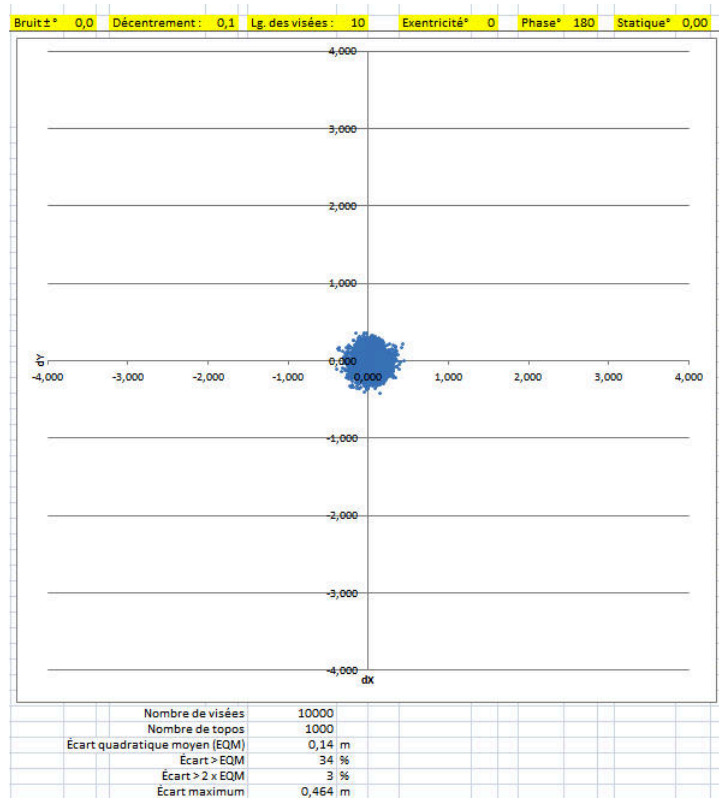


Figure 38 : Cas typique d'un décentrement maxi de 0.1 m (visées de 100 m)

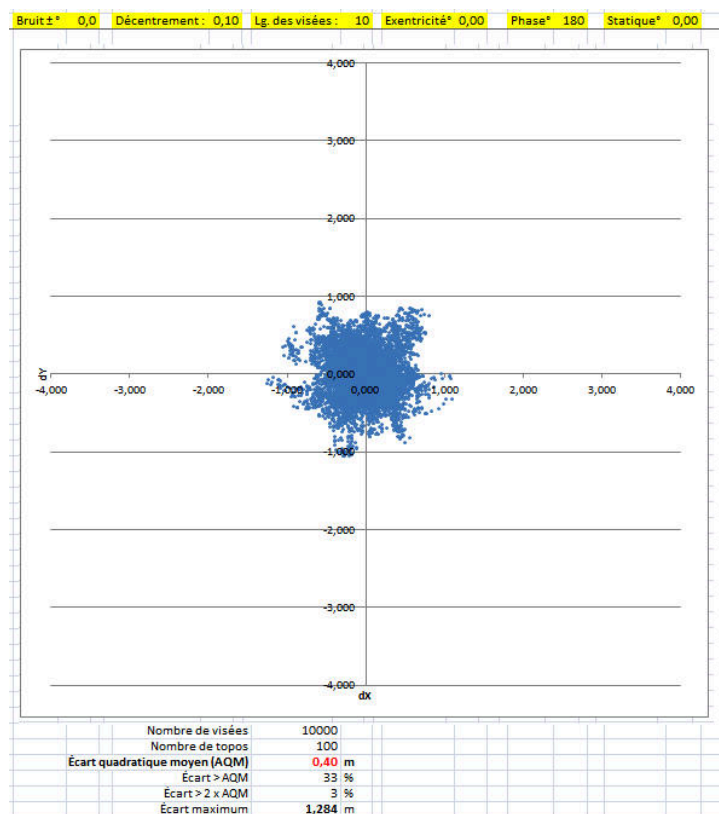


Figure 39 : Cas typique d'un décentrement maxi de 0.1 m (visées de 10 m)

○ Analyse

Le comportement est logique. Le décentrement s'applique à chaque visée; moins il y a de visées moins ce décalage se propage. L'influence négative de la longueur des visées passe ici au second plan : avantage¹⁷ aux visées longues parce que moins nombreuses.

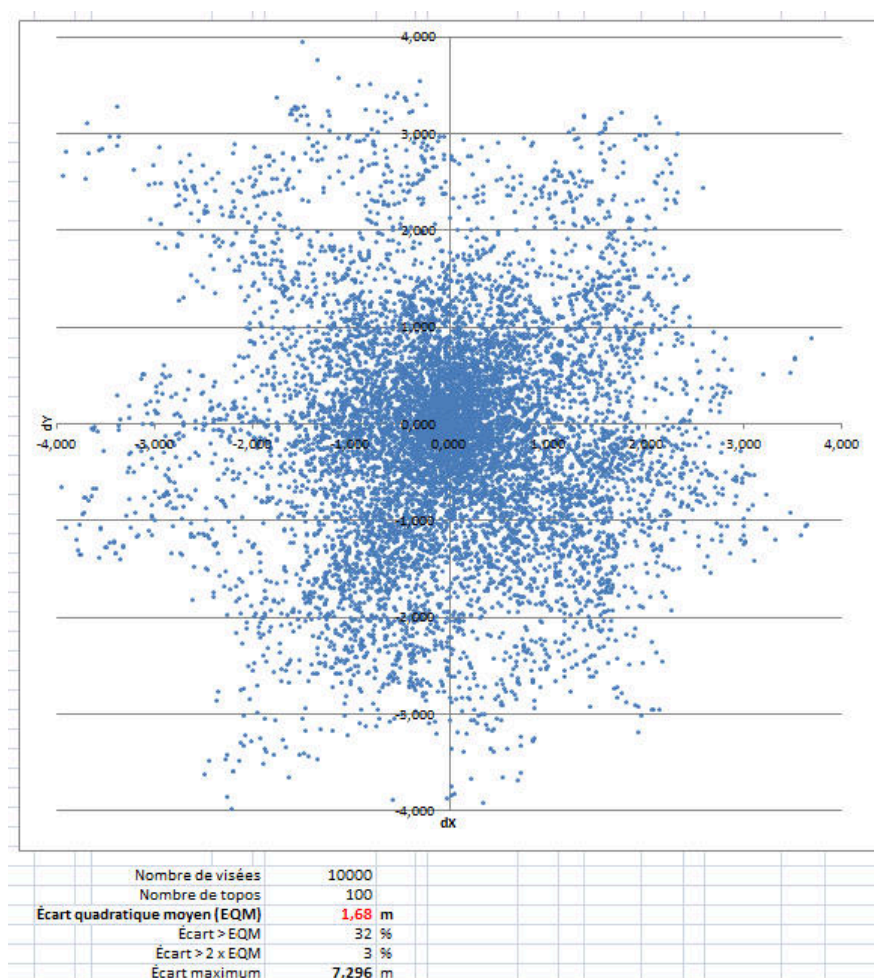


Figure 40 : Cas typique d'un décentrement maxi de 0.4 m (visées de 10 m)

Dès qu'on augmente la valeur du décentrement les points mesurés s'écartent rapidement de leur position originelle. L'erreur de décentrement a donc une influence importante sur la qualité de la topographie : multiplier par 4 l'erreur de décentrement multiplie également par 4 l'écart quadratique moyen (EQM). Heureusement, on sait qu'il est possible de réduire fortement ce décentrement par des modes opératoires particuliers : utilisation d'un trépied, mesure directe / mesure inverse, marquage physique des points, rigueur opératoire etc.

4.7. Adjonction et influence d'une erreur de non linéarité

Nous allons maintenant aborder le second type d'erreur présenté au début de cet article (paragraphe 2.3) mais qui n'avait pas encore été détaillé ni expérimenté dans le modèle numérique : les erreurs systématiques.

Par simulation, nous allons distordre la courbe de réponse du l'instrument de mesure. Cette non linéarité ressemble à la superposition d'une sinusoïde, elle est appelée « Excentricité » sur le classeur. Une sinusoïde ce type est visible sur la Figure 61 : 61.

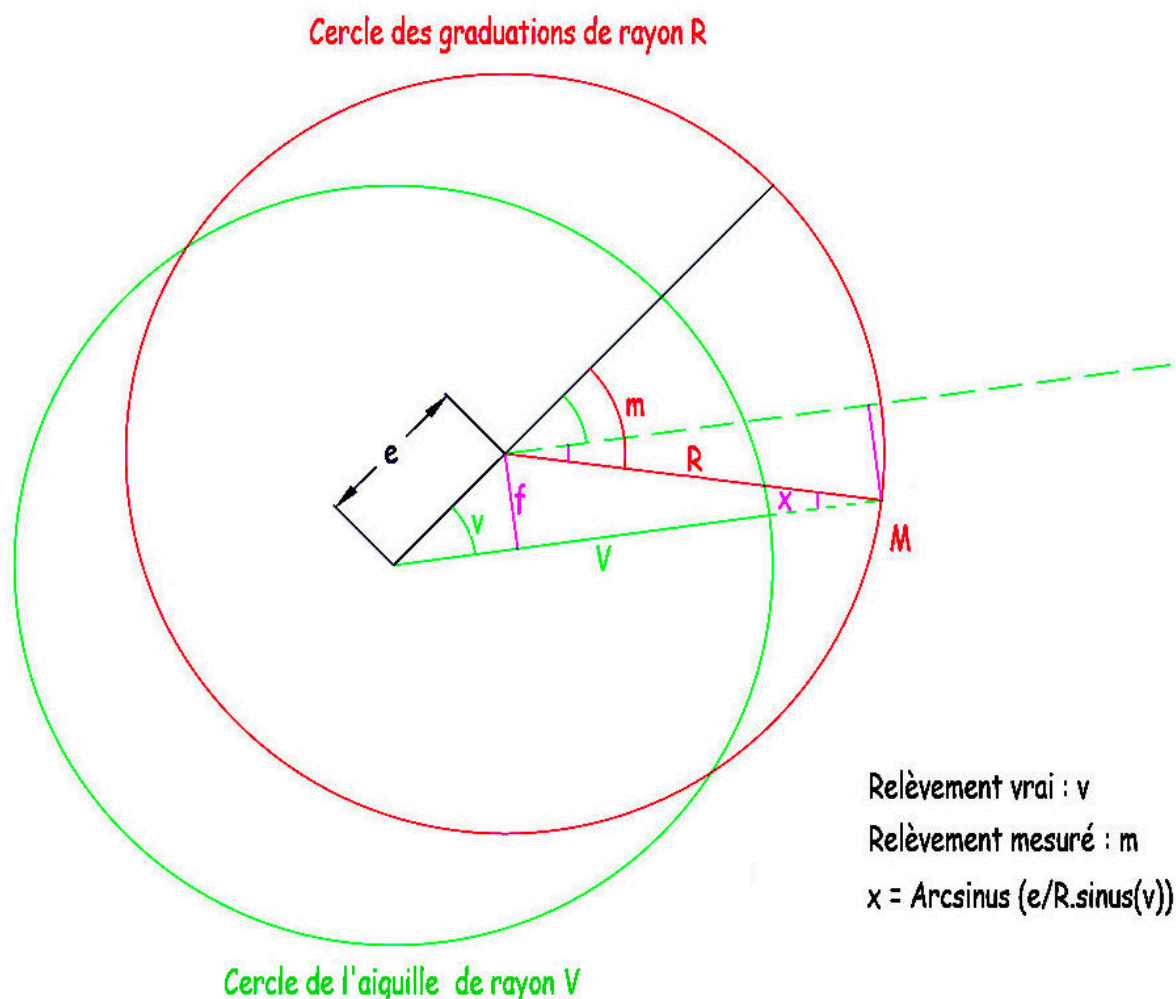


Figure 41 : Représentation géométrique de l'excentricité d'un compas

Concrètement, on avait déjà identifié lors de l'étalonnage d'un compas IRIS-50, qu'il est souvent entaché d'une distorsion de non linéarité. Pour le compas IRIS-50, cette distorsion peut donner lieu au calcul puis à l'application d'une correction avant d'utiliser la valeur affichée par le compas¹³.

Les premiers utilisateurs de distancemètres laser modifiés (DistoX), ont pu constater également sur certains modèles les effets de cette non linéarité qui rendait difficile l'« étalonnage » correct de leur appareil. Les principaux soucis qui peuvent, dans certains cas, affecter les capteurs magnétiques sont liés à leur disposition plutôt qu'à leur structure interne. En effet, suivant les renseignements que nous avons pu trouver, les capteurs 3 axes sont constitués de trois capteurs 1D disposés orthogonalement. La réponse de

¹³ Voir les documents d'évaluation d'un compas IRIS 50, par François Marchand, disponibles sur :
http://souterweb.free.fr/boitaoutils/prospection/annexes/analyse_des_compas.pdf
et http://souterweb.free.fr/boitaoutils/prospection/annexes/etalonnage_compas.xls

chaque capteur 1D est fonction de la valeur du champ dans la direction du capteur. Malheureusement la construction physique du capteur 3D peut être imparfaite, la position des capteurs 1D les uns par rapport aux autres n'étant alors pas absolument exacte. De plus, même si les non-linéarités des capteurs magnétiques 1D sont généralement moins importantes, elles peuvent également exister. La conséquence en est que les valeurs lues par les capteurs individuels ne seront pas linéaires en fonction des vraies valeurs physiques. Les algorithmes d'étalonnage ont donc été améliorés pour atténuer ces non linéarités¹⁴.

○ Conséquences

Les trois graphiques suivants vont illustrer l'influence d'une erreur de non linéarité maximum de 1° (toutes les autres étant nulles) sur la position des points mesurés dans le cas de visées de trois longueurs différentes 100m, 50m et 10m.

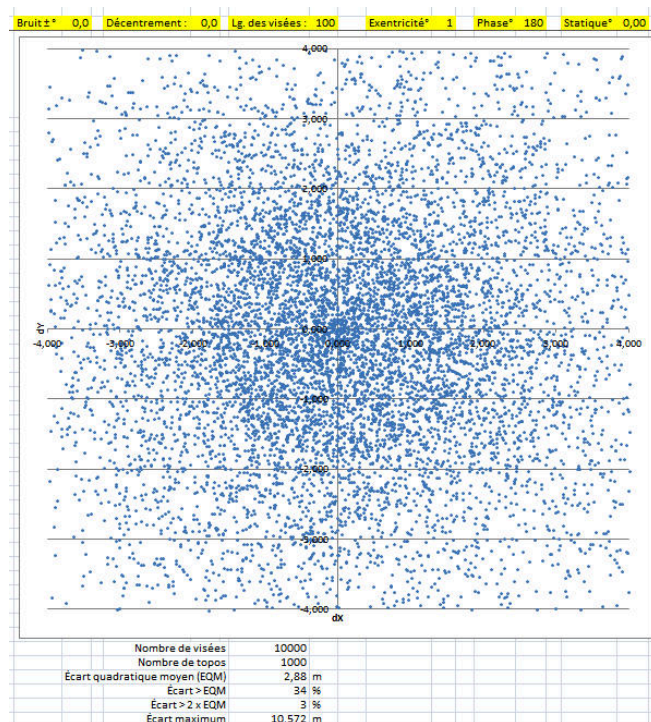


Figure 42 : Cas typique d'une distorsion de $\pm 1^\circ$ (visées de 100 m)

¹⁴ Voici ce que dit Beat Heeb à ce sujet :

«In some X2 devices the acceleration sensors have a significant non-linearity. This reduces the precision of the device. A new version of the firmware and calibration software allows to compensate this error. To use it do the following:

- If your firmware is below 2.3, use the Updater to reload it.

- Use PocketTopo Version 1.372 to do the calibration.

- During calibration activate the "NL" option in the menu to enable calculation and transfer of the non-linearity correction coefficients.

You can do this with existing calibration data; there is no need to redo the calibration measurements. If your device is affected you will notice a significant reduction of the delta. Do not use the "NL" option for DistoX1 devices or firmware versions below 2.3!»

Il a ajouté : «Such a nonlinearity cannot be compensated by a linear calibration. Generalizations of the calibration for nonlinearities are possible but a restricted nonlinearity model has to be used. With a too general model the calibration may become unstable and the errors could increase in some cases.

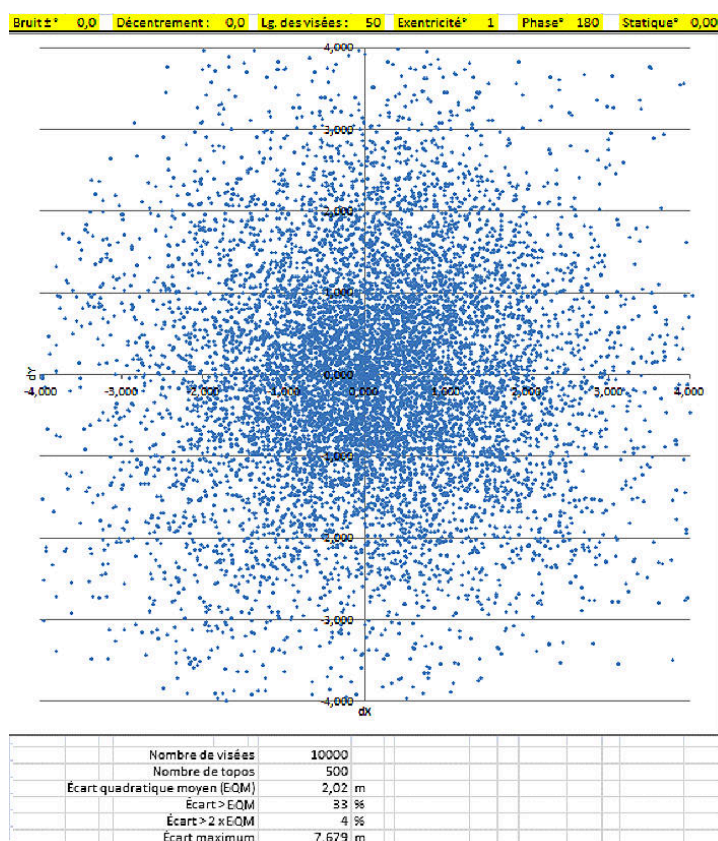


Figure 43 : Cas typique d'une distorsion de $\pm 1^\circ$ (visées de 50 m)

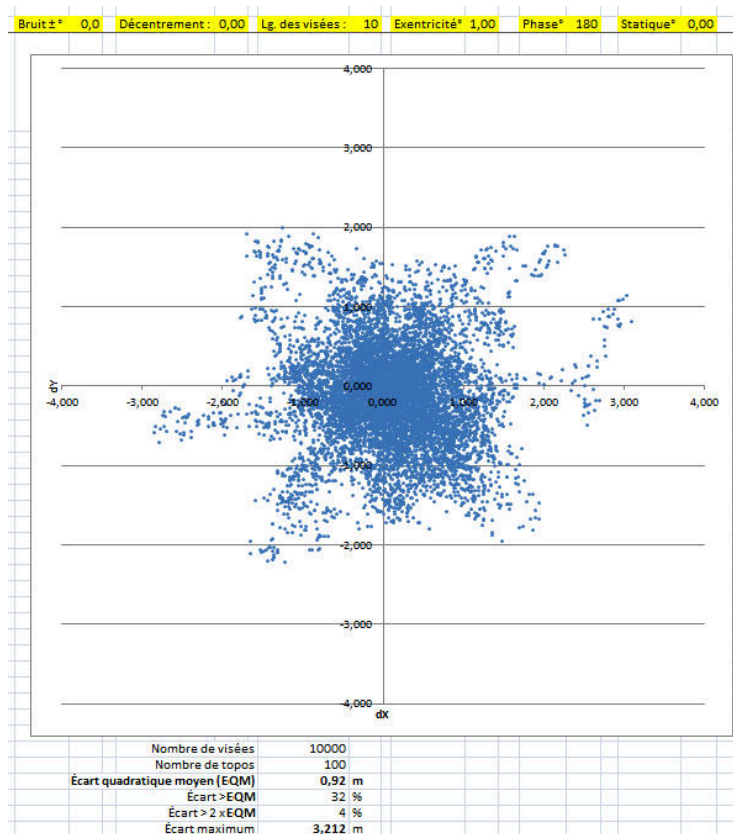


Figure 44 : Cas typique d'une distorsion de $\pm 1^\circ$ (visées de 10 m)

○ **Analyse**

Contrairement au bruit de mesure (voir au point 4.5) il n'y a ici aucun avantage¹⁷ à modifier la longueur des visées pour obtenir une meilleure précision. On dira que la qualité de la topographie est indépendante de la longueur des visées pour ce type d'erreur.

Là aussi, comme pour les précédentes, un doublement de l'erreur de non linéarité entraîne un doublement de l'EQM.

4.8. Adjonction et influence d'un décalage statique du zéro

Pour en terminer avec les erreurs systématiques, nous allons nous préoccuper d'un autre cas (déjà mentionné au point 4.2.1) : le décalage du zéro de l'instrument de mesure (compas).

On mésestime en général l'effet de cette erreur statique car ce décalage fait tourner la topographie autour du point origine. De ce fait, par bouclage, si on revient au point de départ on ne perçoit pas de décalage sur la topographie finale. Il n'empêche que toutes les coordonnées des autres points de la topographie sont plus ou moins fausses.

Dans le graphique des écarts on voit alors apparaître un phénomène étrange comme ci-après avec :

$$R = \tan(1^\circ) \times 100 = 1,7455$$

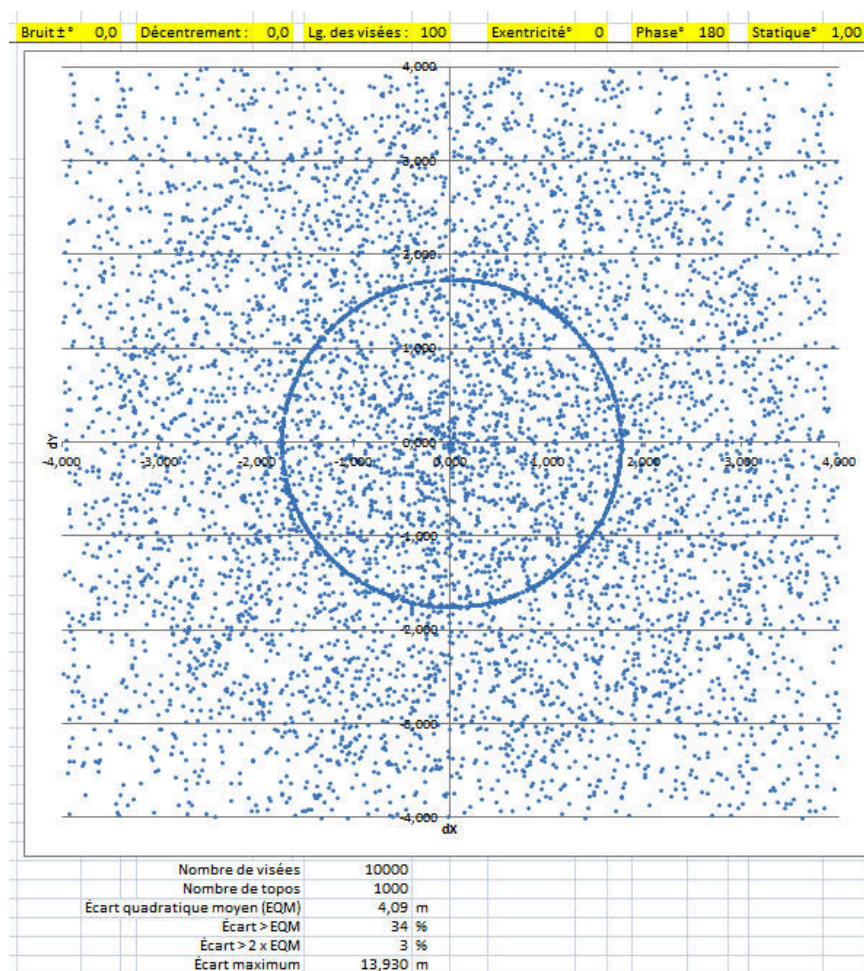


Figure 45 : Écart statique de 1° (visées de 100 m)

Pour la petite histoire, il est amusant de constater l'apparition d'un cercle fantôme dans le nuage de points du graphique x,y.

Il faut pour cela compiler un nombre très important de topographies (plus d'une centaine, voir 4.2.1), donner à l'erreur statique une valeur pas trop élevée (sinon le cercle fantôme s'estompe) et laisser les autres perturbations à zéro ou à des valeurs très faibles.

C'est l'ensemble des visées n°1 de chaque topographie qui forme ce cercle. En effet, on part du point 0,0 pour toutes les topographies et c'est après la première visée que l'on peut avoir un certain nombre d'écarts identiques. Ensuite, les écarts divergent trop pour que l'effet ressorte graphiquement.

On peut légèrement bruiser cette figure :

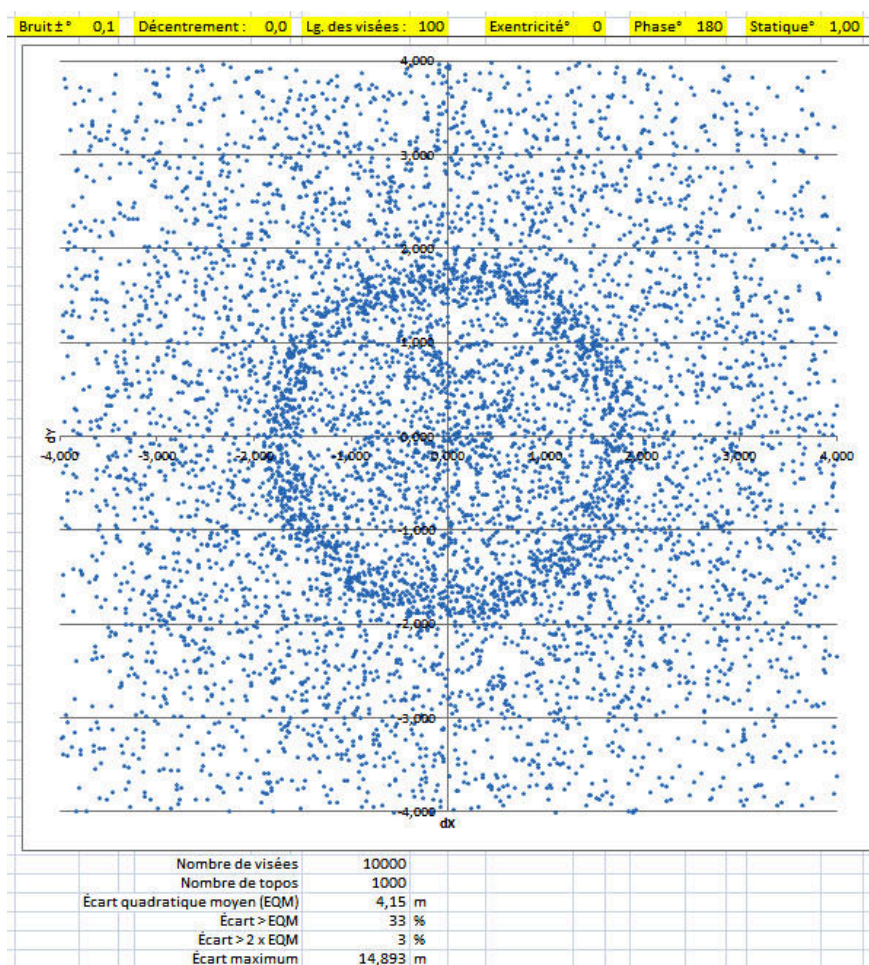


Figure 46 : Écart statique de 1° (visées de 100 m) avec ± 0.1° de bruit

Pour obtenir le même écart quadratique moyen (EQM) avec du bruit sur la mesure, il faut fixer l'amplitude de ce bruit à 1,76°. On voit que la distribution des valeurs suit les mêmes règles, l'écart maximum restant lui aussi très proche.

Nombre de visées	10000
Nombre de topos	1000
Écart quadratique moyen (EQM)	4,15 m
Écart > EQM	33 %
Écart > 2 x EQM	3 %
Écart maximum	14,845 m

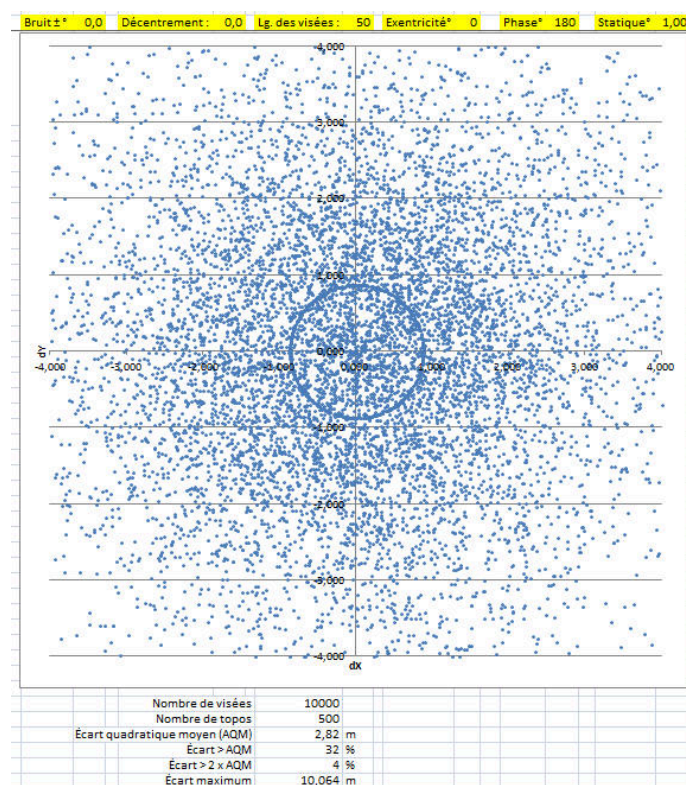


Figure 47 : Écart statique de 1° (visées de 50 m)

En passant la longueur des visées de 100 mètres à 50 mètres, on voit toujours le cercle mais cette fois il est à : $R = \tan(1^\circ) \times 50 = 0,872$

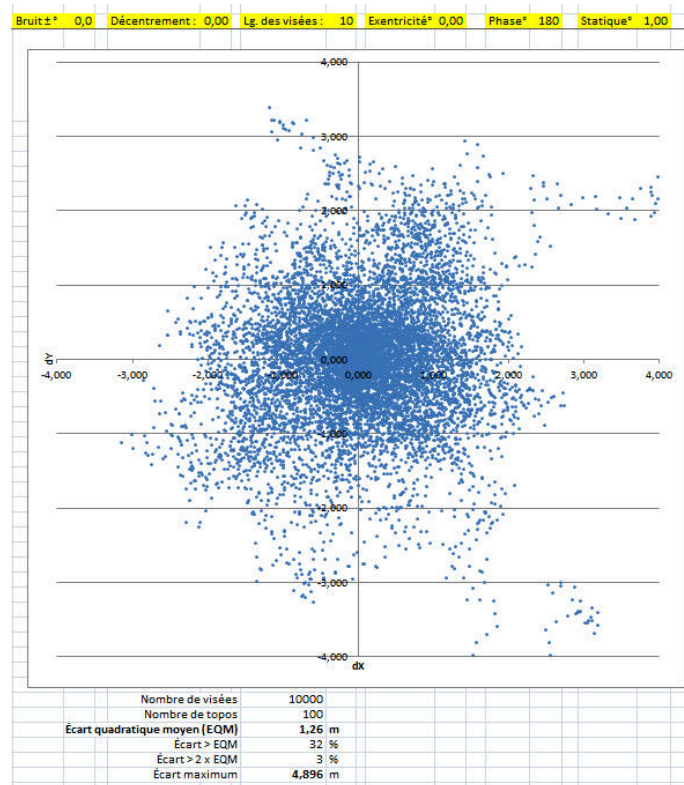


Figure 48 : Écart statique de 1° (visées de 10 m)

Enfin, avec des visées de 10 mètres, on ne voit plus le cercle. Comme il est maintenant situé à : $R = \tan(1^\circ) \times 10 = 0,175$, il se retrouve graphiquement perdu dans la masse dense bleue. Mais il suffit de changer d'échelle (effet de zoom) pour le distinguer :

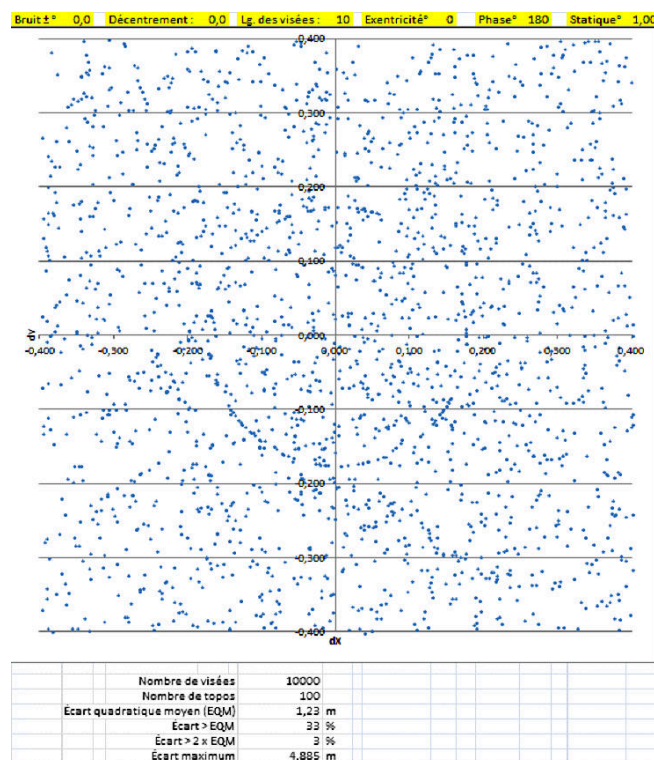


Figure 49 : Écart statique de 1° (visées de 10 m) / loupe

○ Analyse

Ici aussi, comme dans le cas de la non linéarité, il n'y a aucune influence de la longueur des visées sur le niveau de qualité de la topographie obtenue.

4.9. Concrètement

Au cours de nos travaux, nous avons pu faire l'expérience de 3 étalonnages d'appareils de mesures différents.

4.9.1. Calibration d'un compas IRIS50 (septembre 2018)

La première expérience de calibration d'un compas datant de 2015, qu'en est-il 3 ans après ?

Nous avons participé à l'évaluation d'un compas laser modifié spéléo type DistoX. L'« étalonnage » d'un DistoX n'est pas chose facile; le lecteur se reportera aux rapports traitant de ce sujet. Tous ces travaux ont permis de se familiariser avec les méthodes d'étalonnage. François a donc repris l'étalonnage de son compas IRIS50 sur un site voisin du précédent qui offrait plus de visibilité. La position du point a été déterminée au GPS et on arrive à une précision de ± 2 m, ce qui pour l'usage est plus que suffisant.

Pour éviter les erreurs et simplifier la méthode, les mesures au compas ont été effectuées en étant placé 3-4 m en arrière du théodolite, en maintenant l'alignement compas / théodolite / cible. En plaçant le théodolite un peu plus bas que la normale, cette opération est facile. Cette méthode a permis d'augmenter le nombre de cibles visées à 77.

C'est l'ancien pylône de l'Otan en 48.395754 2.861708 qui sert de référence absolue. Ce pylône est à 4,341 km. Le théodolite est situé en 48.356814 2.866486 Alt 97.2 Tous calculs faits (fichier Excel Gps.xls) le relèvement du pylône par rapport au nord WGS84 est de 355,34°. Le 27/08/2018 la déclinaison magnétique sur le site est annoncée à 0,9075° (nord magnétique à l'Est du nord WGS84).

Le pylône OTAN doit donc être vu au 354,43° magnétique. Le théodolite, en visant ce pylône, indique 8,55 gon (grades). Il faut donc ajouter [-14,73 gon] (valeur négative) aux valeurs lues pour que cette nouvelle valeur corresponde au relèvement, en gon, par rapport au nord magnétique.

Certainement du fait du nombre, les écarts entre la mesure compas et la valeur théorique du gisement paraissent un peu plus faibles que lors de la campagne précédente.

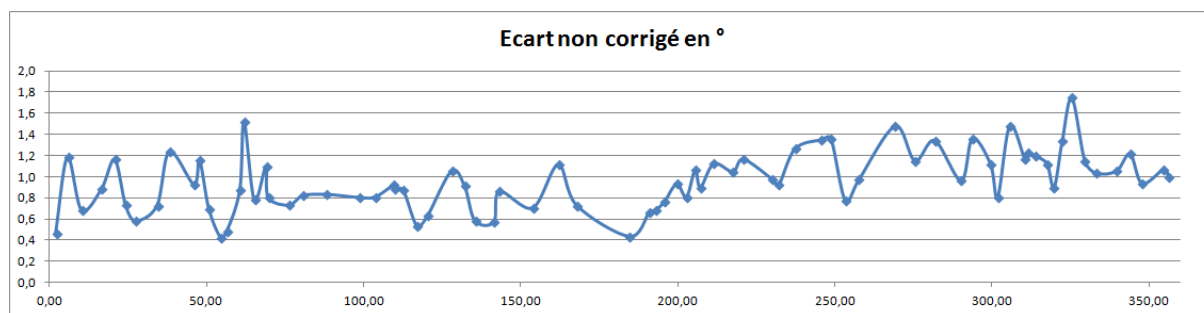


Figure 50 : Écarts mesurés sur IRIS 50 en septembre 2018

On voit que le zéro est toujours décalé. J'étais resté sur une incompréhension de la courbe de tendance dans Excel. Si on fait apparaître, avec la courbe non lissée, une courbe de tendance, on observe ceci :

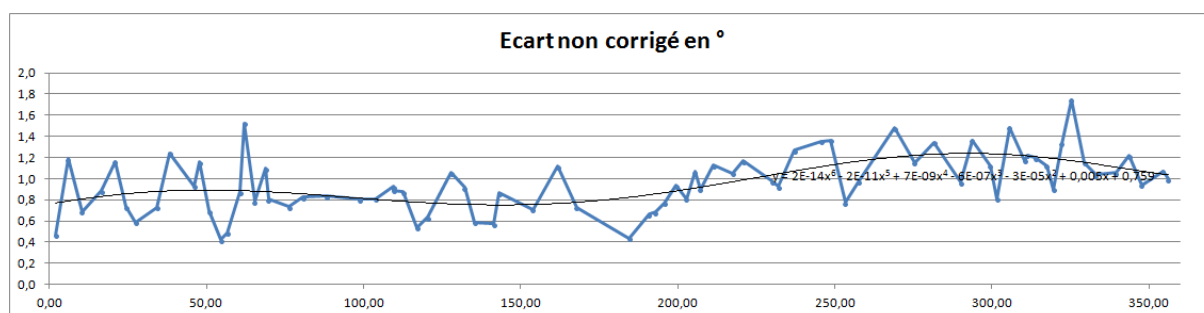


Figure 51 : Écarts non lissés + courbe de tendance + équation

L'équation affichée est réputée être celle de la courbe de tendance. Néanmoins si on trace le graphique

$y = 2E-14x^6 - 2E-11x^5 + 7E-09x^4 - 6E-07x^3 - 3E-05x^2 + 0,005x + 0,759$ ça ne marche pas. C'est un page Web¹⁵ qui a permis de résoudre le problème : il est indispensable de faire apparaître plus de décimales (Microsoft® dit qu'il en faut 30).

¹⁵ <https://support.microsoft.com/fr-fr/help/211967/chart-trendline-formula-is-inaccurate-in-excel>

L'équation devient alors :

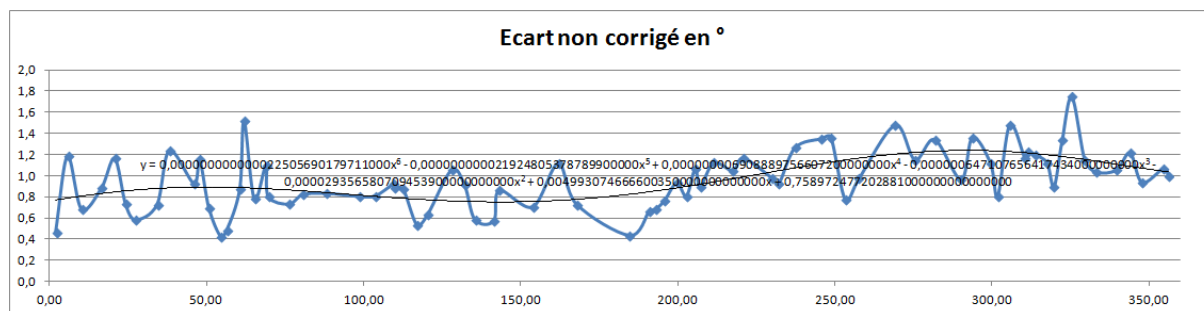


Figure 52 : Écarts + courbe de tendance + équation pertinente

$$y = 0,000000000000022505690179711000x^6 - 0,000000000021924805378789900000x^5 + 0,000000006908889756607200000000x^4 - 0,000000647107656417434000000000x^3 - 0,000029356580709453900000000000x^2 + 0,004993074666600350000000000000x + 0,758972477202881000000000000000$$

Et ça change tout. Le graphique de cette fonction correspond parfaitement au graphique de la courbe de tendance superposée en Figure 49 : Écarts non lissés + courbe de tendance + équation

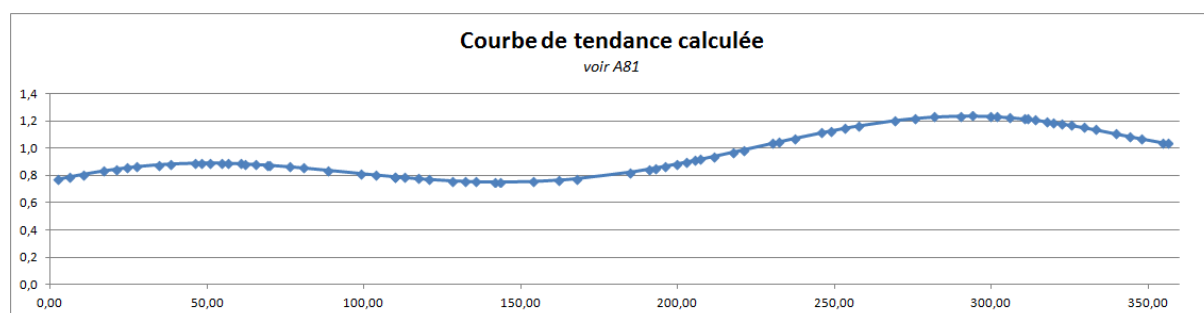


Figure 53 : Graphique de la courbe de tendance

On notera la valeur constante de $+0,759^\circ$ qui est le décalage statique du nord magnétique; ça veut dire qu'il faut retrancher $0,759^\circ$ systématiquement à la valeur lue pour avoir le relèvement magnétique corrigé. Les autres termes du polynôme servent à compenser la non linéarité du compas.

Si on soustrait la courbe de tendance (en fait le polynôme) des valeurs écart constatées, on produit le graphique des écarts corrigés :

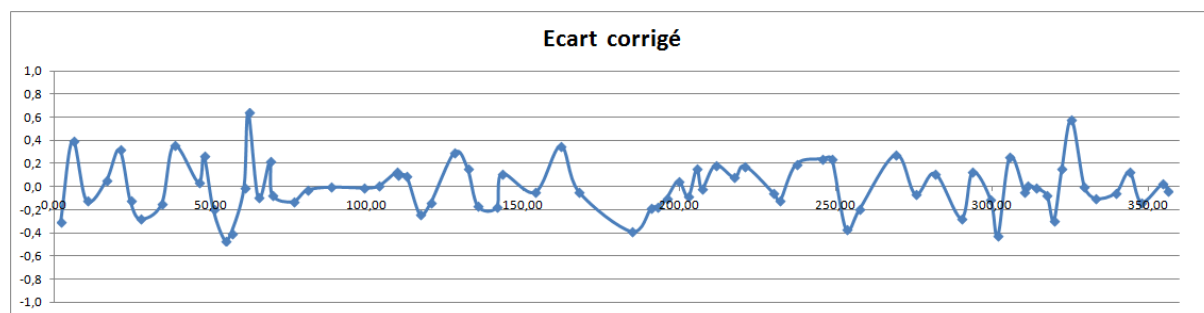


Figure 54 : Écart corrigé lissé

En gros, les écarts résiduels sont maintenant de $\pm 0,4^\circ$ sachant que la résolution de lecture du compas est du $\frac{1}{2}$ degré. On peut probablement dire que c'est l'équivalent d'un bruit de quantification; c'est-à-dire qu'on ne pourra jamais faire mieux.

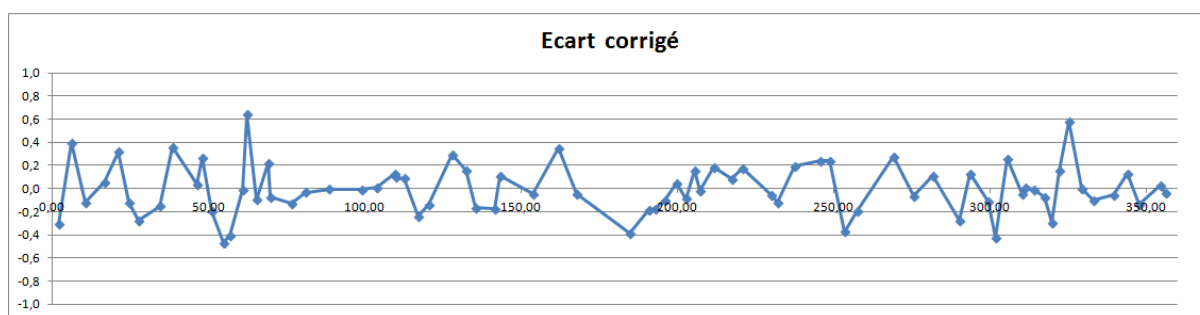
En réalité, c'est la valeur compas qui doit être en abscisse pour effectuer la correction du compas pour une topographie corrigée. Soit en simplifiant :

$$y = 0,0000000000000211025796565271x^6 - 0,0000000000204713218867621x^5 + 0,00000000633037364072236x^4 - 0,000000531648303844003x^3 - 0,0000420752880493753x^2 + 0,00572399178115294x + 0,744317787835742$$

Pour entrer cette formule dans Excel il faudra remplacer 'x' par, par exemple '\$G21^' et soustraire la formule. Exemple :

$$= \$G21 - 0,0000000000000211025796565271 * \$G21^6 + 0,0000000000204713218867621 * \$G21^5 - 0,00000000633037364072236 * \$G21^4 + 0,000000531648303844003 * \$G21^3 + 0,0000420752880493753 * \$G21^2 - 0,00572399178115294 * \$G21 - 0,744317787835742$$

On obtient ainsi, à partir du relèvement lu sur le compas, la valeur corrigée du relèvement magnétique de la cible.



Pour pouvoir utiliser cette courbe d'étalonnage il faut :

- Soit corriger tous les relèvements avant de les entrer dans le logiciel topo
- Soit disposer d'un logiciel topo qui permette d'intégrer cette correction.

Le jeu en vaut la chandelle car les effets des non linéarité et de la correction du zéro, sont redoutables.

Figure 55 : Écart corrigé non lissé

4.9.2. Expérimentation sur les DistoX

Passons maintenant aux deux modèles de DistoX310 modifiés pour la spéléo (appelés DistoX n°1 et DistoX n°2) :

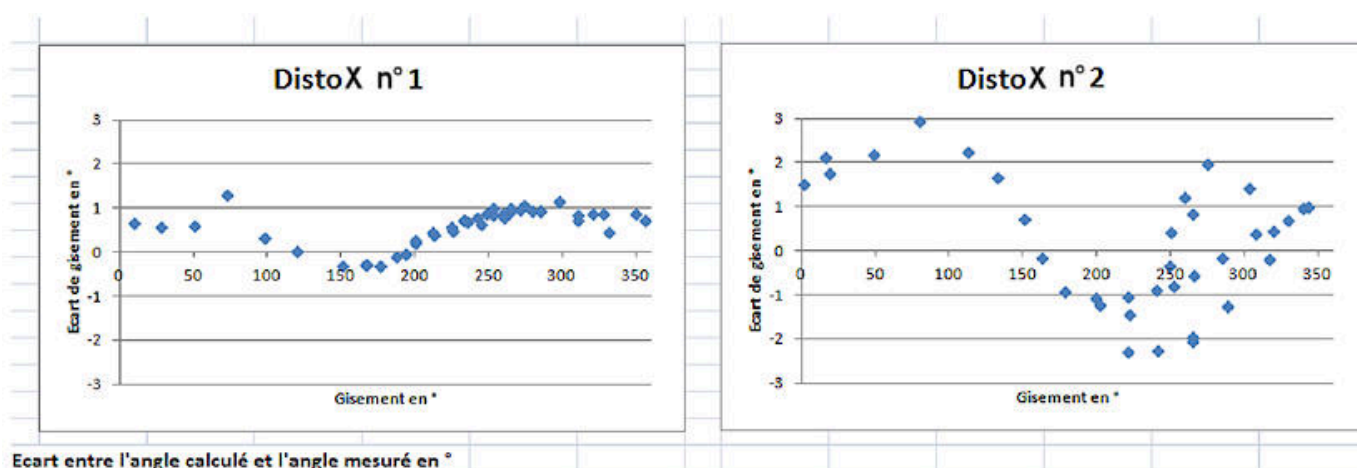


Figure 56 : Comparaison de l'écart de gisement avec les deux DistoX

Nous avons constaté, concernant le DistoX n°1 un écart non corrigé, crête à crête de 1.5° plus un zéro décalé de 0.4° . Le problème c'est que nous ne disposons pas d'une courbe d'échantillonnage fiable.

Concernant le DistoX n°2 les écarts apparaissent importants : environ 5° crête à crête et un décalage du zéro de 1° .

Pour le DistoX n°1 on pourrait envisager éventuellement une correction supplémentaire en post traitement des données, mais rien ne dit qu'elle serait constante en fonction des réétalonnages. Pour le DistoX n°2 c'est impossible avec les données dont nous disposons car son étalonnage préalable n'était pas suffisant¹⁶.

- DistoX n°1 : crête à crête 1.5° plus un zéro décalé de 0.4°

¹⁶ Rappelons que cet étalonnage « médiocre » a été conservé volontairement à fin de comparaison (voir <http://souterweb.free.fr/boitaoutils/topographie/annexes/Evaluation%20DistoX%201.0.pdf> point 3.2.2 page 37).

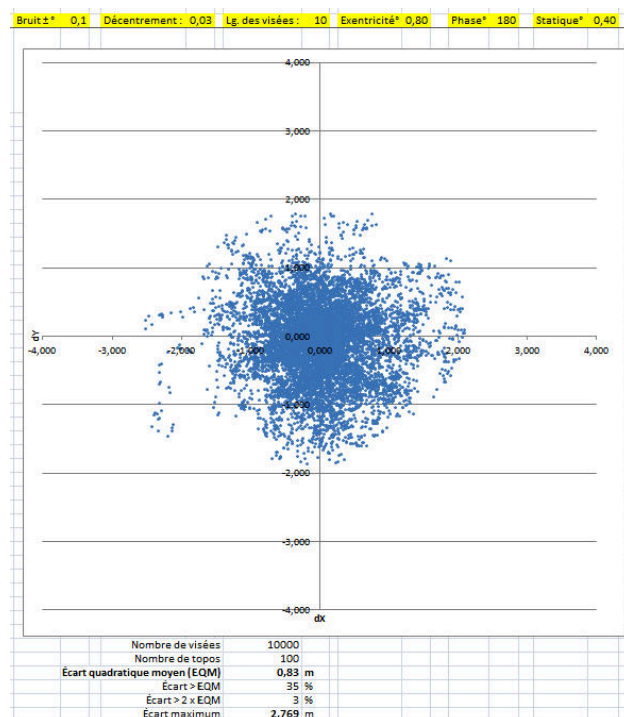


Figure 57 : Précision attendue avec le DistoX n°1 et des visées de 10 m

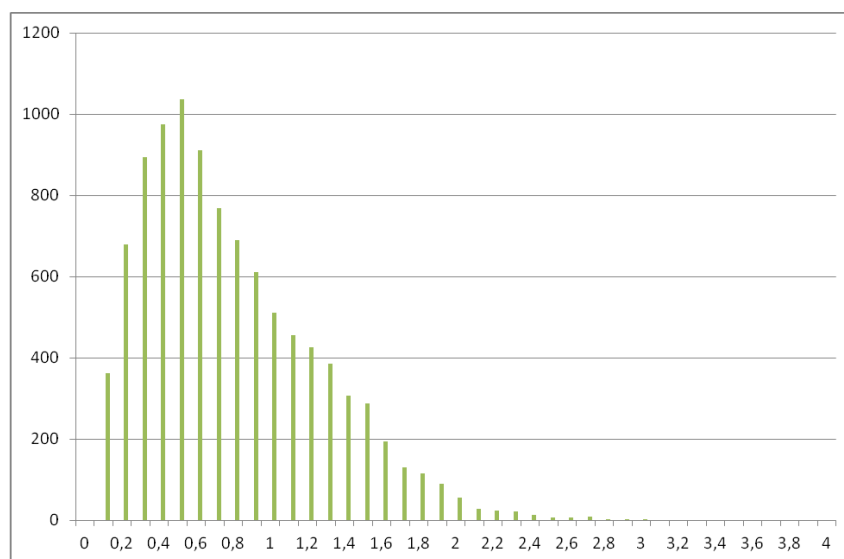


Figure 58 : Distribution des écarts du DistoX n°1. Visées de 10 m, résolution 0.1 m

- DistoX n°2 : crête à crête 5.5° plus un zéro décalé de 0.5°



Figure 59 : Précision attendue avec le DistoX n°2 et des visées de 10 m

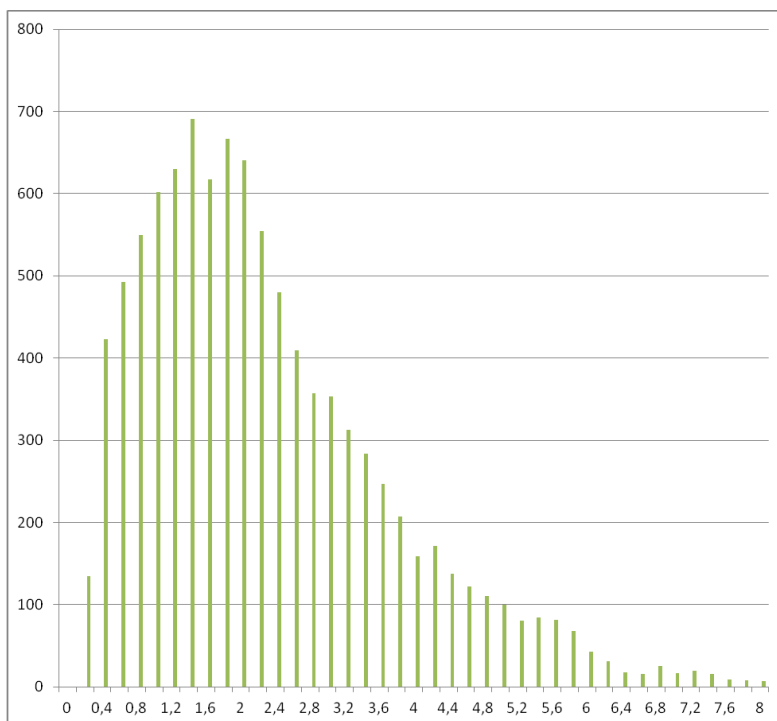


Figure 60 : Distribution des écarts du DistoX n°2. Visées de 10 m, résolution 0.2 m

5. Seconde simulation numérique aboutie

5.1. Objectifs de cette nouvelle simulation

Nous venons de traiter des données sensé être issues de longueurs de visées identiques (par exemple 10 000 visées de 100 mètres de long) pour des longueurs topographiées identiques (par exemple 1 kilomètre de topo). Ce qui impliquait bien évidemment que le nombre de topographies comparées était différent d'un « lot » à l'autre (voir au point 4.2.1).

Mais quand on veut comparer en pratique des topographies réalisées sur une même cavité, on va analyser les données d'une topographie (effectuée selon une certaine technique) et les comparer à celles d'une autre topo effectuée de façon différente. On compare donc les topographies une à une ou deux à deux etc. Ceci implique que dans la réalité le nombre de topos serait fixe dans chaque « lot ».

Une question restait donc en suspens : les constatations sur l'influence de la longueur des visées seront-elles les mêmes si, cette fois, le nombre de topographies comparées statistiquement est fixe ?

5.1. Présentation générale

5.1.1. Principes de base

Pour atteindre ce but il faudrait comparer de nombreuses topographies de la même cavité, donc :

- fixer le nombre de topo/cavité différente à 1,
- fixer la longueur topographiée de cette même cavité (par exemple à 1000 mètres).
- faire varier la longueur d'une visée (pour tester l'influence de cette longueur sur la précision)
- faire varier le nombre de visées ($n=L \text{ totale} / L \text{ visée}$)
- faire varier les erreurs de l'appareil de mesure (pour pouvoir tester leur influence sur la précision).

Il restait donc à imaginer comment faire des comparaisons de X fois (par exemple 100 fois) la topographie d'une seule et même cavité en lui appliquant les variables ci-dessus. Voici une illustration graphique de la proposition de François pour résoudre ce problème (visées de 10 et 50 mètres) :

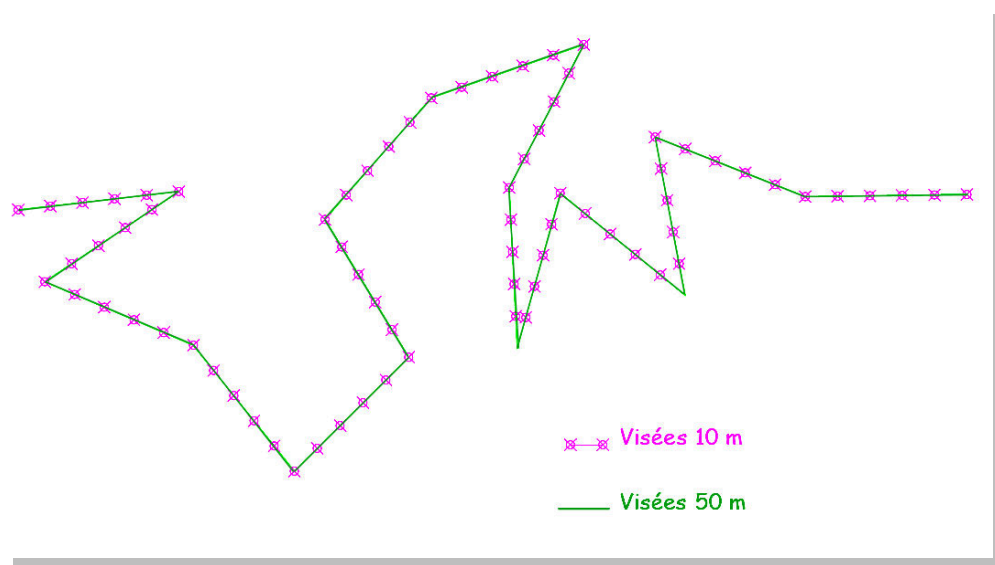


Figure 61 : Visées courtes et longues sur une même topographie

5.1.2. Fonctionnement

Pour bien saisir le fonctionnement de cette dernière simulation, il est préférable de télécharger et d'ouvrir le fichier tableur suivant (format de classeur Excel) : « 5000_itérations_Bruit_1m_coupe_1000m.xls ».

Une fois que vous aurez pris connaissance des précisions sur le fonctionnement de ce tableau ci-dessous, les choses devraient être plus claires et vous pourrez « jouer » avec le classeur.

Dans ce tableau on n'est pas obligé de relancer la macro 'Maxi' qui pour 5000 itérations nécessite une durée pouvant aller jusqu'à une heure (suivant votre matériel). Les valeurs résultantes étant conservées dans le classeur, les graphiques sont valides à l'ouverture du classeur. Ce classeur n'est pas spécifique et on peut y introduire d'autres paramètres que celui de cet exemple (voir **NB** au 5.1.2.2). Si vous souhaitez arrêter la macro une fois lancée, faites 'Ctrl Arrêt défil' ou simplement 'Echap' au clavier puis choisissez 'Fin' dans la fenêtre VB qui s'ouvre (utile si vous n'avez pas diminué le nombre d'itérations et trouvez le temps long). Vous pouvez aussi préférer utiliser le fichier « Propag.003.vierge.xls » qui est une simple mise en forme (pour plus de clarté) du classeur sus-cité mais avec une série d'itérations fixée à 1000 (environ 10 à 15 minutes de traitement), des fautes nulles et la macro désormais intitulée tout simplement 'Macro'.

5.1.2.1. Généralités

La base du travail porte sur une seule grotte virtuelle mesurant 10 km de long et définie par 100 points fixes distants de 100 m les uns des autres. Chaque point est visible du précédent et du suivant. Le tracé de cette cavité est aléatoire (tiré au sort) et chaque instanciation, générée par une macro, produit un nouveau tracé de la grotte.

On topographie la grotte, premièrement avec des visées de 100 m s'appuyant sur les 100 points définissant la grotte. Ensuite on continue par des visées de 50 m colinéaires avec les visées de 100 m, puis avec des visées de 25 m, puis de 12,50 m et enfin de 6,25 m. Les points définissant la grotte ne changent pas de place entre les séances de topographie (100 m / 50 m / 25 m etc.). Il s'agit donc bien de la même cavité virtuelle qui est topographiée 5 fois de suite.

Chaque visée peut être entachée de fautes engendrant des erreurs de mesure. Chaque faute est aléatoire (tiré au sort) et varie dans une fourchette maximum qui est fixée pour toutes les itérations de la grotte (sauf bien évidemment la faute qui est une constante, comme la phase). Les fautes impactant les visées de 50 m sont indépendantes des fautes de la visée de 100 m (sauf leur maximum qui est forcément le même). Cela signifie que le tracé de la topographie finale progresse avec des « petits zigzags » entre le point initial et le point final à 10 km.

- Toutes les feuilles du classeur Excel ont la même structure car on fait d'une feuille à l'autre un fractionnement fixe d'un rapport 2. La feuille 100 m ne faisant pas référence à une feuille 1000 m qui n'existe pas elle est donc un peu spéciale : la colonne F est vide et la colonne G contient la fameuse formule : **=360*ALEA.ENTRE.BORNES(-10000;10000)/10000** qui définit le tracé de la grotte. Les autres feuilles ont un tracé colinéaire avec ce tracé de 100 m en 100 m.
- En F une formule magique **=QUOTIENT(D6+1;2)-1+\$A\$7** détermine le numéro de la ligne de donnée dans la feuille de niveau supérieur.
- En G on a **=INDIRECT(ADRESSE(\$F6;7;1;0;\$A\$6);0)** qui est simplement une formule d'indirection qui permet de récupérer la valeur dans la feuille de niveau supérieur; l'astuce est que le nom de la feuille supérieure est indiqué dans la cellule **\$A\$6**

5.1.2.2. Spécificités

Pour le classeur « 5000_itérations_Bruit_1m_coupe_1000m.xls », nous avons commencé par un exemple sur une seule faute : il s'agit d'un décentrement de 1 mètre **maximum** (valeur fixée dans la feuille 'Présentation'). Ce qui signifie que le point de reprise de la visée suivante n'est pas exactement le point d'arrivée de la visée précédente mais un point qui est éloigné (décalé) d'au maximum 1 m de ce point d'arrivée (valeur aléatoire) et dans une direction par rapport au point d'arrivée qui est quelconque (tiré au sort). On notera que la valeur maxi du décalage est la même quelle que soit la longueur des visées (la valeur réelle du décalage est tirée au sort, comme la direction). Ce principe crée donc un *bruit de faute de mesures*.

NB : nous allons commenter ci-dessous au point 5.1.2.2 les seuls effets de ce décentrement sur la topographie obtenue avec les mesures effectuées. Il a été fixé de façon purement arbitraire dans cet exemple à 1 mètre, ce qui peut bien évidemment sembler énorme par rapport à la réalité. Pour tout autre réglage plus complexe ou plus réaliste des valeurs des fautes sur la feuille 'Présentation', on obtiendrait bien entendu des résultats différents. Nous en reparlerons plus loin au point 5.1.3.

5.1.2.1. Rappel

Les fautes générant des erreurs de mesures et prises en compte dans ce classeur ont déjà été décrites par le menu aux points 4.5 / 4.6 / 4.7 / 4.8. Mais pour vous rafraîchir la mémoire en voici un résumé succinct.

Pour plus de détails veuillez donc vous reporter au chapitre 4.

- **Bruit angulaire** : amplitude maximale d'une faute aléatoire d'angle qui s'ajoute à la valeur vraie du relèvement. Cette faute est indépendante du relèvement lui-même.
- **Décentrement** : diamètre du disque dans lequel on vient repositionner le Disto pour effectuer la mesure suivante. Le Disto est placé DANS le disque (et pas uniquement sur sa circonférence). Le décalage en distance est aléatoire (plus ou moins loin du centre du disque) et la position angulaire dans le disque est également aléatoire. Cette faute est indépendante de la valeur du relèvement.
- **Excentricité et Phase (Non Linéarité)** :
 - **L'excentricité** c'est l'amplitude en degrés d'une sinusoïde représentant une faute de linéarité de l'instrument. Si E est l'excentricité, la non linéarité ajoute au relèvement vrai R une valeur e telle que $e = E \sin(R + P)$.
 - P est la valeur de **Phase**. P permet d'ajuster la position des maxi et mini de la sinusoïde par rapport au relèvement. La phase n'a aucun effet apparent sur les courbes parce que celles-ci représentent des moyennes statistiques de topographies, où le relèvement de chaque visée est aléatoire, ce qui masque les effets de la phase P sur les courbes. Par contre cette Phase influe sur chaque visée prise individuellement, elle est donc indispensable.
- **Décalage Statique** : décalage du nord de l'instrument par rapport au nord magnétique. On ne peut pas mesurer simplement ce décalage en visant le nord car s'ajoutent toujours à la mesure les fautes de linéarité. Cette valeur est indiquée statique mais pour être rigoureux il faut préciser que c'est une constante pour chaque Disto donné, quels que soient la topographie ou le relèvement.

5.1.2.2. Résultats

Ils sont présentés sur la feuille '*Graphiques*'. Les deux graphiques du haut se rapportent à la dernière itération (calcul du classeur effectué par la macro). La colonne de gauche des graphiques montre la grotte sur toute sa longueur de 10 km et la colonne de droite une loupe sur le premier kilomètre après avoir coupé la longueur topographiée à 1000 mètres de l'origine. Ce dernier graphique a été ajouté ici pour pouvoir comparer avec les études précédentes qui utilisaient une longueur maxi de 1000 m.

L'axe des x représente toujours la distance entre l'origine de la topographie et un point courant. On affiche en y une valeur, locale à ce point courant, qui dépend de ce que représente le graphique. On affiche sur le même graphique, dans des couleurs différentes, les valeurs calculées pour chacune des feuilles affectée à une longueur de visée donnée. Evidemment, comme l'axe des x est commun à toutes les feuilles, il y a moins de points pour des visées de 100 m (100 points) que pour des visées de 50 m (200 points) etc.

- La première ligne de graphiques en haut : « Erreur Instantanée » affiche les écarts calculés pour **une seule** topographie (la dernière) et présente un graphique très bruité où les courbes se mélangent beaucoup. On peut faire F9 (comme dans les simulations précédentes) pour afficher d'autres résultats.
- La deuxième ligne : « Erreur Maxi » s'intéresse aux écarts maximum constatés durant les diverses itérations de la grotte produites par la macro. C'est le nombre élevé d'itérations qui réduit le bruit graphique observable. Ces courbes montrent le plus grand écart constaté dans la série et cela pour chacune des longueurs de visées. On voit très clairement que les courbes de couleur ne se mélangent quasiment pas les unes aux autres. Pour les fautes de décentrement on s'aperçoit que les visées courtes produisent des erreurs maxi plus grandes que les visées longues. Ce résultat paraît logique et attendu; néanmoins la valeur des écarts maxi reste raisonnable, même pour des visées de 6,25 m (20 m à une distance 1000 m).
- La troisième ligne : « Erreur Quadratique Moyenne » est la 'racine carrée de la moyenne de la somme des carrés'; c'est la même EQ que celle utilisée dans les études précédentes. L'EQ est réputée prendre assez bien en compte la dispersion (bruit) des écarts. Ici on s'aperçoit que les visées courtes produisent aussi des EQM plus grandes que les visées longues.
- La quatrième ligne : « Ecart Type de l'erreur » ne semblait pas indispensable; elle calcule l'écart type des valeurs constatées lors de toutes les itérations pour la distance à l'origine en x et pour chaque longueur de visée. On trouvera en annexe au point 9. ce qu'est l'écart type. Cet écart-type est lui aussi plus important pour les visées courtes.
- La cinquième ligne : « Erreur Moyenne ». C'est tout simplement la moyenne algébrique des écarts (la somme des écarts divisée par le nombre d'écarts). L'erreur moyenne encore et toujours plus grande quand les visées sont plus courtes.

On peut donc en conclure sans équivoque possible que pour ce qui concerne l'erreur de décentrement, les visées courtes sont défavorables à l'exactitude de la topographie. C'est tout à fait logique, car plus on multiplie les visées plus on va cumuler ces erreurs les unes aux autres (voir point 4.6).

5.1.3. Autres configurations possibles

Comme nous l'avons dit au 5.1.2.2, ce classeur permet dans l'onglet de la feuille '*Présentation*' de modifier les valeurs des fautes engendrant les erreurs de mesures. Il est donc possible d'isoler l'effet de chacune

d'entre elles et d'observer son influence sur la qualité de la topographie et en particulier son influence en fonction de la longueur des visées, puisque tel était notre objectif. Cela permettra également de vérifier si, cette fois, en comparant un nombre de topographies identique les résultats sont du même ordre que lors de la première simulation (voir point 4.) où le nombre de topographies était variable.

Nous avons donc effectué plusieurs transformations des valeurs des fautes, comme vous pourrez le faire vous-même en expérimentant le fichier « *Propag.003.vierge.xls* ». Pour chaque « réglage » nous avons réenregistré le fichier avec un nom différent et observé, en les comparant, les divers graphiques obtenus. Pour alléger le package nous ne fournirons pas ces différents fichiers mais vous pouvez aisément les reconstituer vous-même.

5.1.4. Constats

Il serait bien entendu possible d'effectuer des dizaines de simulations, voire bien plus encore et nous vous encourageons à le faire à l'aide du fichier « *Propag.003.vierge.xls* ».

Nous nous contenterons ici d'examiner quatre exemples : bruit angulaire de 1° , décentrement de 0.1 m (en effet 10 cm de décalage maximum au moment de repositionner le Disto, bien que déjà assez important, semble bien plus réaliste qu'un mètre), non linéarité de 1° (d'excentricité et de phase), décalage statique de 1° .

- **bruit angulaire** : l'avantage¹⁷ est ici aux visées courtes. Pour une valeur d'un degré on obtient une erreur moyenne de 9 mètres et une erreur maxi de 27 m pour 10 km topographiés. Il faut noter que la progression est presque linéaire : en effet pour un bruit angulaire double (2°), l'erreur moyenne passe à 17 m et l'erreur maxi à 65 m pour 10 km topographiés.
- **décentrement** : on a déjà vu que dans ce cas l'avantage¹⁷ est aux visées longues. Qu'en est-il alors qu'on a divisé par 10 la valeur du décentrement (10 cm au lieu d'un mètre comme au 5.1.2.2) ? Maintenant l'erreur moyenne est passé de 20 m à 2 m et l'erreur maxi de 70 m à 6 m pour 10 km. La progression est donc régulière.
- **non linéarité** : ici il n'y a aucune incidence de la longueur des visées sur l'exactitude de la topographie (les lignes des graphiques sont superposées). Avec une valeur d'un degré (E et P) on obtient une erreur moyenne de 88 mètres et une erreur maxi de 115 m pour 10 km topographiés. On s'aperçoit immédiatement que la non linéarité a une influence bien plus importante sur les erreurs de mesure que les autres fautes. En divisant par deux les valeurs ($1/2$ degré pour E et P) les erreurs moyenne et maxi sont aussi divisées par deux, passant respectivement à 44 m et 53 m pour 10 km topographiés.

Les effets de cette erreur sont les plus redoutables parmi ceux que nous avons étudiés. Quel que soit le type d'appareil de mesure des gisements utilisé, c'est donc celle-ci qu'il faut s'évertuer à corriger en priorité. La figure qui suit montre que les erreurs sont comprises entre -3° et $+3^\circ$ pour un coefficient d'excentricité minime de 0,052 ! Pour mémoire sur le calcul de ce coefficient e/R , voir la **Figure 39 : Représentation géométrique de l'excentricité d'un compas.**

¹⁷ Le mot « avantage » signifie ici « qui induit une topographie plus exacte et moins entachée d'erreurs ».

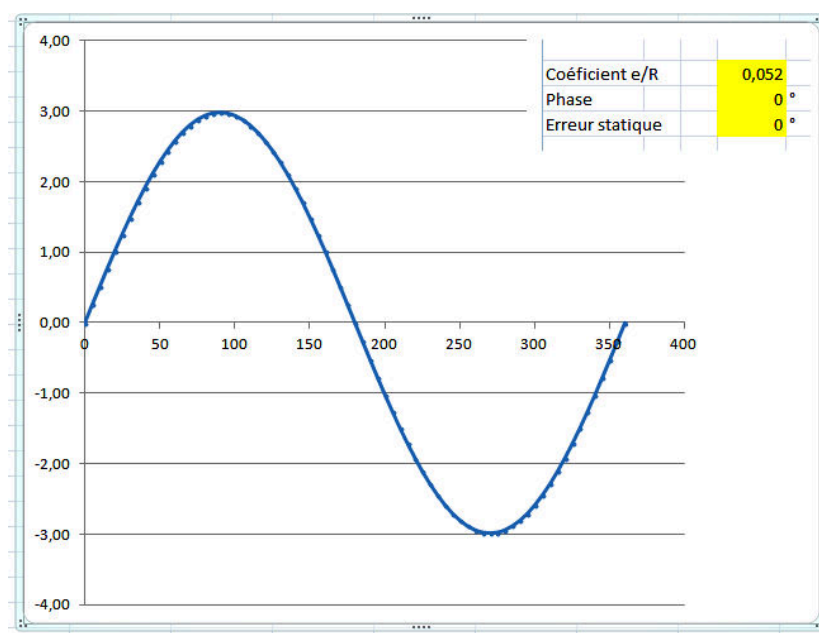


Figure 62 : Sinusoïde de non linéarité (excentricité) +/- 3°

Concrètement, pour un petit compas de la taille d'une boussole de randonnée ayant une rosace de 4.5 cm de diamètre (22.5 mm de rayon) ce coefficient correspondrait à une excentricité de la rosace de $0.052 \times 22.5 = 1.17$ mm. Pour descendre à une erreur plus raisonnablement acceptable de +/- 1° il faut arriver à un coefficient de 0.0174 soit un décentrement de $0.0174 \times 22.5 = 0.3915$ mm. Ce qui fait quatre dixièmes de millimètre de décalage de la rosace pour que les mesures de gisement varient au maximum de 2 degrés (en valeur absolue). Il est donc très important que l'appareil soit de grande qualité, mais aussi et surtout que ses mesures soient correctement corrigées !

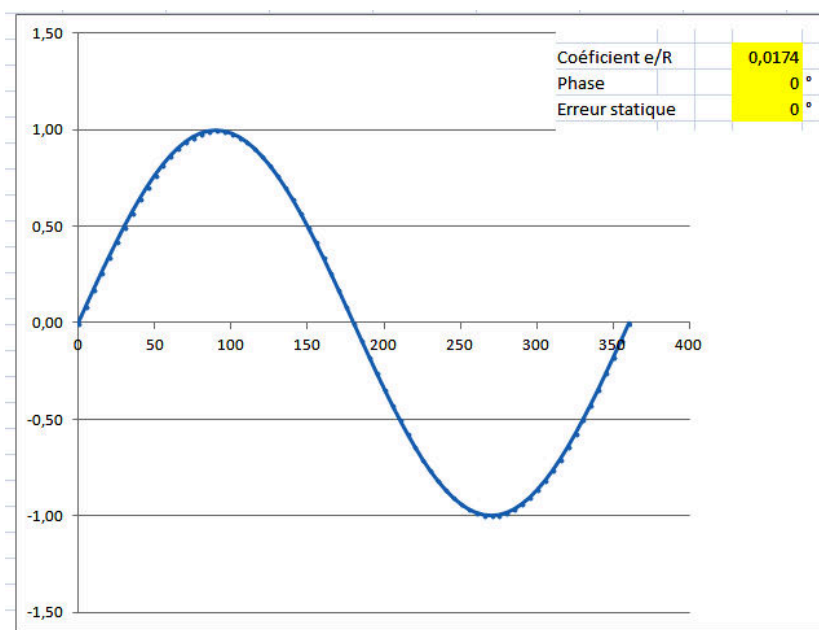


Figure 63 : Sinusoïde de non linéarité (excentricité) +/- 1°

- **décalage statique** : ici encore il n'y a aucune incidence de la longueur des visées sur l'exactitude de la topographie (les lignes des graphiques sont superposées). Avec une valeur d'un degré on

obtient une erreur moyenne de 17 mètres et une erreur maxi de 43 m pour 10 km topographiés. Nous avons là la seconde faute ayant la plus grande incidence sur les erreurs de mesure après la non linéarité. Il faut noter que la progression est presque linéaire : en effet pour un bruit angulaire double (2°), l'erreur moyenne passe à 31 m et l'erreur maxi à 100 m pour 10 km topographiés.

- **Un cas particulier** (parmi tant d'autres) : un instrument de mesure (compas ou Disto) est généralement entaché de plusieurs fautes différentes et à des degrés divers. Comme on l'a vu certaines de ces fautes étant statiques et d'autres variables, une combinaison de plusieurs d'entre elles à certaines valeurs peut rendre l'influence de la longueur des visées totalement neutre. Les erreurs liées à des fautes statiques masquent alors l'avantage aux visées courtes que nous avons pu déceler par ailleurs.

Dans le package de fichiers à télécharger¹⁸ vous trouverez un exemple illustrant ce phénomène, il s'agit du classeur intitulé : « *Propag.001.1000.mixte.0.018.04.01.0.dom.xls* »

5.1.5. Conclusions

Nous avons pu constater l'influence prépondérante de la faute de non linéarité qui dégrade très vite les mesures. Il n'est donc pas étonnant que les premiers utilisateurs de DistoX ayant ce genre de souci sur les capteurs de leur appareil aient rencontré de très grosses difficultés à descendre le coefficient d'étalonnage de référence au-dessous de 0.5 (tel que préconisé par le mode d'emploi). Après l'adjonction d'un algorithme de compensation de non linéarité (option NL sur PocketTopo et sur TopoDroid) les résultats furent effectivement bien meilleurs.

Quant au fait que le décentrement n'ait pas une très grosse influence, que cela ne vous incite par pour autant à bâcler le positionnement de votre distancemètre sur un point topo précisément matérialisé : ce n'est pas si difficile à réussir !

6. Comparaison de topographies

Pour compléter ce qui précède par une note plus concrète et proche de la réalité du terrain, nous allons présenter un cas portant sur des topographies souterraines effectuées par nos soins.

6.1. Un exemple de plan faussé, la « Caverne du Maure » (34)

Nous possédons plusieurs relevés topographiques d'une seule et même cavité (la Caverne du Maure dans l'Hérault, au-dessus de la vallée de la Vis) dont un (au moins) a été fait avec un DistoX mal étalonné. L'avantage de cette topographie c'est que la cavité étant quasi rectiligne, nous pouvons visualiser facilement sur le plan les conséquences d'éventuelles erreurs.

Nous allons donc nous servir de ce graphique pour tester ce premier modèle informatique. En superposant les topographies de Domi et de Philippe, on aperçoit bien le décalage angulaire entre les deux cheminements (lorsque l'un des appareils était mal étalonné). Dans le cas présent, on voit que la topographie « tourne » autour de son point d'origine, ce qui ferait penser à une erreur statique (voir point

¹⁸ Pour télécharger les différents fichiers tableur utilisés dans cet article, aller sur : http://souterweb.free.fr/boitaoutils/topographie/annexes/Fichiers_a_telecharger.zip

4.8). Par extrapolation on comprend que dans ce cas il n'y a aucun espoir de voir les erreurs finir par se compenser : plus la topo va s'allonger, plus elle sera faussée.

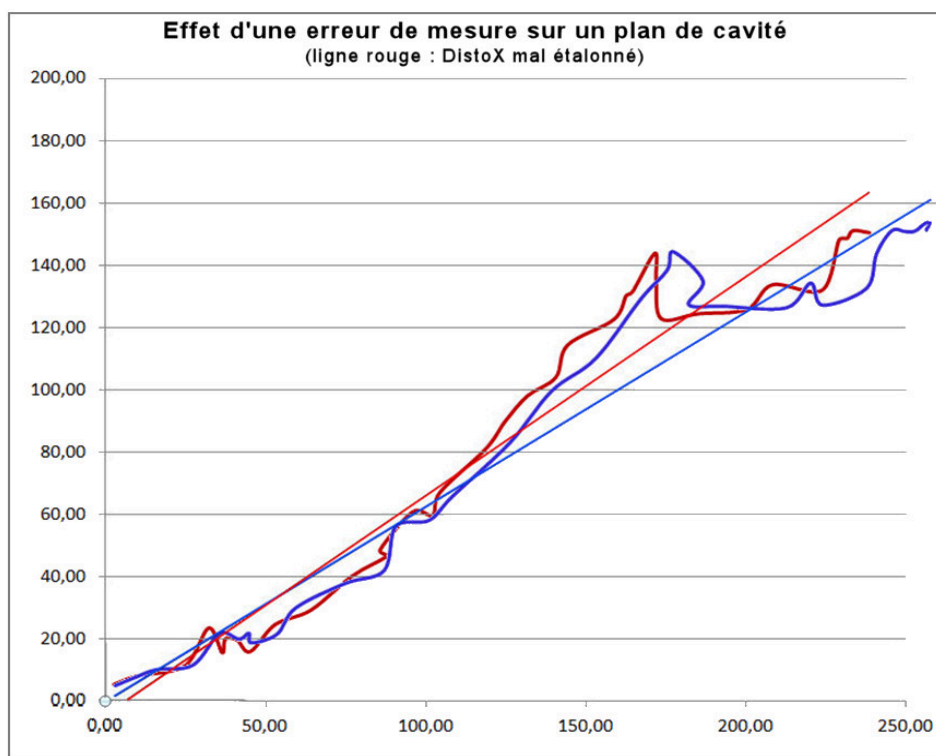


Figure 64 : Deux cheminements topographiques dont un est erroné

Attention : Sur ce graphique, les lignes de couleur ne se chevauchent quasiment jamais et n'ont pas la même longueur car les deux cheminements n'ont pas utilisé les mêmes stations, chacun des opérateurs ayant progressé et topographié indépendamment de l'autre. Seule la ligne de tendance illustre donc clairement l'inexactitude d'une des deux topographies.

Comme nous venons de le voir ci-dessus et au point 2.2, un mauvais étalonnage de l'appareil donne des mesures difficilement exploitables, car trop éloignées de l'erreur maximum acceptable et que l'on peut considérer tout simplement comme fausses.

6.2. Généralisation à des topographies théoriques

Il est tentant maintenant de « jouer » avec la simulation numérique et, à l'aide du graphique représentant le cheminement (dont nous avons parlé en début d'article au point 4.2.1), de simuler des topographies obtenues avec des appareils plus ou moins fidèles ou plus ou moins justes. Il suffit pour cela d'ajuster les variables comme bon nous semble, d'appuyer ensuite sur F9 et d'observer le résultat.

Pour l'instant le modèle ne permet pas de superposer automatiquement plusieurs topographies différentes obtenues de cette façon. Nous l'avons donc fait pour vous manuellement (avec un logiciel de traitement d'image) pour vous permettre de voir concrètement quelle serait la différence entre deux plans superposés :

- ✓ le premier étant le plan exact théorique sans aucune erreur,
- ✓ le second étant le plan obtenu avec les erreurs paramétrées.

Nous avons répété cette opération deux fois. Voici ci-après les topographies planes obtenues :

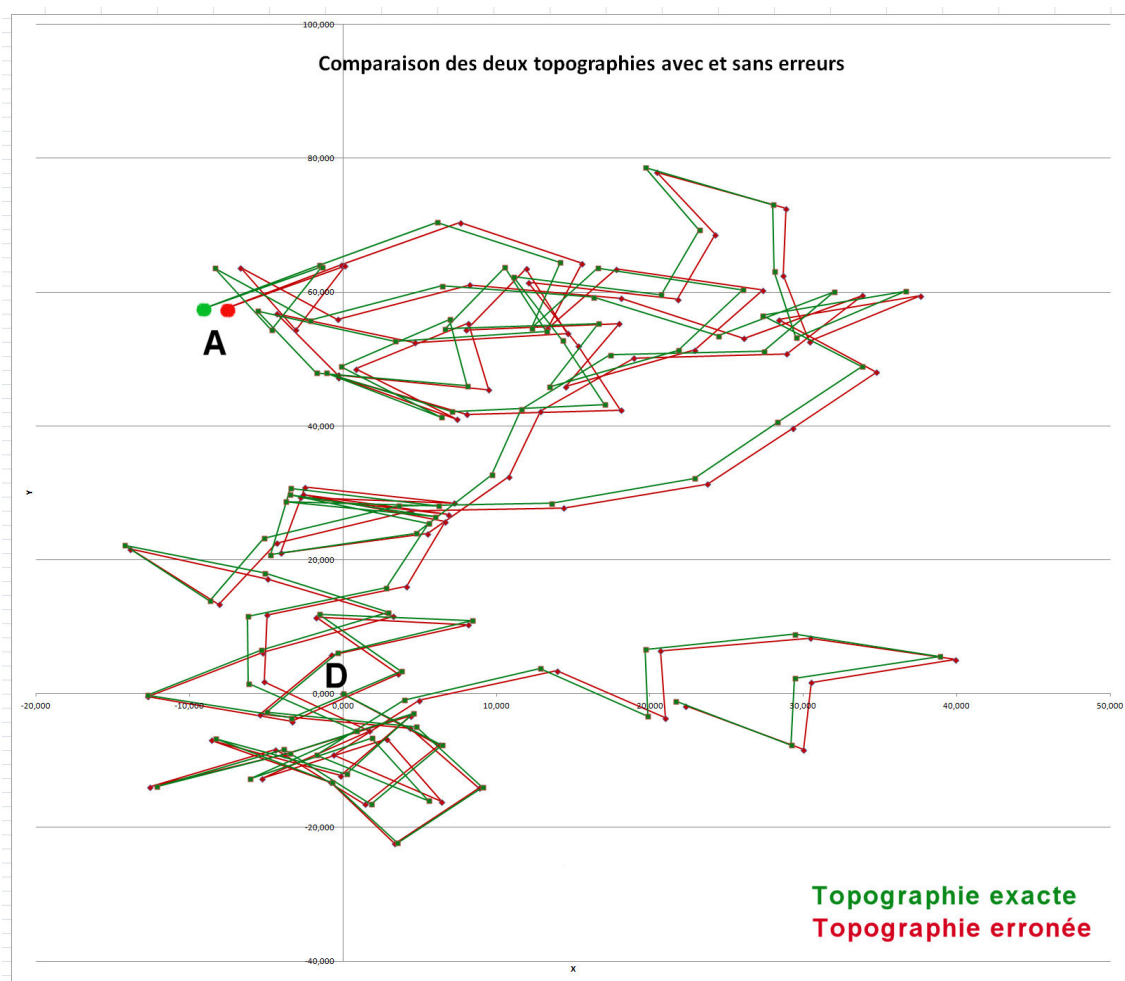


Figure 65 : Bruit $\pm 2^\circ$ et décentrement 0,1 (topographie virtuelle de 100 visées)

Dans ce premier cas, le bruit a été fixé à une valeur très forte de $\pm 2^\circ$. Le point « D » marque le départ de la topographie (c'est à dire le point 0, 0) ou par exemple, dans la réalité, l'entrée de la cavité. Le point « A » indique lui l'arrivée de la topo, l'endroit où le topographe s'est arrêté. On peut constater qu'il y a des zones où les lignes se confondent presque et d'autres où elles divergent plus fortement, le décalage allant globalement en augmentant.

Sur la seconde figure, nous sommes revenus à des valeurs d'erreur beaucoup plus réalistes et proches de celles fournies par un bon instrument correctement étalonné (bruit $\pm 0.5^\circ$ et décentrement 0.1). Cette fois, les deux cheminements sont très proches et l'écart final est encore raisonnablement réduit. Si cette topographie était celle d'une cavité aux galeries assez larges, on pourrait la considérer comme de tout à fait bonne qualité.

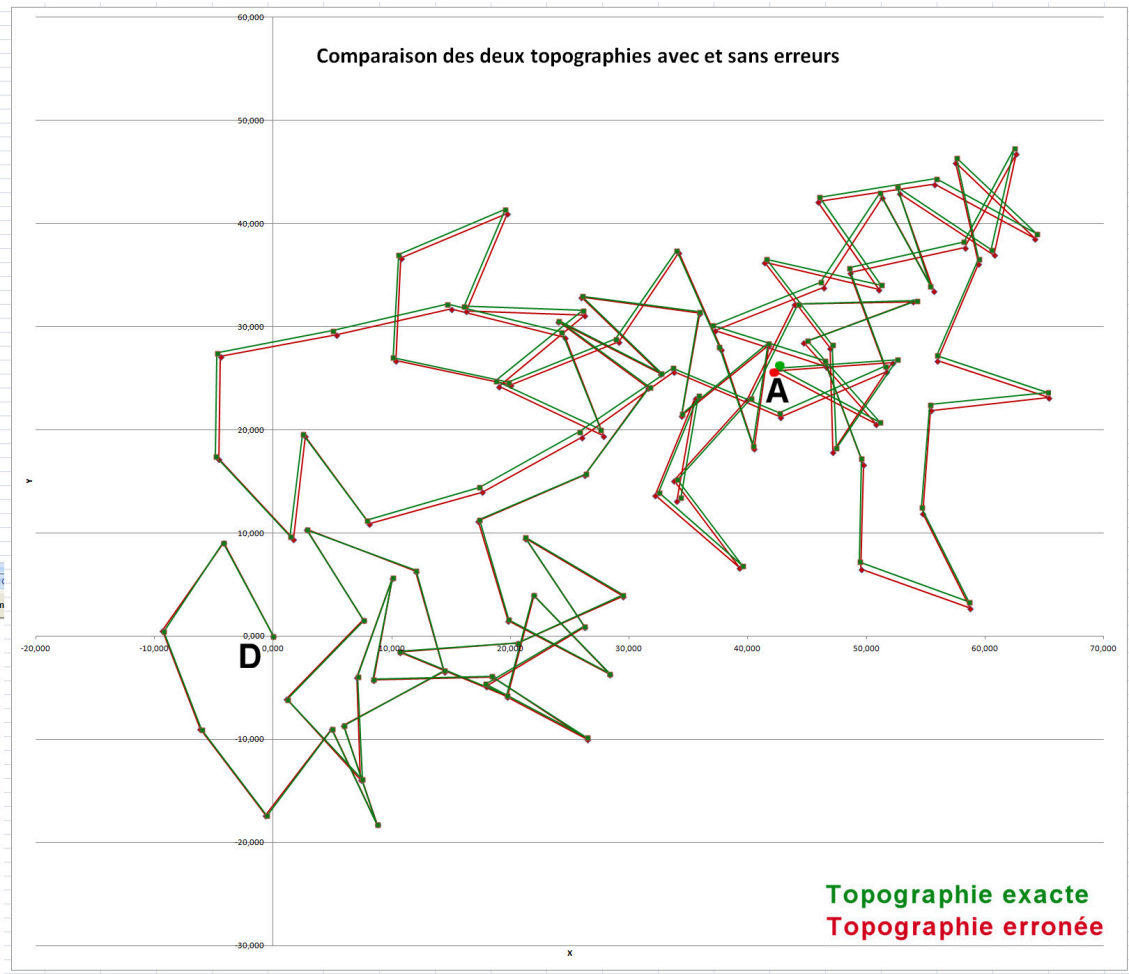


Figure 66 : Bruit +/- 0.5° et décentrement 0,1 (topographie virtuelle de 100 visées)

7. Réflexions sur la compensation des erreurs topographiques

7.1. Généralités

7.1.1. Redondances

Quelles que soient les précautions prises, lors des mesures, les propriétés fondamentales des triangles ne sont numériquement jamais satisfaites même lors d'opérations géodésiques de très haute précision. On sait, par exemple, que la somme des angles aux sommets d'un triangle vaut un angle plat (180°). Lors d'une triangulation (mesure des angles) on constate donc nécessairement que les points sont mal placés sur la topographie dès qu'on relie les sommets.

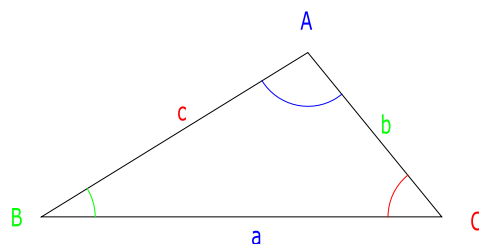


Figure 67 : Un peu de triangulation...

Si on ajoute à la valeur des angles la mesure des côtés, l'ensemble devrait satisfaire à la relation :

$$\frac{a}{\sin \hat{A}} = \frac{b}{\sin \hat{B}} = \frac{c}{\sin \hat{C}}$$

En mesurant les 3 angles et les 3 côtés, on a donc des données redondantes. La mesure des trois côtés suffit pour définir un triangle, comme celle d'un côté et de deux angles ou de 2 côtés et d'un seul angle. C'est l'exploitation des redondances, sur divers critères, qui va conduire à la compensation et on ne retiendra, in fine, qu'un seul triangle compensé.

Dans le cadre d'une topographie spéléo ordinaire nous ne disposons pas d'autant de redondance. En effet, dans le cas général on parcourt une polygone dans la cavité depuis un point Début vers un point Fin.

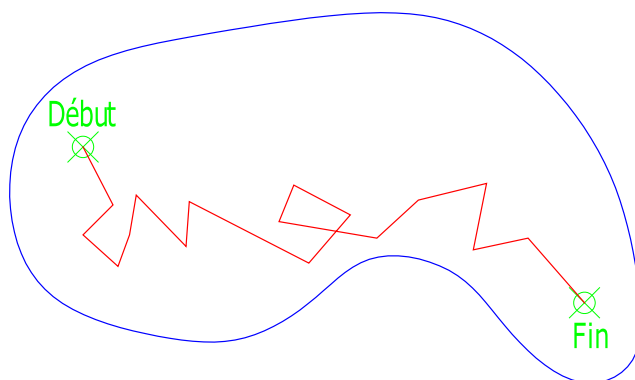


Figure 68 : Une topographie aléatoire entre deux points fixes connus

Même si la position du point Début est connue, il n'y a aucune redondance et on ne peut pas mettre en œuvre de compensation.

Nous allons étudier deux situations où une opération de compensation est possible :

- Points de début et de fin distants et connus
- Points de début et de fin confondus (bouclage)

Au préalable nous étudierons les moyens d'établir une simulation numérique du sujet, les deux situations étant un peu du même type.

7.1.2. Simulation pour compensation

Une fois de plus on a recours à Excel. Une feuille du classeur va créer une topographie quelconque :

- Point de départ sur 0,0,
- Gisement du point suivant aléatoire mais permettant de fixer, éventuellement, une direction générale et une excursion des gisements aléatoires autour de cette direction générale. On garde la possibilité de fixer à $\pm 180^\circ$ l'excursion ce qui produit une topographie aléatoire sans direction favorisée.
- Distance au point suivant aléatoire mais là aussi on fixe une limite inférieure et une limite supérieure.
- nombre de points : 100

Nous voulons normaliser la simulation pour une distance topographiée de 1000 m. Une astuce dans la feuille permet d'identifier le dernier point, juste avant que la distance topographiée ne dépasse 1000 m. La feuille supporte 100 visées et on atteint la distance de 1000 m bien avant d'être au bout de la 100^{ème} visée.

Au travers d'une macro en Visual Basic, on examine la distance entre ce dernier point avant 1000 m et le point 0,0. On compare cette distance à une fourchette qui est spécifique au cas de figure étudié.

- Si le critère est satisfait : on photographie (on gèle cette topographie) et on utilise les valeurs de cette topographie.
- Si le critère n'est pas satisfait, on abandonne cette topographie et on en calcule une nouvelle

Un mécanisme de protection fait en sorte qu'au bout de 1000 tentatives de calcul de la topo restées sans solution dans la fourchette définie, la macro rend la main.

7.1.3. Points de début et de fin distants et connus

Le cas suivant illustre la topographie d'une cavité permettant une traversée. On suppose la possibilité de partir d'un point référencé par exemple par GPS et d'arriver sur un autre point, lui aussi référencé par GPS.

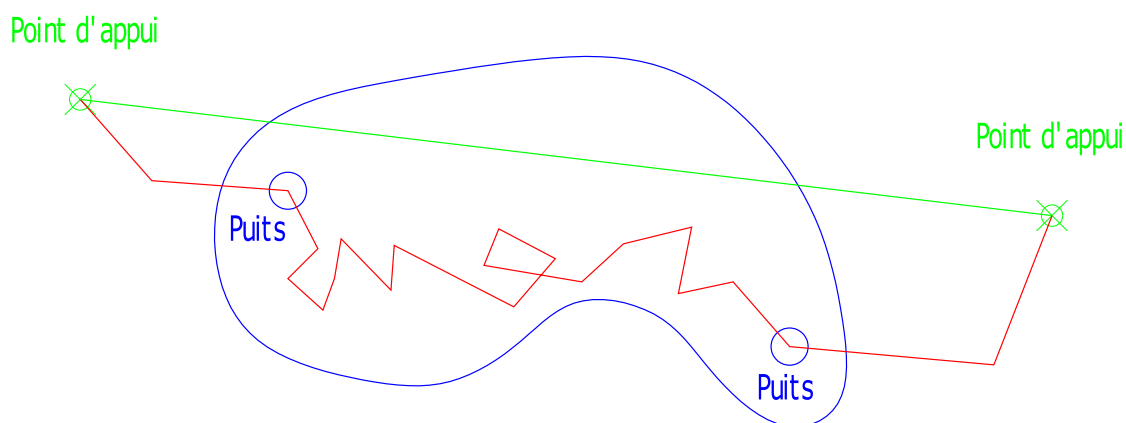


Figure 69 : Topographie simulée d'une traversée

Pour la simulation, le critère pour retenir la topo aléatoire est que les extrémités de la topo sont distantes d'une longueur dont on fixe le maximum et le minimum admissible. On a donc en fait pris le problème à l'envers mais la topographie satisfait aux critères de l'étude.

7.1.4. Points de début et de fin confondus (bouclage)

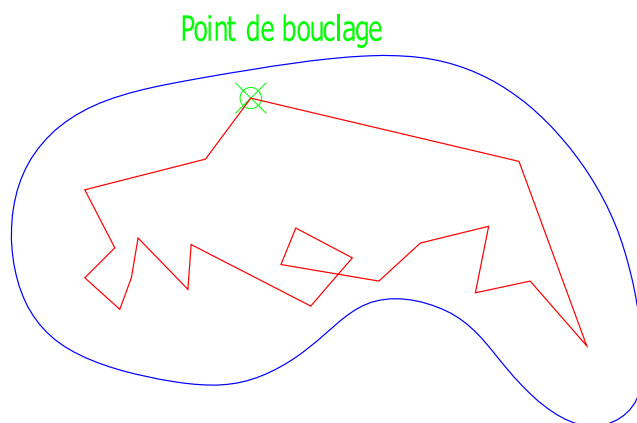


Figure 70 : Topographie simulée d'une boucle

Dans cette simulation, le critère pour retenir la topo aléatoire est que les extrémités de la topo aléatoire soient distantes d'une longueur dans la fourchette maximum et minimum admissible pour les autres points de la topo. Là aussi on prend le problème à l'envers. On ajoute un vecteur supplémentaire à la topo qui relie ce dernier point avant 1000 m et le point 0,0. On normalise la longueur totale à 1000 m. La topographie est donc aléatoire mais bouclée sur elle-même et les distances entre points sont quasiment toutes dans la fourchette.

7.2. Méthode de compensation (points de début et de fin distants et connus)

7.2.1. Répartition de l'erreur en fonction de la longueur de la visée

7.2.1.1. Principe

Le croquis suivant montre le vecteur d'erreur entre la position calculée à partir des visées entachées d'erreurs et le point final imposé (réputé exact).

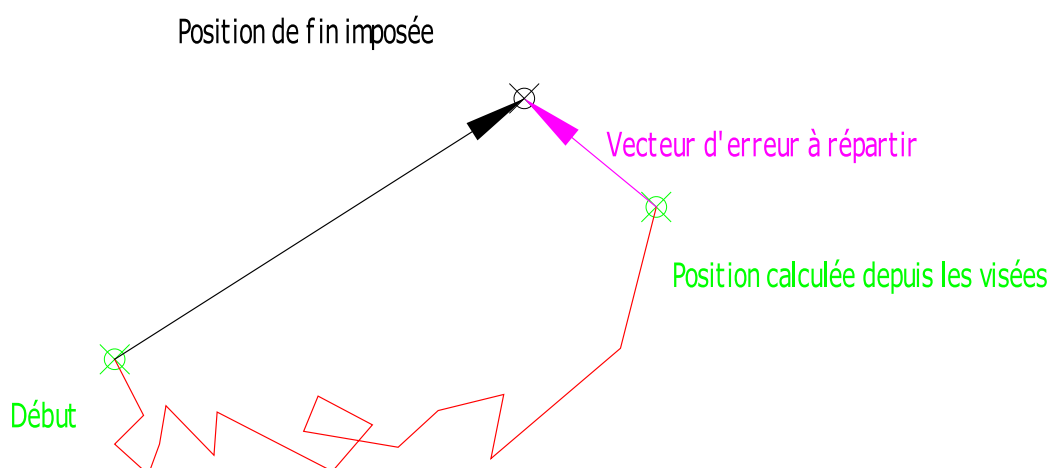


Figure 71 : Vecteur d'erreur à répartir sur une traversée

Le principe est de répartir ce vecteur sur chaque extrémité de visée, au prorata de la longueur de ladite visée. De proche en proche, en ajoutant ces petits vecteurs, le point de la position calculée va se superposer à celui de la position de fin imposée. Le point début reste lui inchangé.

Dans les exemples qui vont suivre, il s'agit de la même topographie de base (exacte) avec les paramètres suivants :

Longueur minimum des visées		5	m
Longueur maximum des visées		50	m
Longueur totale de la topo		1000	m
Longueur minimum du segment de référence (début - fin)		200	m
Longueur maximum du segment de référence (début - fin)		300	m
Gisement nominal de la topographie		0	°
Ecart crête du gisement de la topographie	±	180	°
Bruit crête	±	10	°
Longueur maxi du décentrement		0,00	m
Angle crête de non linéarité	±	0,0	°
Phase de la non linéarité		0,0	°
Décalage du zéro		0	°
Longueur moyenne des visées spécifiées		27,50	
Nombre de visées prises en compte		32	
Ecart crête des visées spécifiées		22,50	m
Longueur minimale des visées (constatée après normalisation)		5,26	m
Longueur maximale des visées (constatée après normalisation)		50,73	m
Longueur moyenne des visées (constatée après normalisation)		31,25	m
Longueur du vecteur d'erreur compensé		10,23	m

Longueur servant de référence entre les deux points connus	293,92	m
--	--------	---

Dans les exemples qui suivent :

- La courbe verte est la représentation des points exacts de la topographie.
- La courbe rouge est l'image du résultat des mesures (intégrant donc des erreurs).
- La courbe bleue montre la position des points calculés après compensation.

ATTENTION les échelles des graphiques ne sont pas toujours les mêmes.

7.2.1.2. Décalage du zéro

L'exemple choisi ici introduit une erreur énorme de décalage du zéro de 30° (sens trigonométrique) afin de bien montrer le mécanisme.

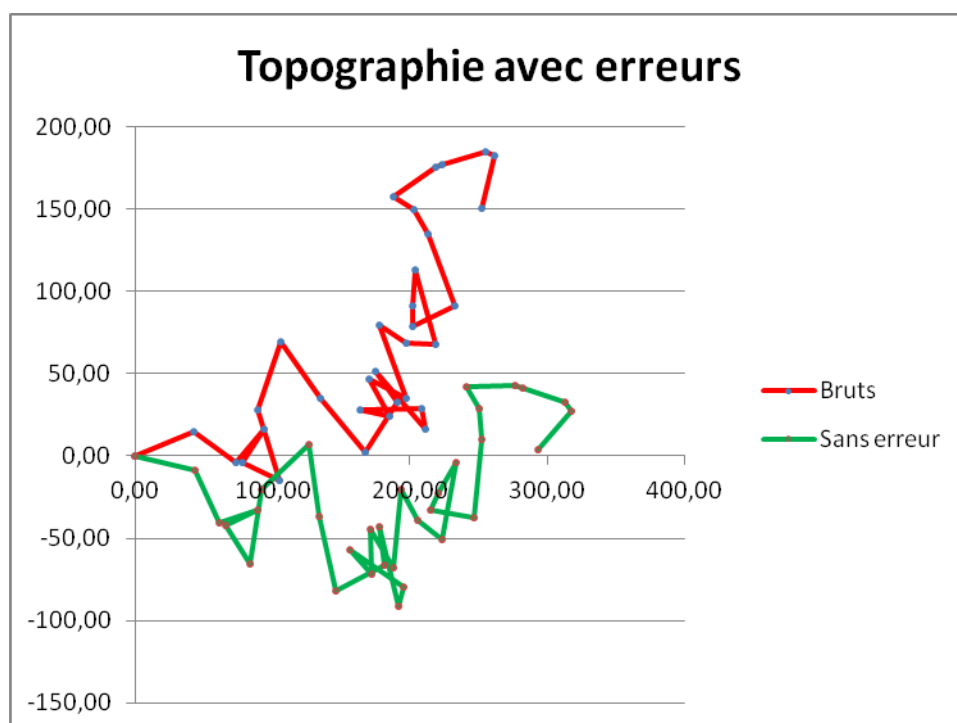


Figure 72 : Comparaison des mesures exactes et erronées (décalage du 0), traversée

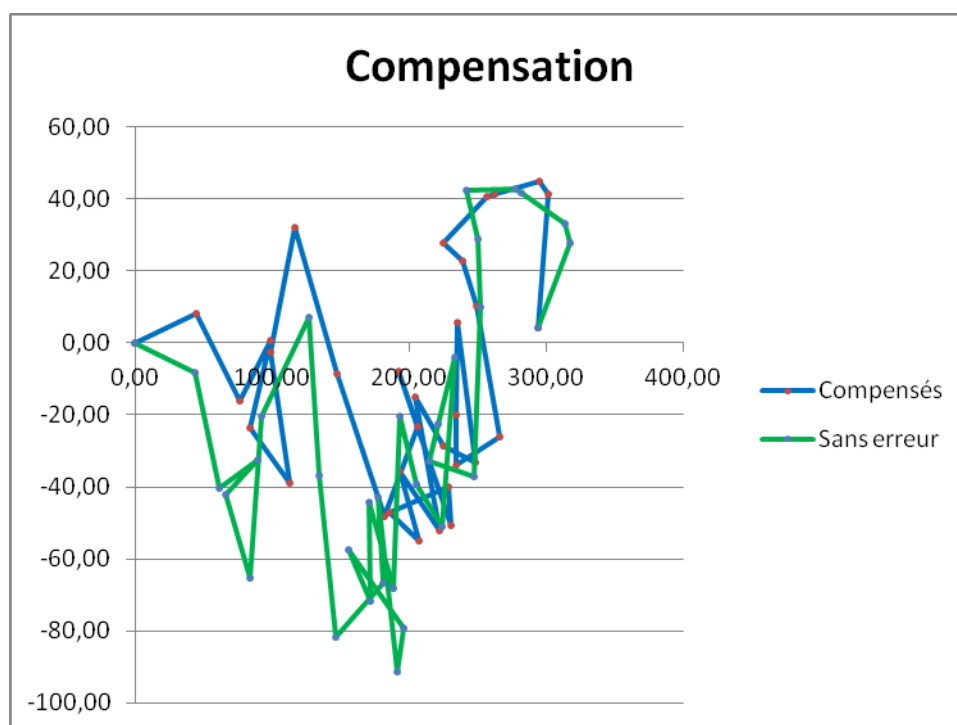


Figure 73 : Comparaison des mesures exactes et compensées (décalage du 0), traversée

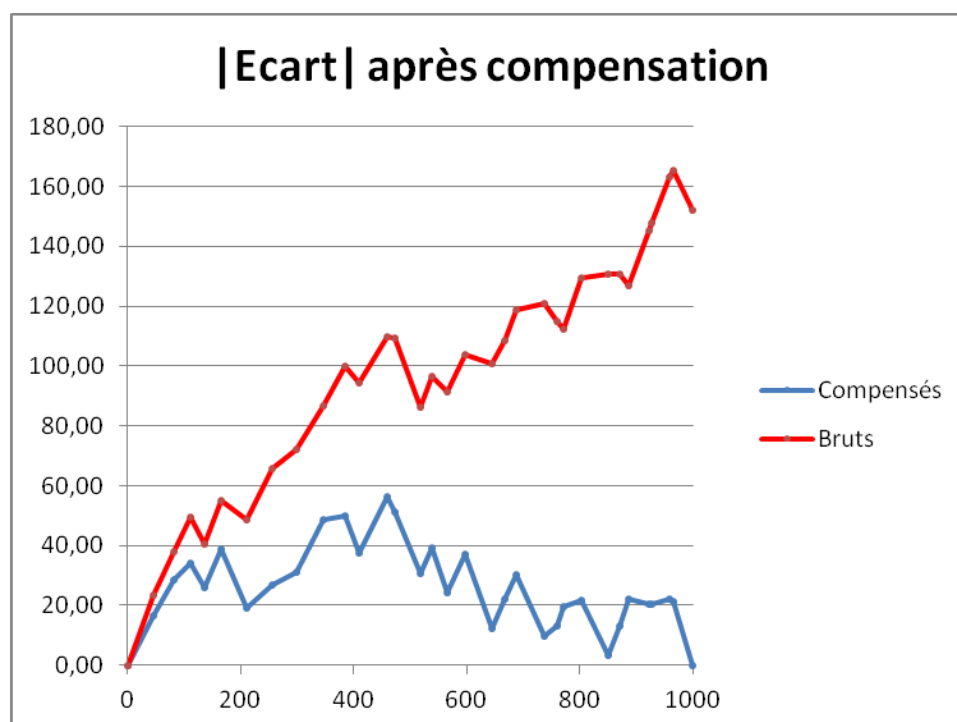


Figure 74 : Écart avant et après compensation (décalage du 0), traversée

On voit donc que dans cet exemple, l'erreur de position a été très notablement diminuée. Elle était au maximum de 165 m en extrémité de topo. Après compensation elle ne dépasse pas 60 m en cours de topo. Pour ce type d'erreur, la courbe bleue est toute entièrement sous la courbe rouge.

7.2.1.3. Non linéarité

Si l'erreur, pour la même topographie, n'est qu'une non linéarité de l'instrument de $\pm 2''$ la figure suivante montre l'efficacité de la compensation :

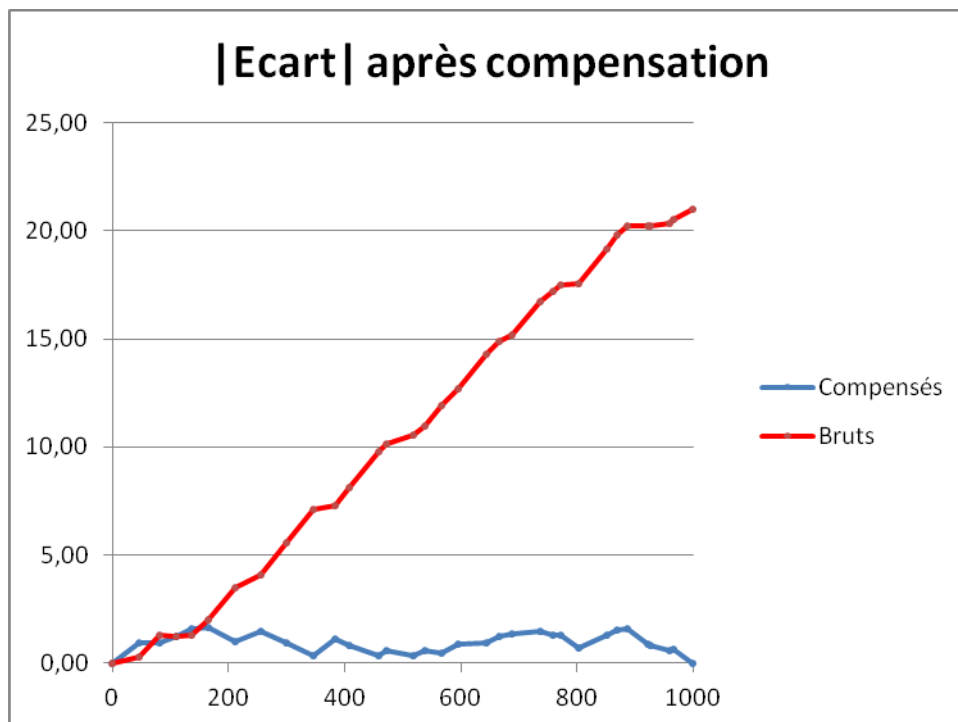


Figure 75 : Écart avant et après compensation (NL), traversée

7.2.1.4. Décentrement

Si les erreurs de mesures sont produites par un décentrement (aléatoire) d'un maximum de 10 cm, suivant la répartition des erreurs le résultat est plus ou moins pertinent. On peut avoir ceci :

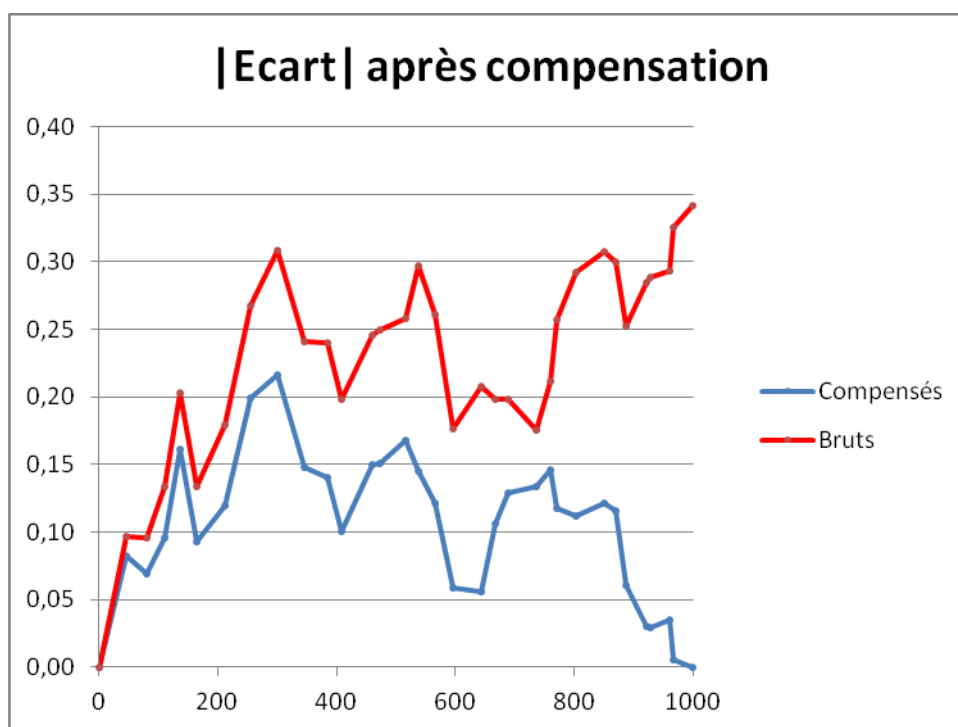


Figure 76 : Écart avant et après compensation (décentrement), traversée, essai 1

Mais en fonction de la combinaison des erreurs, si à la fin des 1000 m la compensation réduit bien l'erreur, ce n'est pas forcément toujours le cas en cours de route :

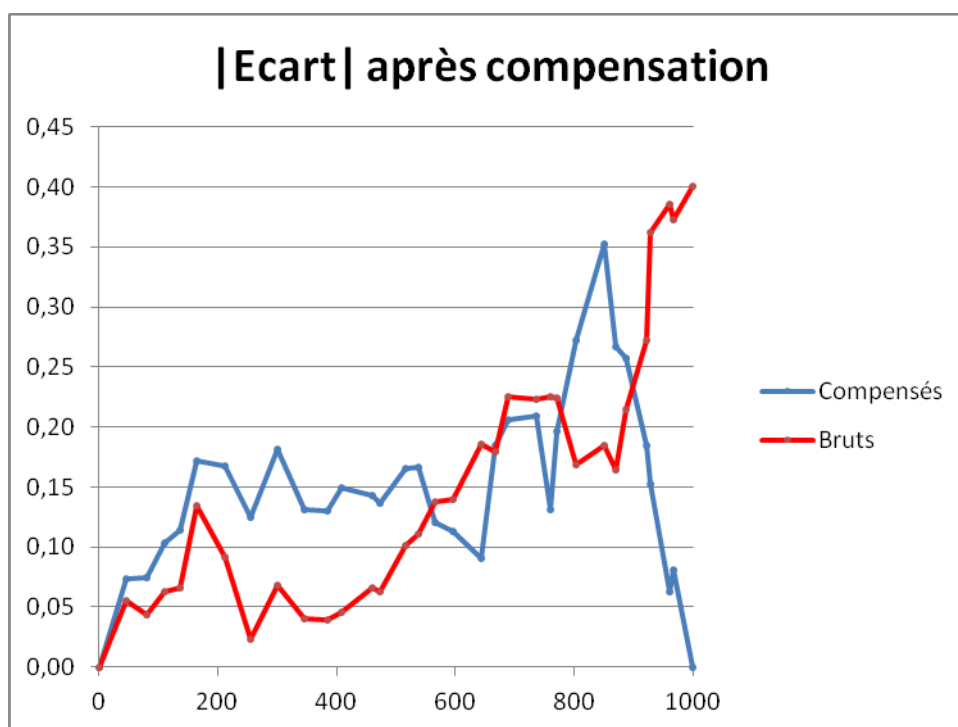


Figure 77 : Écart avant et après compensation (décentrement), traversée, essai 2

7.2.1.5. Bruit de mesure

Si les erreurs de mesures sont produites par un bruit sur la mesure d'angle (aléatoire) d'un maximum de 10° , suivant la répartition des erreurs le résultat est plus ou moins pertinent. On peut obtenir ceci :

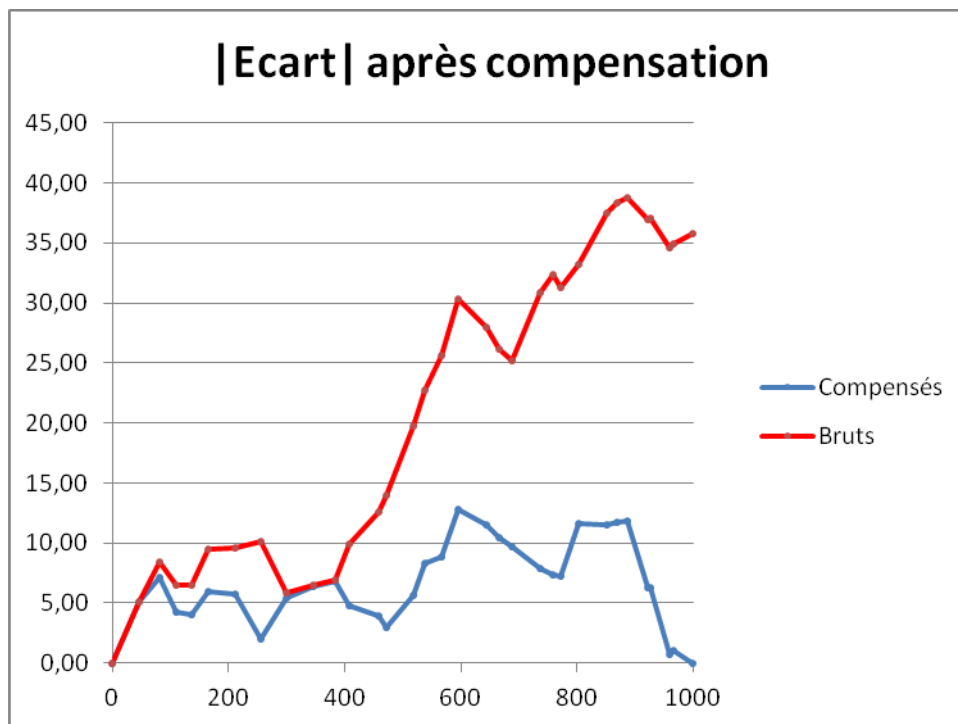


Figure 78 : Écart avant et après compensation (bruit), traversée, essai 1

Ou bien cela :

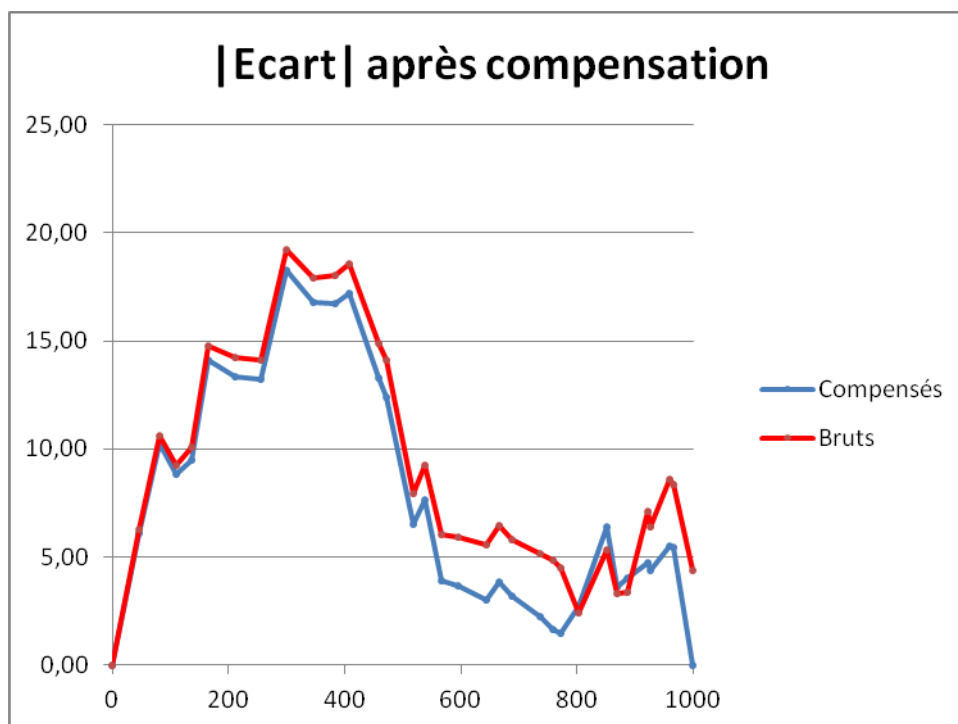


Figure 79 : Écart avant et après compensation (bruit), traversée, essai 2

Voire même bien pire :

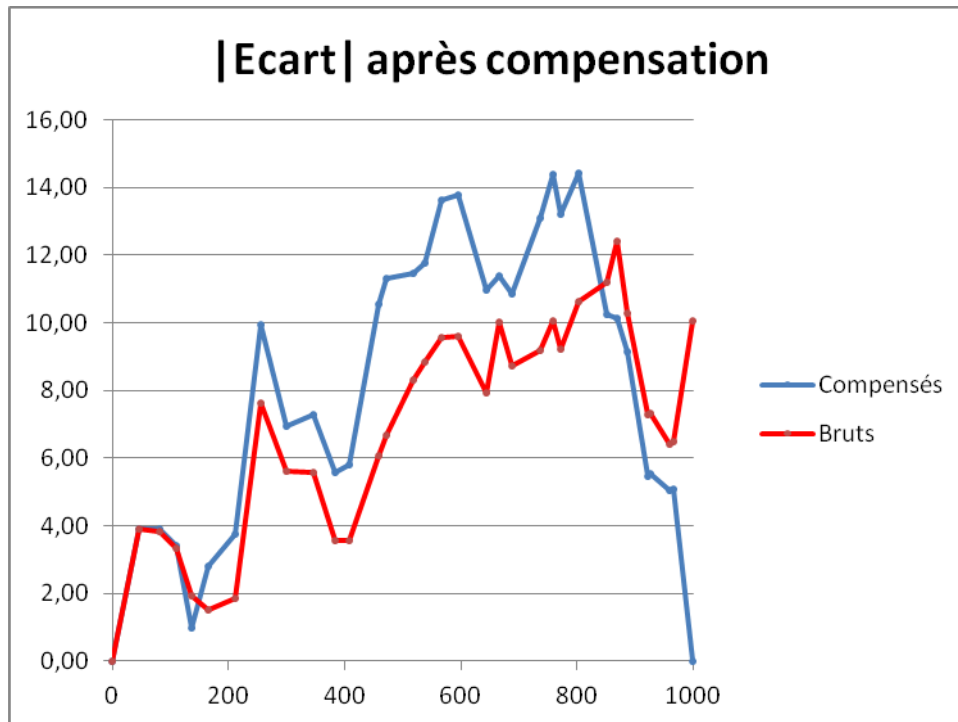


Figure 80 : Écart avant et après compensation (bruit), traversée, essai 3

7.2.1.6. Conclusion provisoire

Évidemment on ne sait pas dans quel cas de distribution des erreurs (par rapport à la distribution des visées de la topographie) on se trouve. Il va donc falloir étudier les conséquences de la normalisation sur un grand nombre de cas. Cette étude statistique devra se faire en laissant tous les paramètres fixes mais avec :

- un dessin de la topographie différent,
- une répartition statistique différente des erreurs.

7.3. Méthode de compensation (points de début et de fin confondus : bouclage)

7.3.1. Répartition de l'erreur en fonction de la longueur de la visée

7.3.1.1. Principe

Le croquis suivant montre le vecteur d'erreur entre la position calculée à partir des visées entachées d'erreurs et le point de début. Pour que la topographie soit exacte, le point de début et le point de fin devraient être superposés.

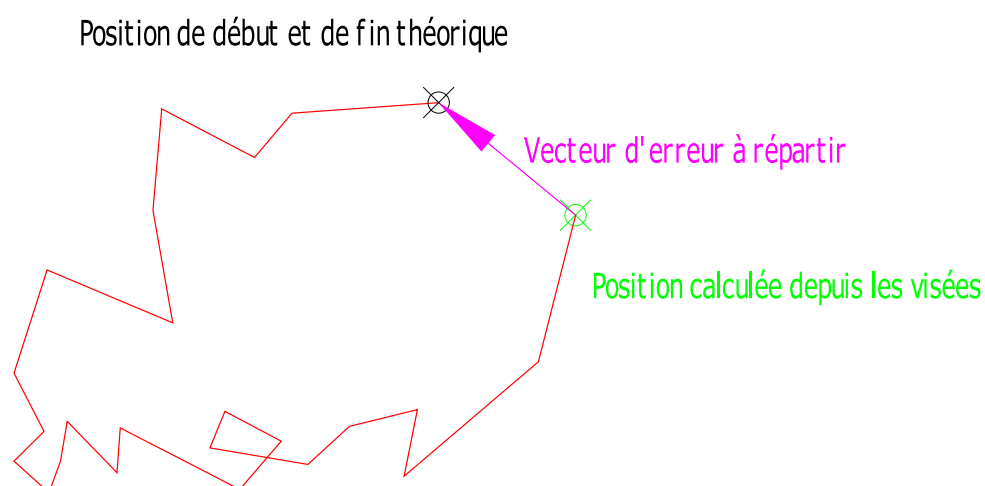


Figure 81 : Vecteur d'erreur à répartir sur la boucle

Le principe est de répartir ce vecteur sur chaque extrémité de visée, au prorata de la longueur de ladite visée. De proche en proche, en ajoutant ces petits vecteurs, le point de la position calculée va se superposer à celui de la position de fin imposée.

Dans les exemples qui vont suivre, il s'agit de la même topographie de base (exacte) avec les paramètres suivants :

Longueur minimum des visées		5	m
Longueur maximum des visées		50	m
Longueur totale de la topographie		1000	m
Gisement nominal de la topographie		0	°
Ecart crête du gisement de la topographie	±	180	°
Bruit crête	±	10	°
Longueur maxi du décentrement		0	m
Angle crête de non linéarité		0,0	°
Phase de la non linéarité		0,0	°
Décalage du zéro		0	°
Longueur moyenne des visées spécifiées		27,50	m
Nombre effectif de visées		37	
Ecart crête des visées spécifiées		22,50	m
Longueur mini de visée constatée après normalisation		5,50	m
Longueur maxi de visée constatée après normalisation		48,09	m

7.3.1.2. Décalage du zéro

L'exemple choisi ici introduit une erreur énorme de décalage du zéro de 30° (sens trigonométrique) afin de bien montrer le mécanisme.

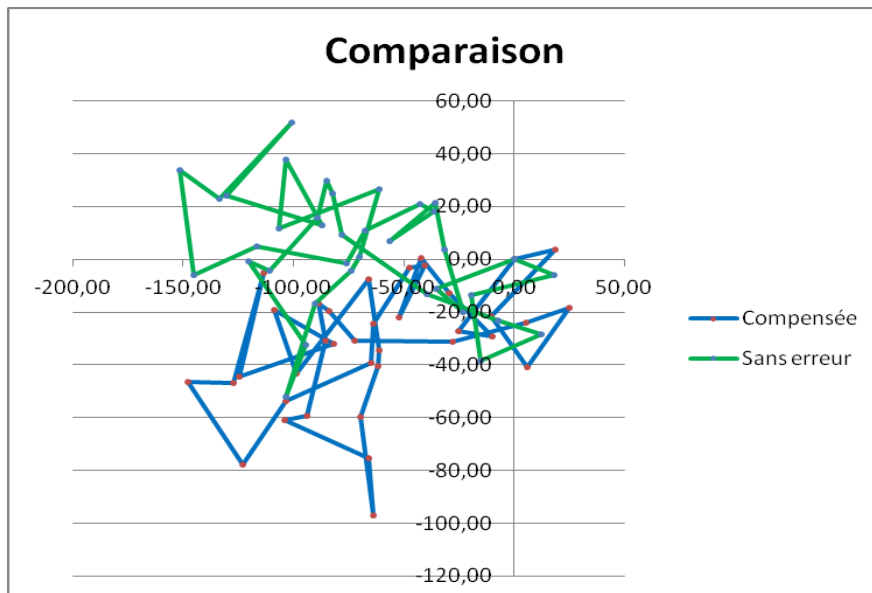


Figure 82 : Comparaison des mesures exactes et erronées (décalage du 0), boucle

On voit donc que dans cet exemple, la compensation a été incapable de corriger le décalage du zéro.

7.3.1.3. Non linéarité

Si l'erreur, pour la même topo, n'est qu'une non linéarité de l'instrument de $\pm 2^\circ$ la figure suivante montre l'efficacité de la compensation :

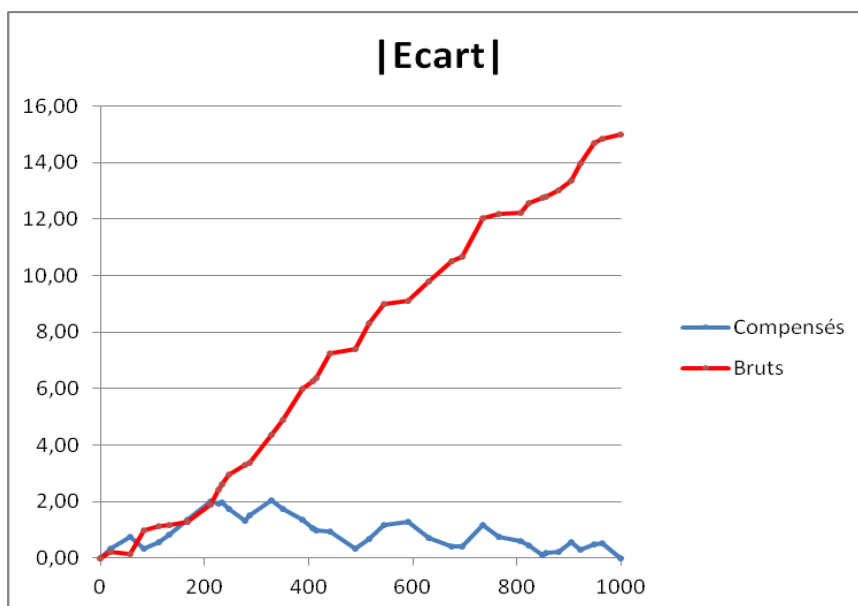


Figure 83 : Écart avant et après compensation (NL), boucle

7.3.1.4. Décentrement

Si les erreurs de mesures sont produites par un décentrement (aléatoire) d'un maximum de 10 cm, suivant la répartition des erreurs le résultat est plus ou moins pertinent. On peut avoir ceci :

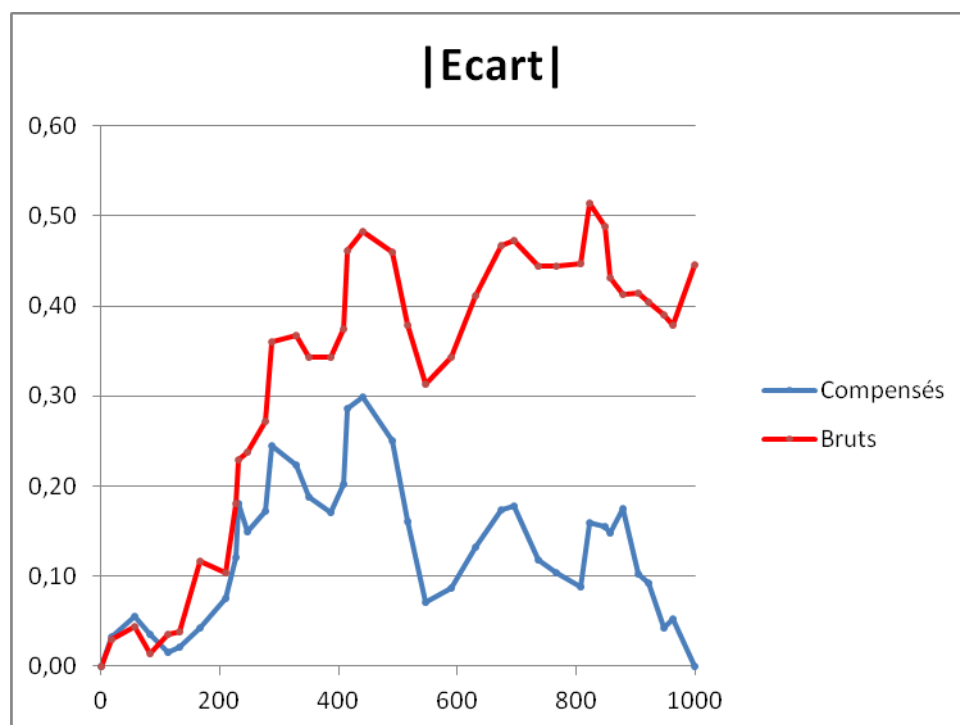


Figure 84 : Écart avant et après compensation (décentrement), boucle, essai 1

Mais en fonction de la combinaison des erreurs, si à la fin des 1000 m la compensation réduit bien l'erreur, ce n'est pas forcément toujours le cas en cours de route :

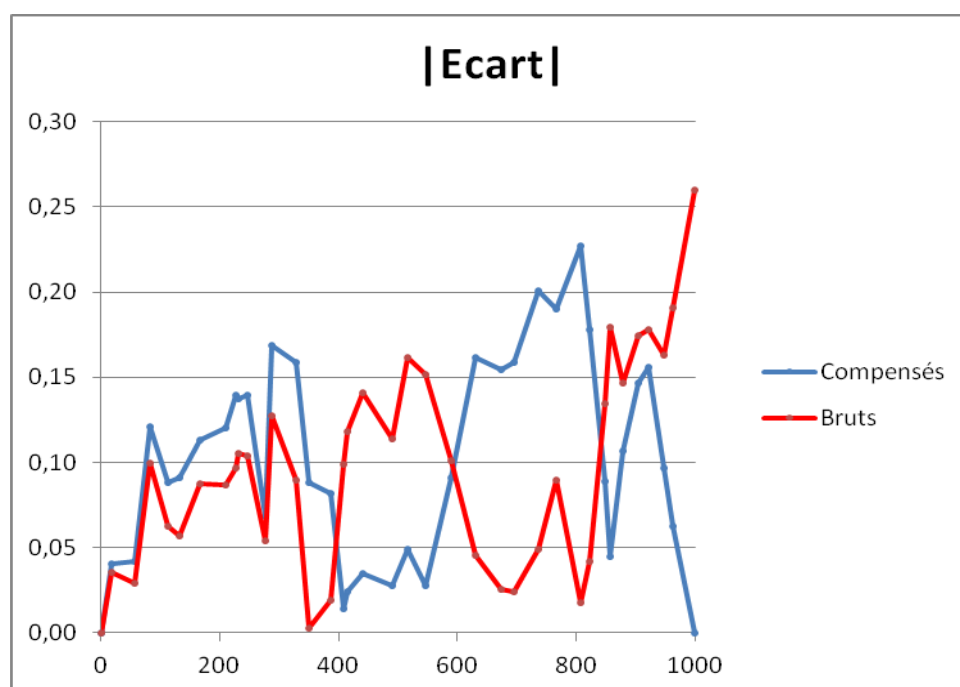


Figure 85 : Écart avant et après compensation (décentrement), boucle, essai 2

7.3.1.5. Bruit de mesure

Si les erreurs de mesures sont produites par un bruit sur la mesure d'angle (aléatoire) d'un maximum de 10° , suivant la répartition des erreurs le résultat est plus ou moins pertinent. On peut obtenir ceci :

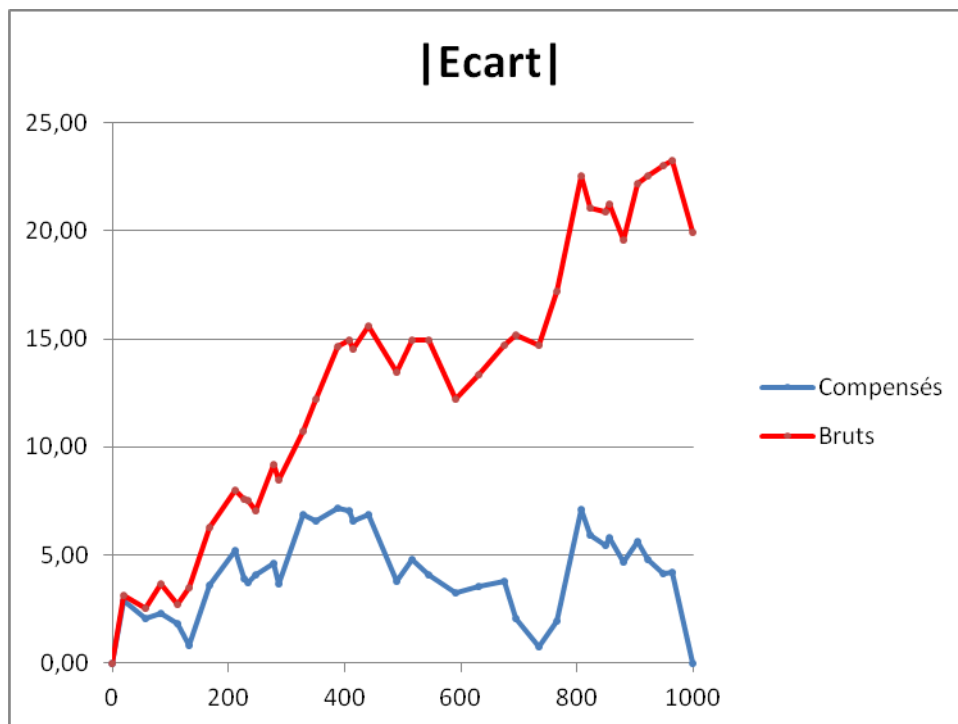


Figure 86 : Écart avant et après compensation (bruit), boucle, essai 1

Ou bien cela :

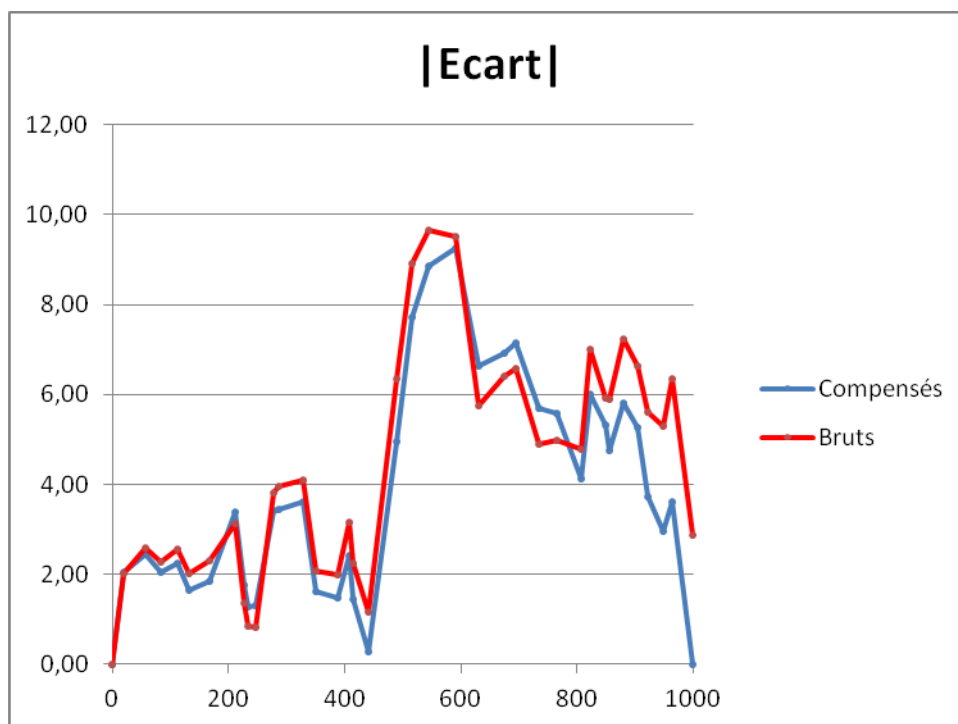


Figure 87 : Écart avant et après compensation (bruit), boucle, essai 2

Voire même pire :

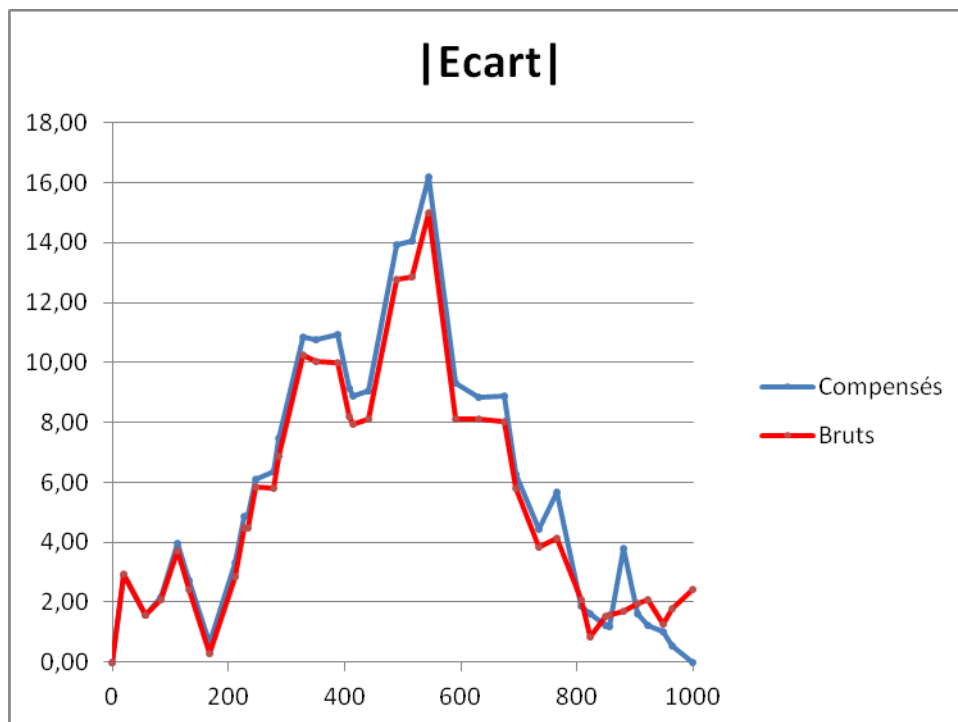


Figure 88 : Écart avant et après compensation (bruit), boucle, essai 3

7.3.1.6. Conclusion provisoire

Evidemment on ne sait toujours pas dans quel cas de distribution des erreurs par rapport à la distribution des visées de la topographie on se trouve. Il va donc falloir étudier, là encore, les conséquences de la normalisation sur le plan statistique.

Comme précédemment, cette étude devra se faire en laissant tous les paramètres fixes mais avec :

- un dessin de la topographie différent,
- une répartition statistique différente des erreurs.

8. Mise en pratique de la compensation d'une erreur

8.1. Prérequis et objectifs

Corriger à la volée des dizaines, voire des centaines de mesures, pour rectifier une erreur précédemment identifiée est relativement aisé avec un tableur. Mais le topographe spéléo ne se promène généralement pas sous terre avec un PC ou un Mac en plus de son matériel de topographie. Par contre il en a un en sa possession chez lui, au club ou au camp de base. L'idée était donc d'automatiser sur PC la correction de tout un fichier topo, mais surtout de pouvoir ensuite la réutiliser rectifiée pour continuer le travail de topo sur de bonnes bases.

Pour cela il fallait d'abord définir le matériel concerné. Il nous a semblé que le trio le plus courant autour de nous actuellement était : Périphérique Android + Appli TopoDroid + PC sous Windows. Evidemment cette décision est purement arbitraire et si vous utilisez un PDA Win CE + PocketTopo + PC sous Windows ou bien un PALM Os + Auriga + MAC Os, vous allez trouver ce choix peu pertinent. Malheureusement nous

n'avions ni le temps, ni les moyens de travailler sur toutes les configurations possibles ; nous avons donc utilisé la nôtre afin de pouvoir la tester plus aisément.

Ensuite il a fallu trouver un cheminement Périphérique > PC > Périphérique adéquat, c'est-à-dire trouver le format d'Export-Import le plus pratique, l'objectif étant d'extraire les données de l'application, puis de les lui réinjecter après correction.

Enfin il restait à écrire un programme permettant d'automatiser directement les corrections (d'azimut ou de longueur) sans passer par un tableur.

8.2. Un outil de travail « gui4cli »

L'écriture du programme de correction du fichier de données topographiques (extrait de TopoDroid) n'est pas issue d'un terrain vierge. Elle s'est appuyée sur un programme créé précédemment à d'autres fins par François Marchand et appelé « gui4cli ».

"gui4cli" est un logiciel utilitaire dont le nom correspond aux initiales de « Graphical User Interface for Command Line Interface » soit : interface utilisateur graphique pour interface en ligne de commande. "gui4cli" est un lanceur d'application. Il a été développé, en particulier, pour mettre au point et lancer les applications dites 'en ligne de commande', comme sed, grep, ping etc. venant souvent du monde Unix. Néanmoins gui4cli permet de lancer n'importe quel exécutable, qu'il soit en ligne de commande ou fenêtré, en lui passant une liste de paramètres déterminés par l'opérateur.

Bien que le lancement d'une application soit une opération techniquement complexe elle peut se résumer, vue de l'opérateur, à fournir à l'OS (Operating System) le nom d'un fichier dit exécutable et d'ordonner à l'OS de lancer cette application. "gui4cli" permet à l'opérateur de préparer ce lancement et de faire que l'OS lance l'application correspondante, en l'associant à divers paramètres applicatifs spécifiés par l'opérateur. Cette fonction le rendait particulièrement utile pour s'adapter à ce que nous souhaitions en faire.

Nous n'entrerons pas dans les détails de "gui4cli" ici car une documentation complète est disponible à l'adresse suivante : <http://souterweb.free.fr/boitaoutils/topographie/annexes/Gui4cli.pdf>

8.3. Le programme « Topocor »

8.3.1. Généralités

"Topocor" est donc un utilitaire permettant de corriger les visées topographiques des erreurs systématiques de l'instrument de mesure ; son nom est issu des deux mots Topographie / Correction. Il a été développé en cohérence avec l'application de carnet topo électronique TopoDroid.

8.3.2. Prérequis

L'opérateur est supposé familiarisé avec les notions de :

- Fichiers,
- Système de fichiers

L'utilisation de Topocor nécessite la présence de .NET pour fonctionner (installé par défaut dans les versions récentes de Windows).

8.3.3. À quoi sert « Topocor » ?

8.3.3.1. Usage d'un DistoX2

Le DistoX2 est de plus en plus utilisé en topographie souterraine. Une fois la cible pointée avec un laser rouge, l'instrument fournit les 3 mesures courantes :

- Distance à vol d'oiseau
- Relèvement magnétique
- Inclinaison

Les mesures s'affichent sur l'écran de l'instrument mais ce dernier est souvent couplé par Bluetooth avec une application Android : TopoDroid. Au travers de conventions, TopoDroid sait différencier les mesures le long d'une polygonale (de station en station) des mesures en simple rayonnement au tour d'une station.

Préalablement à une campagne de mesures, le DistoX2 doit être calibré par une opération un peu compliquée nécessitant 56 mesures dans un environnement aimantique. Le terme « **calibration** » est employé ici volontairement bien que nombre d'utilisateurs appellent cette opération « l'**étalonnage** » du Disto. Ceci nous permettra de parler ensuite d'étalonnage pour une toute autre opération, différente de la calibration habituelle des capteurs du Disto par les 56 mesures ad hoc.

8.3.4. Étalonnage de l'instrument de mesure

8.3.4.1. Erreurs de mesure d'un DistoX2

Le DistoX2 utilise les composants d'origine pour traiter la mesure de distance réglée en usine. Il semble qu'aucune correction ne soit nécessaire. On verra que Topocor permet de corriger la longueur d'une constante dans le cas où on utilise le DistoX en se servant comme point zéro de la distance, non du talon mais, par exemple, du taraudage pour son montage sur un pied. Par défaut, lors du démarrage, le DistoX place le zéro sur le talon. En cas d'oubli, ce serait une source d'erreur que de modifier, lors de chaque redémarrage du Disto, le paramétrage pour remettre ce zéro sur le taraudage. Il peut sembler moins risqué par exemple de laisser le Disto paramétré avec un zéro sur le talon et de corriger, après coup, toutes les mesures.

La mesure du relèvement magnétique produite par un DistoX est entachée de deux types d'erreur :

- Une erreur de calage du zéro où le zéro du compas n'est pas exactement en face du nord magnétique
- Une distorsion de linéarité qui se manifeste comme une sorte d'excentricité.

Même si comme nous l'avons vu au début de ce document (notes 5 et 6 page 10) la procédure n'est pas à la portée de tous, lorsque l'on est féru de haute précision le DistoX (comme la plupart des compas) mérite un **véritable étalonnage**. C'est-à-dire la **production d'une courbe d'étalonnage faisant correspondre à la valeur lue la valeur vraie** (exacte) de la grandeur. À quoi ressemble-t-elle ?

8.3.4.2. Courbe d'étalonnage d'un DistoX2

À première vue, la courbe d'écart entre la valeur lue et la valeur vraie, en fonction du relèvement lu (et que nous appellerons courbe d'étalonnage) est une sorte de sinusoïde. Topocor applique la fonction inverse sur les mesures afin de les corriger. Il faut toujours clairement distinguer:

1. La courbe d'étalonnage Valeur vraie = $f(\text{valeur lue})$
2. La courbe de correction Valeur vraie = valeur lue – $f(\text{valeur lue})$

Topocor réalise l'opération n° 2 mais on ne spécifie que l'opération n° 1 qui est la courbe d'étalonnage.

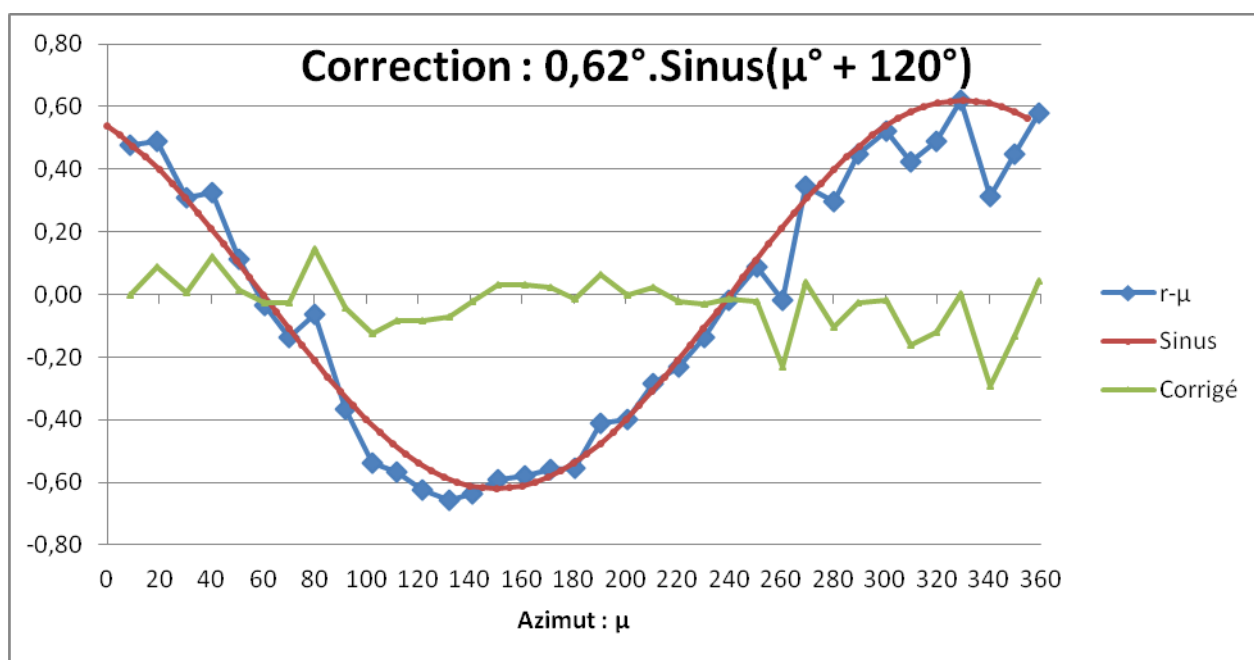


Figure 89 : Exemple d'une courbe d'étalonnage de DistoX2

S'y ajoute un décalage du zéro. dans la figure ci-dessus est rapportée en rouge une modélisation de la courbe d'étalonnage. Début 2019 l'application TopoDroid n'est pas à même d'appliquer une fonction de correction des relèvements. L'application Topocor est là pour pallier cette absence. Topocor va modifier les valeurs de relèvement reçues du DistoX en retranchant la courbe d'erreur et le décalage du zéro. Par commodité, Topocor peut aussi :

- Corriger les mesures de relèvements afin de prendre en compte une constante fournie par l'opérateur représentant la déclinaison magnétique du lieu.
- Corriger aussi, par une constante, la longueur de la visée pour la prise en compte, par exemple, d'un talon dans un montage particulier sur pied.

8.3.5. Convention de nommage

8.3.5.1. Vocabulaire

Dans la suite de ce document d'aide certains termes vont avoir une signification particulière :

- Topocor désigne l'application (le logiciel). Dans la suite du document il signifie application Topocor mais, pour plus de clarté le mot application n'y sera plus associé. Dans l'aide, les mots "dans Topocor" signifient en général sur l'écran (la fenêtre) de Topocor.
- opérateur désigne l'utilisateur de Topocor
- champ désigne une partie de l'écran (la fenêtre de Topocor) montrant des données et permettant éventuellement de les modifier
- SGBD Système de Gestion d'une Base de Données
- BD Base de données (SQLite pour TopoDroid)
- OS Operating Système (Android pour TopoDroid, Windows + .NET pour Topocor)
- PC Personal Computer sous Windows + .NET
- Relevé Mot utilisé dans l'aide de TopoDroid pour désigner une topographie (mesures, dessins d'une même cavité ou sous-cavité)
- Survey Mot anglais traduisible par arpentage; c'est le Relevé, la Topographie
- Shot Mot anglais traduisible par tir; visée produisant des données pour un seul coup de laser

8.3.5.2. Description de l'écran principal

La figure ci-après montre une copie de l'écran principal surchargé de repères alphabétiques qui seront utilisés dans la suite de ce document d'aide.

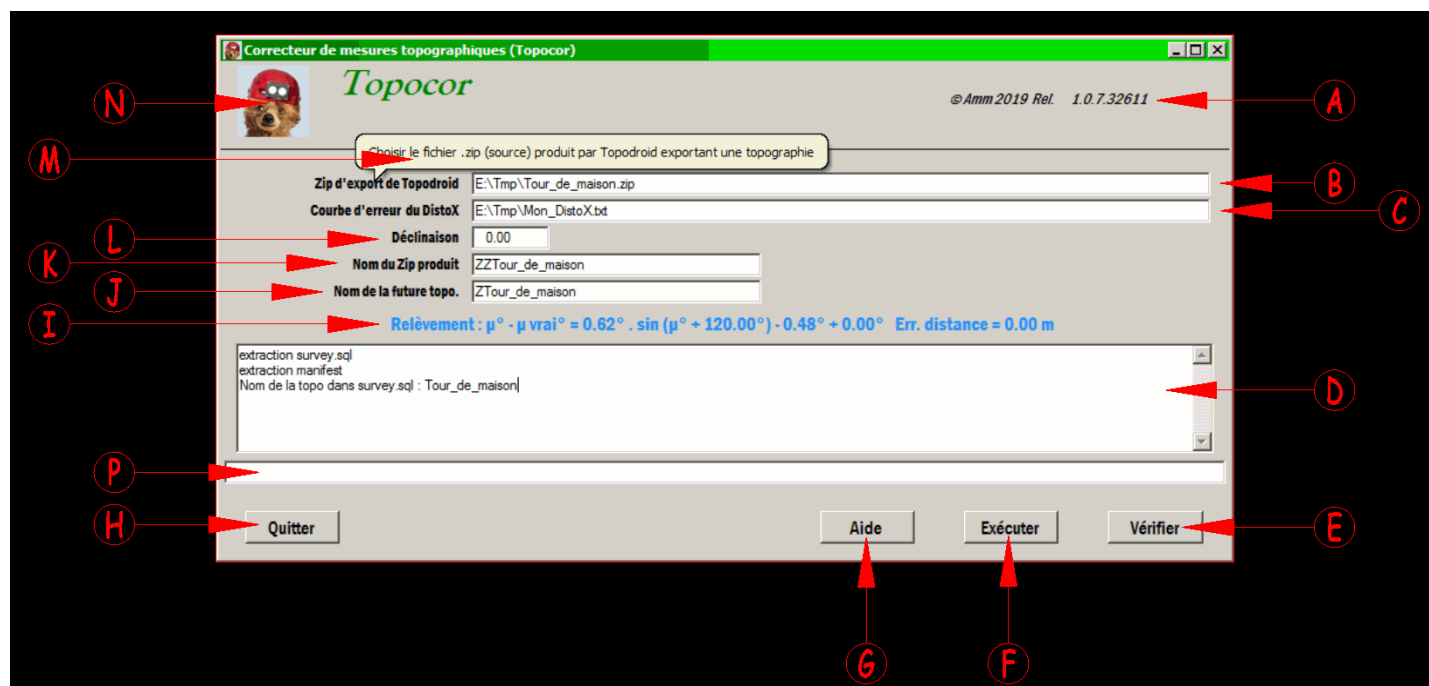


Figure 90 : L'écran principal de Topocor

8.3.6. Principes de fonctionnement de Topocor

Si TopoDroid exporte des données en de nombreux formats, le choix est plus réduit en matière d'importation. Les données venant du DistoX sont comme nous l'avons dit différenciées entre mesures sur la polygonale et mesures de rayonnement. Les autres applications de topographie que nous avons essayées n'identifient pas cette différence et utilisent les données GDHB (gauche, droite, haut, bas) pour décrire l'environnement de la station. Heureusement TopoDroid utilise une base de données interne SQLite. C'est une base de données relationnelle, c'est-à-dire avec plusieurs tables coordonnées entre elles au travers d'identifiants uniques, en général indexée (pour plus de rapidité). On retrouve cette base de données dans le répertoire /TopoDroid de l'OS Android sous la forme d'un fichier unique « *distox14.sqlite* ».

Il aurait probablement été possible d'attaquer directement le SGBD au travers d'un SGBD compatible. Nous avons contourné la difficulté en utilisant un fichier « *survey.sql* » qui est présent lorsqu'on exporte un zip de TopoDroid. Ce fichier est propre à un relevé. L'intérêt de ce fichier « *survey.sql* » est que c'est un fichier texte supportant des requêtes SQL toutes du même type

INSERT into <table> surveys values (v1, v2,...)

Ces requêtes sont présentes à l'exportation dans le but de pouvoir être réimportées par TopoDroid, par exemple pour transférer des données d'une tablette Android vers une autre. C'est là que la fonctionnalité de Topocor vient s'insérer. Topocor n'utilise que les requêtes

- INSERT into surveys values(27, "Tour_de_maison"
- INSERT into shots values(

La première ligne permet d'identifier la topographie (il n'y a qu'une ligne de ce type dans *survey.sql* TopoDroid peut modifier dans cette ligne le nom de la topographie.

La deuxième entre une visée dans la table *shot* Il y a donc une multitude de lignes de ce type. Topocor ne venant que modifier une suite de requêtes préexistantes, sans en ajouter ou en retirer, ne risque pas d'endommager la BD de TopoDroid. En particulier la distinction entre les visées de polygonale et les visées en rayonnement est conservée. On y retrouve même les deux visées identifiant une cible comme étant une station ainsi que les visées anormales et éliminées (le champ *status* n'est pas modifié)

Le fichier ZIP, contenant entre autre *survey.sql*, doit être copié depuis la tablette vers un répertoire d'un PC. Une connexion USB permet de contrôler, sur le PC raccordé, une partie du système de fichiers d'Android. Ce qui nous intéresse est ce qui est dans le répertoire */Android* qu'on retrouve à la racine soit du disque virtuel de la tablette, soit sur l'image d'une carte µSD introduite dans la tablette. Néanmoins l'interface USB ne montre pas la tablette comme on elle le fait pour une clef USB mais plutôt comme un lecteur multimédia portable auquel il n'y a pas de lettre affectée (genre F:). Topocor ne prend pas en charge la copie des fichiers entre la tablette et le PC qui devra se faire "à la main" au travers du gestionnaire de fichiers du PC. L'opérateur devra se méfier du fait que ce que l'on voit depuis le PC n'est pas toujours à jour par rapport à ce qui est effectivement dans la Tablette. Dans le meilleur de cas une déconnexion physique du câble USB et sa reconnexion suffisent à rafraîchir les données, mais il faudra bien souvent éteindre puis rallumer la tablette, voire retirer puis remettre en place la carte SD pour forcer la mise à jour.

Le fichier *survey.sql* est écrit au format Unix (fin de ligne par un *line feed* seul) et l'encodage des caractères est en UTF-8 (qui est différent du Windows 1252 ISO/CEI 8859-1 utilisé par Windows). TopoDroid supporte des fins de ligne RC+LF mais n'apprécie pas les lignes vides.

L'auteur attire l'attention des utilisateurs sur une mesure de précaution élémentaire : **sauvegarder sur le PC l'ensemble du répertoire /TopoDroid de la tablette**. En cas de gros problème, la réinstallation de TopoDroid et la substitution du répertoire /TopoDroid permet de repartir sans perte de données (jusqu'à la date de la sauvegarde évidemment).

Dans le zip issu de TopoDroid on trouve aussi un fichier *manifest*, lui aussi au format texte, dont une des lignes doit être en harmonie avec le nom du fichier zip; c'est ce qui interdit d'importer un fichier renommé. Ce fichier manifest porte aussi un référencement de la version de TopoDroid qu'actuellement TopoDroid ne traite pas en l'absence de documentation.

En résumé :

Topocor, à partir d'un fichier .zip exporté, produit un fichier .zip corrigé et importable. Le nom du zip est modifié et le nom de la topographie peut lui aussi être modifié (ce qui change tout à l'arrivée dans TopoDroid).

8.3.7. Installation de Topocor

8.3.7.1. Exécutable

Topocor n'a pas besoin d'être installé; il est fourni dans un fichier du genre Topocor.1.0.6.29014.zip Dans ce fichier zip on trouvera 3 fichiers

- Topocar.exe : l'application
- Topocar.rtf : le fichier d'aide de l'application
- Etalonnage_exemple.txt
- Topocor_XX.docx : le fichier d'aide natif.

Les 2 premiers fichiers doivent être copiés dans le même répertoire par exemple *C:/bin/Topocor* et on

créera sur Topocor.exe un raccourci qui sera copié, soit sur le bureau, soit dans un système de menu de Windows ou dans la barre d'accès rapide. Ce répertoire recevra un fichier Topocor.ini qui sera créé par Topocor lors de sa fermeture et relu par Topocor lors de son démarrage pour restituer l'environnement de travail

Le troisième fichier Etalonnage_exemple.txt peut être copié où on veut (dans C:/bin/Topocor par exemple). Il servira de modèle pour saisir la courbe d'étalonnage.

8.3.7.2. Fichier "Courbe d'erreur du DistoX"

Le nom de ce fichier sera saisi ultérieurement dans le champ (C). Faire une copie du fichier *Etalonnage_exemple.txt* et renommer cette copie par exemple *Mon_distoX.txt*. Déplacer ce fichier où l'on veut (ou pas); dans l'exemple, on le déplace dans E:\Tmp Éditer ensuite ce fichier avec Notepad

; Description de la courbe d'écarts du DistoX de Dom après les essais tous les 10°
; janvier 2019

; -----

0.62 ; amplitude de l'écart en degrés
120 ; Angle de phase en degrés

-0.48 ; erreur systématique en degrés (positive si gisement affiché trop grand)
0 ; erreur sur la longueur des visées en m (positive si longueur affichée trop grande)

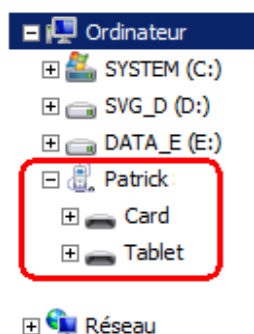
Respecter la syntaxe de l'exemple :

- Des lignes vierges sont supportées
- Une ligne commençant pas le caractère ';' est un commentaire
- La partie d'une ligne de données après le caractère ';' est un commentaire
- Il doit y avoir systématiquement 4 lignes de données et l'ordre des paramètres doit être respecté : amplitude, phase, décalage du zéro, erreur de longueur. Faire bien attention aux signes car il s'agit de la courbe d'étalonnage (ou d'erreur) et non de la fonction de correction !
- Utiliser de préférence le '.' (point) comme séparateur décimal

8.3.8. Mode d'emploi

8.3.8.1. Préalables

Après une campagne de mesure, les mesures effectuées par le DistoX ont été acquise par l'application TopoDroid hébergée par une petite machine sous Android (tablette ou téléphone). À la maison, on peut connecter cette machine Android sur un PC au travers d'une connexion USB ou Wifi. On voit alors, par exemple, le matériel Android comme ci-après :



On remarque que le matériel Android n'apparaît pas comme un disque nommé mais plutôt comme une

connexion réseau. Dans l'exemple, la tablette s'appelle *Patrick* et elle est équipée d'une mémoire μ SD. En l'espèce, contrairement à ce qu'indique la notice de TopoDroid, et à cause de la version d'Android, il a été impossible d'installer le répertoire */TopoDroid* sur la carte μ SD. Le répertoire */TopoDroid* est dans *Tablet*.

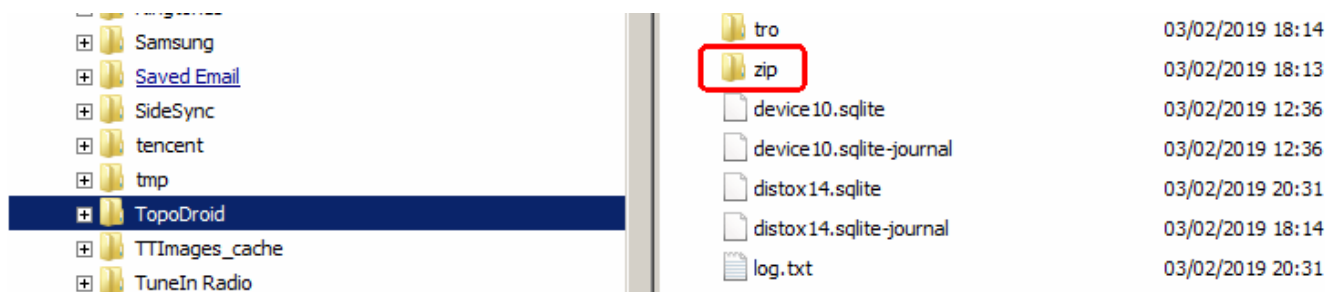


Figure 91 : Situer le dossier .zip de TopoDroid

Le répertoire qui va particulièrement nous intéresser est */TopoDroid/zip*

Dans TopoDroid, il faut choisir la topographie (pour l'exemple : *Tour_de_maison*) que l'on souhaite corriger par un appui long, dans le tableau des topographies, sur le nom *Tour_de_maison*. Apparaît alors un nouvel écran désigné en haut à gauche par "*Info du relevé*". En haut à droite de l'écran on touche les 3 points verticaux d'accès au menu, on choisit EXPORTER et par défaut l'export va se faire en "ZIP". Toucher alors la touche ENREGISTRER. Apparaît en bas un message fugitif (trop fugitif) **Enregistré Storage/Emulated/0/Topodroid/zip/Tour_de_maison.zip** *Storage/Emulated/0/* correspond, dans le Linux sur lequel repose Android, au nom *Tablet* que l'on voit depuis le PC.

On copie le fichier *Tour_de_maison.zip* dans un répertoire du PC. Dans notre exemple on le copie dans *E:\Tmp*

8.3.8.2. Utilisation de Topocor

Au lancement Topocor affiche l'écran en 8.3.5.2 (écran principal).

- Cliquer dans le champ (B) pour spécifier le fichier .zip qui servira de source de données; dans notre exemple ça sera *E:\Tmp\Tour_de_maison.zip*
- Cliquer dans le champ (C) pour spécifier le fichier .txt portant les données de la courbe d'erreur; dans notre exemple ce sera *E:\Tmp\Mon_distoX.txt*

Zip d'export de Topodroid	E:\Tmp\Tour_de_maison.zip
Courbe d'erreur du DistoX	E:\Tmp\Mon_DistoX.txt
Déclinaison	0.00
Nom du Zip produit	ZTour_de_maison
Nom de la future topo.	

Figure 92 : Détail de l'affichage de Topocor

- Le champ « Nom du Zip produit » (K) est automatiquement rempli par le nom du fichier en (B) précédé du caractère 'Z'.
- Le champ « Déclinaison » (L) a été initialisé à la valeur qu'il avait lors de la session précédente de Topocor. Sa valeur peut être modifiée et restera inchangée par la suite.

On note que le bouton [Exécuter] (F) est inactif. Cliquer sur le bouton [Vérifier] (E). Une partie de l'écran devrait ressembler à ce qui suit :

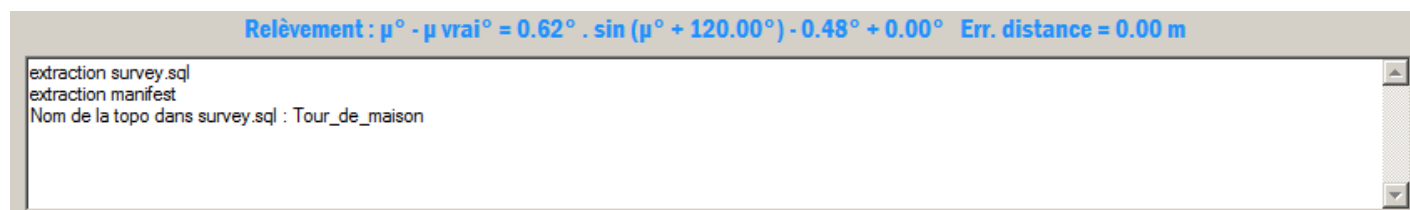


Figure 93 : Affichage des tâches en cours par Topocor

En haut, en bleu, champ (I) la transcription de la fonction d'étalonnage (et non pas de correction). Ce sont les valeurs qui sont dans le fichier *Mon_distoX.txt* complétées de la valeur de la déclinaison. Le champ textuel (D) fournit des informations sur ce que fait Topocor ou ce qu'il a identifié. Un zip d'export de TopoDroid doit nécessairement comprendre deux fichiers

- survey.sql
- manifest

Si ces deux fichiers ne sont pas dans le zip, Topocor produira un message d'erreur dans le champ (P) du dessous. Par exemple :

Erreur applicative : Valeur incohérente ligne 1 de E:\Tmp\svx.bdt

Figure 94 : Comment Topocor signale-t-il une erreur

- Le champ (J) nom de la future topo a été mis à jour avec le nom de la topographie trouvé dans le fichier *survey.sql* précédé du caractère 'Z'

Sauf besoin particulier, l'utilisateur doit laisser les deux champs (K) et (J) identiques ou faire en sorte qu'ils le soient.

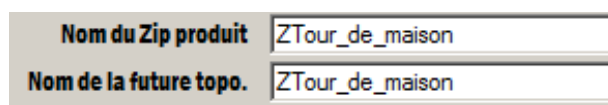


Figure 95 : Les champs à vérifier avant exécution

Ce n'est pas une obligation mais ne pas respecter cette règle peut induire des effets **inattendus** (mais qui peuvent être voulus) lors de l'importation.

Cliquer le bouton [Exécuter] qui est maintenant actif. La zone texte (D) est complétée par :

Nom de la topo dans survey.sql : Tour_de_maison
Correction des valeurs dans la nouvelle topo ZTour_de_maison : ok
Nombre de visées dans survey.sql : 86
Création de E:\Tmp\ZTour_de_maison.zip : ok
Archivage dans le zip de survey.sql et manifest : ok
Effacement des fichiers temporaires : ok

C'est terminé. Le fichier *ZTour_de_maison.zip* produit par Topocor contient une topographie du nom de *ZTour_de_maison* contenant les visées corrigées. Ce zip est à copier dans le répertoire */Topodroid/zip* de

la tablette.

On peut repasser dans TopoDroid. Dans l'écran présentant la liste des Topographies, toucher l'icône importation encadrée en rouge.

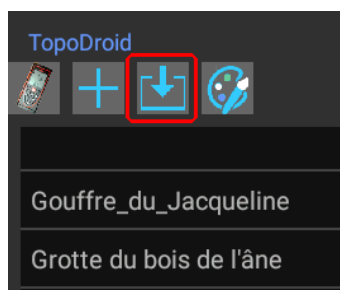


Figure 96 : Le bouton IMPORT de TopoDroid

Sélectionner le fichier *ZTour_de_maison.zip*. Ce fichier va importer la nouvelle topographie mais seulement si celle-ci n'existe pas déjà. C'est le nom du zip qui est interprété pour assurer la protection et non le nom de la topographie qu'il contient. Il ne sert à rien de renommer le zip car le fichier *manifest* dans le zip doit être en accord avec le nom du zip et le fichier .zip ainsi modifié serait refusé.

8.3.8.3. Particularités

Si le nom du zip, issu de Topocor, ne correspond pas à une topographie existante (supposons qu'on l'ait appelé *Pipo.zip*) alors le fichier .zip est accepté par TopoDroid et là deux cas sont possibles en fonction du nom de la topo présente dans le champ (J) de Topocor :

- Si une topographie de ce nom est déjà présente dans TopoDroid, les visées (corrigées donc) sont **ajoutées à la liste des visées préexistantes !!!**
- Si la topographie n'existe pas, elle est créée et elle est remplie avec les visées corrigées.

Dans Topocor, des mécanismes sont en place pour attirer l'attention de l'utilisateur ou pour prépositionner les champs afin que le nom de la topographie et le nom du zip soient identiques, mais l'utilisateur peut modifier les champs avant de cliquer sur [Exécuter] (c'est lui qui décide). Si le nom du zip produit correspond à un zip déjà existant qui serait (**sera**) **écrasé**, un message d'avertissement est affiché quand on clique sur [Vérifier].

ATTENTION le fichier ZTour_de_maison.zip existe déjà et sera écrasé

Figure 97 : Premier avertissement d'écrasement de Topocor

Puis un rappel s'affiche si l'utilisateur clique malgré cet avertissement sur le bouton [Exécuter]

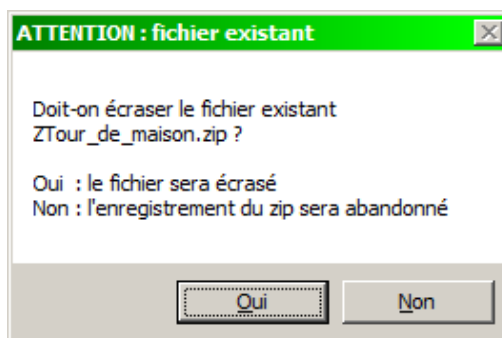


Figure 98 : Second avertissement d'écrasement de Topocor

Si l'utilisateur clique sur [Oui] plus rien n'empêchera que le fichier d'origine soit définitivement écrasé. **À utiliser avec précaution donc !**

8.3.8.4. Sauvegarde du contexte

Quand on quitte Topocor sont enregistrés :

- La taille de la fenêtre
- La position de la fenêtre
- La valeur de la déclinaison magnétique

Ces 3 paramètres sont relus lors de l'ouverture suivante de Topocor (nouvelle session). Il est possible de remettre la fenêtre dans ses caractéristiques d'origine en cliquant sur Paddington-spéléo en (N).

8.3.9. Aide

8.3.9.1. Générale

C'est le présent fichier qui apparaît quand on clique le bouton [Aide] (G). Cette aide est au format rtf (issue de Wordpad). Elle est modifiable en ligne par l'utilisateur et les modifications peuvent être enregistrées, éventuellement dans un autre fichier. Les possibilités d'édition en ligne sont réduites car on ne peut pas positionner de nouvelles balises. Le processus pour modifier la documentation est :

- Modifier *Topocor_XX.docx* avec Word
- Enregistrer le fichier modifié en **.docx** et non en .rtf (ça ne marchera pas)
- Ouvrir le fichier .docx dans Wordpad
- Enregistrer au format *Topocor.rtf* avec Wordpad

8.3.9.2. Pop-up

L'aide est complétée par la présentation d'informations en pop-up apparaissant par exemple en (M).

8.3.10. Applications et limites de « Topocor »

8.3.10.1. Corriger une erreur d'azimut avec Topocor

- Production d'un fichier Z

Imaginons que je dispose à la base d'un fichier topographique intitulé « Exemple » que je vais ouvrir avec TopoDroid pour l'examiner et faire quelques copies d'écran qui illustreront cette partie.

Supposons ensuite que, suite à une erreur systématique de 30° je doive corriger ce relevé topo avant de poursuivre ma topographie souterraine avec TopoDroid. Certes, cette erreur est énorme et totalement peu réaliste (si votre appareil de mesure commet une telle erreur : jetez-le !). Mais il s'agit simplement ici d'illustrer le fonctionnement de Topocor afin de rendre visible à l'œil nu son effet sur la topographie en question. Qui peut le plus, peut le moins et si Topocor est capable de corriger une erreur d'azimut de 30° il pourra aussi rectifier une erreur de 1.5° par exemple.

Suivant les instructions des paragraphes précédents, maintenant avec l'aide de Topocor je produis un fichier intitulé « ZExemple.zip » qui est une rotation de -30° de l'original. J'importe ensuite cette nouvelle topographie dans TopoDroid. Le DXF est correct. Si dans TopoDroid j'ouvre la fenêtre « Croquis du relevé », les anciens croquis qui étaient dans Exemple (natif) sont toujours là. S'agit-il bien des croquis natifs mis à jour par rotation de 30° ?

Examinons et comparons maintenant les croquis de chacune des deux « cavités » : la cavité native

« Exemple » et la cavité modifiée « ZExemple ».

Tout d'abord ouvrons le fichier natif « Exemple » et choisissons le croquis <1> PLAN et ces statistiques. On constate que ce croquis est formé de deux calques :

- la polygonale et les visées latérales en blanc (partie générée automatiquement par TopoDroid)
- une couche de dessin ajoutée par le topographe comprenant : un embryon de galerie et une zone (en couleurs), quelques points spécifiques ajoutés (en jaune) ainsi que des sections transverses (en pointillés). Les statistiques montrent une longueur de cheminement maximale de 351,0 mètres pour 88 stations.

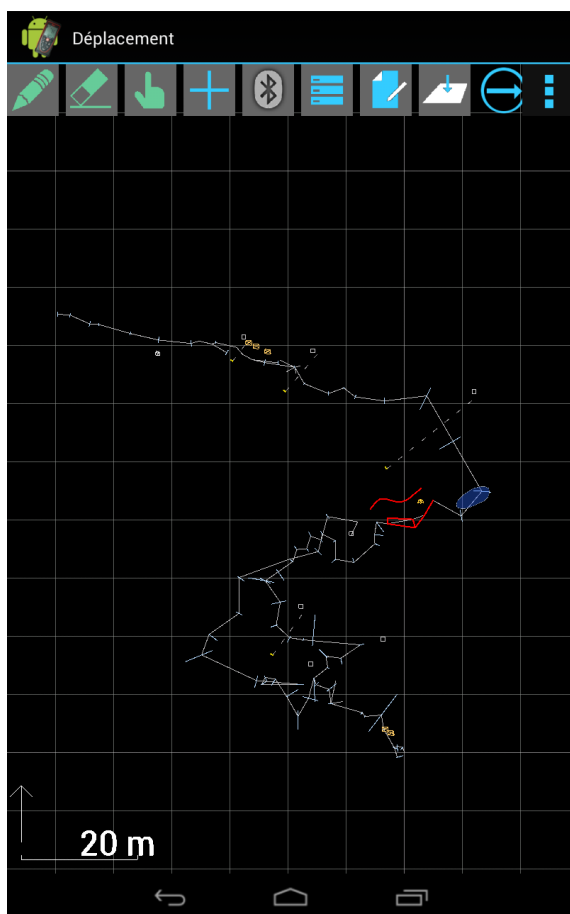


Figure 99 : Le croquis <1> PLAN de la cavité native "Exemple"

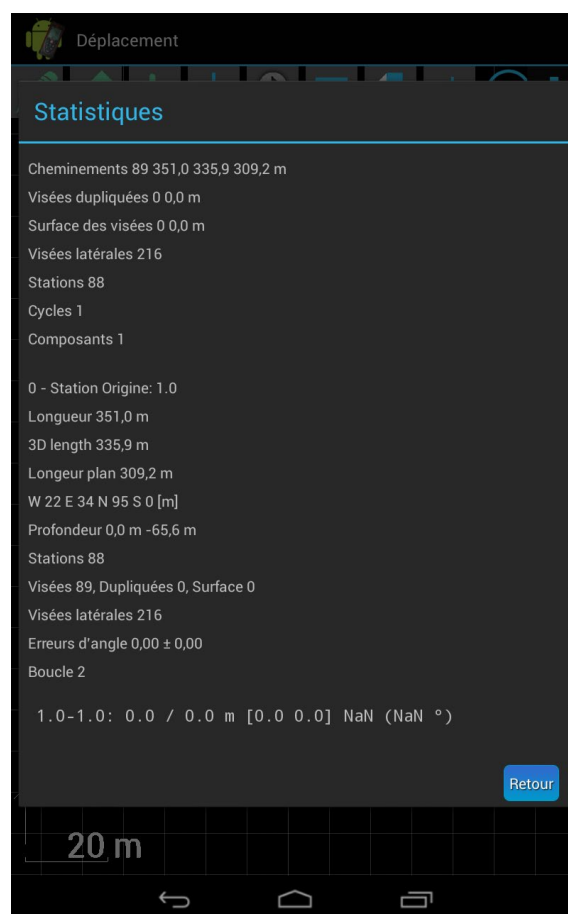


Figure 100 : Les statistiques complètes de la cavité native "Exemple"

Toujours avec le fichier natif « Exemple », examinons maintenant le croquis natif <2> PLAN. Sur celui-ci n'est présente qu'un seul calque : celui généré automatiquement par TopoDroid avec la polygonale et les mesures LRUD d'habillage latéral.

Les deux croquis <1> PLAN et <2> PLAN ont été créés par le topographe lors de sa séance de topographie. Ils représentent la même cavité et sont complémentaires, le premier sur lequel le topographe va dessiner des détails pour avoir un brouillon précis de sa topo et le second plus dépouillé représentant simplement la polygonale de cheminement.

Nous allons voir en quoi cela nous intéresse par la suite.

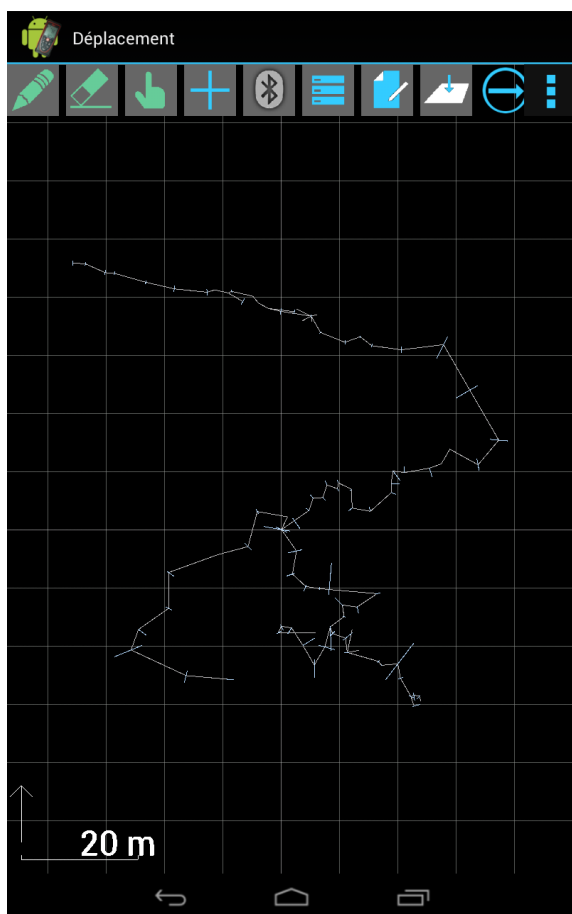


Figure 101 : Le croquis <2> PLAN de la cavité native "Exemple"

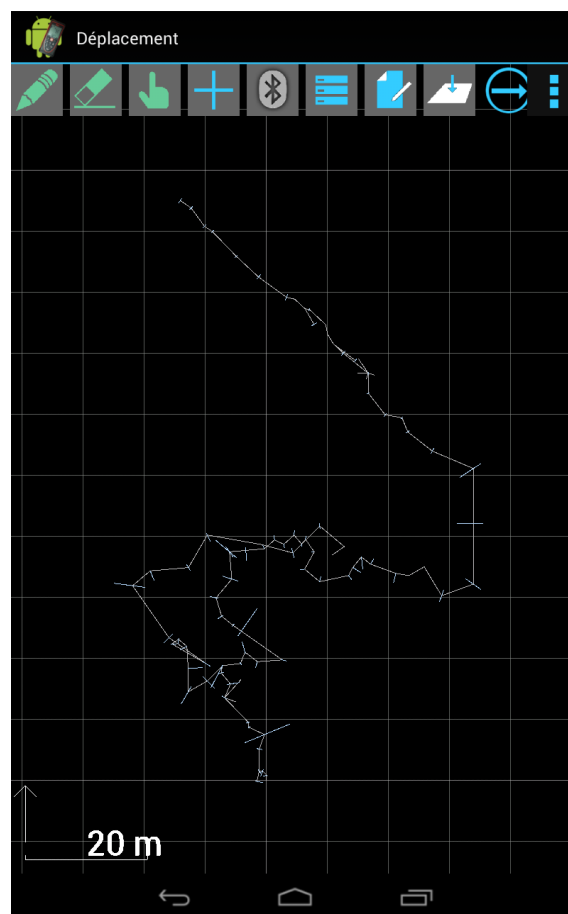


Figure 102 : Le croquis <1> PLAN de la cavité modifiée "ZExemple"

Maintenant ouvrons le fichier modifié « ZExemple » et choisissons le croquis <1> PLAN. On constate immédiatement deux choses :

- Tout d'abord le croquis <1> PLAN de la cavité modifiée « ZExemple » ressemble dans sa forme au croquis <2> PLAN de tout à l'heure. En effet on n'y retrouve plus qu'un seul calque, celui de la polygonale de cheminement dépouillé de tous les attributs du second calque (parois, zone, points, sections transverses).
- Ensuite, on s'aperçoit que cette polygonale de cheminement a bien tourné de 30° vers le Nord comme on le souhaitait. Le plan de la cavité a été corrigé !

8.3.10.2. Corriger une erreur de longueur avec Topocor

Qu'en est-il d'une éventuelle correction des mesures de longueur ?

Si vous désirez modifier les longueurs des visées, écrivez le fichier de correction selon les préconisations du paragraphe 8.3.7.2 en plaçant la correction de longueur à la dernière ligne du fichier .txt et recommencez la même manœuvre que précédemment. Topocor va générer un nouveau fichier par exemple « ZExemple2.zip » (nom que vous avez-vous-même choisi).

Une fois importé dans TopoDroid il vous permettra d'ouvrir la cavité « ZExemple2 ».

Si dans l'exemple précédent vous avez effectué une correction de deux mètres en écrivant dans le fichier .txt :

« **-2 ; erreur sur la longueur des visées (négative si longueur affichée trop petite)** »
alors Topocor a ajouté deux mètres à chacune des visées (de cheminement ou de rayonnement).

Essayez encore, cette fois en écrivant une autre version du fichier .txt dans laquelle vous allez écrire à la dernière ligne :

« **4 ; erreur sur la longueur des visées (positive si longueur affichée trop grande)** »

Cette fois Topocor devrait soustraire quatre mètres à chacune des visées (de cheminement ou de rayonnement).

- Que constatons-nous dans le premier cas ?



**Figure 103 : Les statistiques complètes
de la cavité ZExemple2**

Après import du fichier dans TopoDroid et ouverture de la topographie et de son croquis <1> PLAN, on peut afficher les statistiques de « ZExemple2 ». La longueur maximale de cette topographie qui était, comme nous l'avons vu tout à l'heure, de 351,0 mètres est passée à 529,0 mètres. Pas de doutes : la correction a bien fonctionné.

- Que se passe-t-il dans l'autre cas de figure (correction des longueurs de -4 mètres) ?

Cette fois il y a un problème :

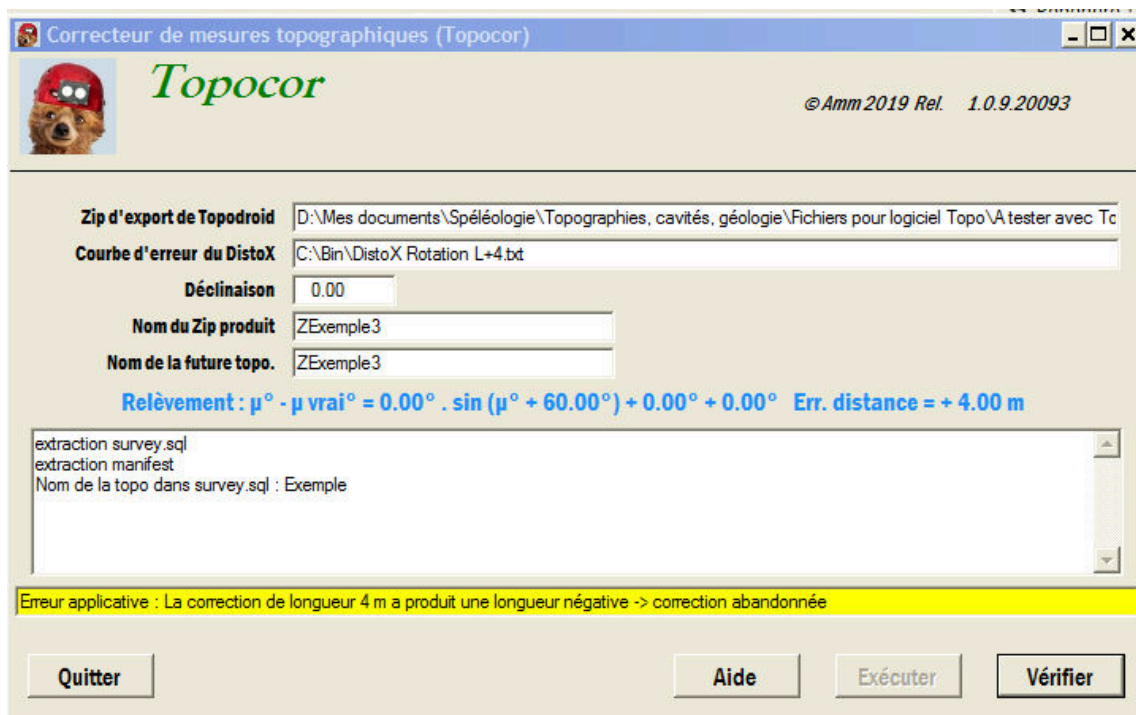


Figure 104 : Erreur signalée par Topocor

Il est impossible de créer le fichier « Zexemple3.zip » et Topocor s'arrête sur un message d'erreur. En effet la réduction des longueurs de 4 mètres a créé une aberration : certaines visées inférieures à 4 mètres sont devenues négatives ce qui est impossible dans une topographie et pourrait créer des choses pour le moins étranges dans TopoDroid.

Si vous choisissez une valeur de correction de longueur bien inférieure (par exemple 0.1 m) la correction devrait aller à son terme : vous constaterez donc que la longueur maxi de la cavité a bien diminué.

Par contre **votre tableau de données initial peut contenir au départ des valeurs de longueurs nulles**, c'est parfois le cas avec des fichiers qui ne sont pas natifs TopoDroid (comme par exemple des imports depuis VisualTopo). Dans ce cas de figure, cette longueur restera nulle mais le relèvement sera tout de même corrigé. Les événements de ce type sont listés dans le champ textuel (D) et un simple message d'alerte affiche l'information. Le fichier zip corrigé est donc produit.

ATTENTION : certaines visées montrent une distance = 0.0

Figure 105 : Message signalant des valeurs de distance nulles

8.3.10.3. Ce que Topocor ne peut pas faire pour vous

Comme nous l'avons vu en ouvrant le croquis <1> PLAN de la cavité « ZExemple » (Figure 100) Topocor modifie uniquement les valeurs de la polygonale de cheminement et des visées d'habillage (rayonnement) attachées aux différentes stations.

Topocor ne traite pas les données du dessin des parois, des zones, des annotations, des sections transverses etc. En conséquence dans <1> PLAN de la cavité « ZExemple », le calque du dessin (que l'on voyait sur <1> PLAN de la cavité native "Exemple") a tout simplement disparu.

Vous pouvez télécharger la dernière version en date de Topocor à l'adresse suivante : <http://souterweb.free.fr/boitaoutils/topographie/annexes/Topocor.zip>

9. Conclusions

Tout d'abord, la première partie de cette étude a prouvé l'intérêt d'une simulation numérique montrant les effets statistiques des différentes erreurs de mesures sur une topographie. Il ne faut néanmoins pas perdre de vue :

- qu'il s'agit d'une simulation sur la base de valeurs aléatoires, y compris la forme générale de la topographie,
- que les topographies sont normalisées à une longueur de parcours de 1000 m et que toutes les visées ont la même longueur (10, 50 ou 100 m),
- que la simulation repose sur des mesures planes (sans dénivelé) et en particulier sans puits,
- qu'il est supposé une mesure parfaite de la distance (hypothèse de la mesure de distance par un Disto Leica et non un décamètre),
- que les résultats sont des résultats statistiques reposant sur un grand nombre de mesures (10 000),
- qu'il faut se méfier de la distribution des valeurs en résultat.

Ce chapitre démontre aussi :

- que les visées courtes réduisent les effets de la propagation de certaines erreurs. Cette affirmation, quelque peu surprenante, constante dans les résultats, est peut-être à tempérer par
 - les conditions initiales de la simulation.
 - les méthodes utilisées lors de la topographie,
- que la qualité de l'appareil de mesure et surtout de son étalonnage initial agit très fortement sur les effets de propagation des erreurs. On voit qu'avec un grand nombre de mesures, le bruit de mesure, en particulier la résolution de l'appareil, a peu d'importance comparée à la linéarité de celui-ci qui influe bien plus sur le résultat,
- que la précision des résultats peut être fortement impactée par la méthode de réalisation de la topographie (décentrement, décalage du zéro),
- que les résultats engendrés par un compas étalonné sont, a priori, en termes de précision, meilleurs que le meilleur DistoX dont nous disposions¹⁹. Il faut à ce sujet, se méfier de l'usage du mot « étalonnage ».
 - L'étalonnage (classique) d'un compas est une opération statique qui conduit à une courbe de correction de l'appareil à appliquer en post traitement (avec un ordinateur par exemple), afin de n'utiliser pour tracer la topographie que des valeurs corrigées.
 - L'étalonnage (spécifique) d'un DistoX (au moyen des 56 mesures préconisées) est une opération dynamique qui doit être renouvelée et qui ne produit pas une véritable courbe de correction. Cette étape a pour objectif d'assurer un fonctionnement optimum du DistoX. Il est

¹⁹ Le « pseudo-étalonnage » de cet appareil est encore nettement perfectible moyennant quelques séances de mesures supplémentaires. Il suffirait ensuite de comparer les données et de choisir la série la plus performante (TopoDroid facilite par exemple ce choix).

très laborieux de tenter d'obtenir, en sus, une courbe de correction de ce type d'appareil (à appliquer a posteriori). De plus, rien ne garantirait la constance de cette courbe après chaque nouvelle opération d'étalonnage²⁰ spécifique. Ce terme « *étalonnage* » bien que rentré dans les mœurs semble donc ici relativement impropre. Peut-être vaudrait-il mieux l'appeler « *pseudo-étalonnage* » ou bien « *calibration* » qui est un anglicisme.

On peut donc en déduire qu'un spéléologue averti et méticuleux, utilisant un appareil correctement étalonné dans les conditions de topographie habituelles sous nos latitudes (où il y a peu d'immenses cavités avec de grandes galeries rectilignes) va obtenir des topographies à la précision largement suffisante. Voilà qui est plutôt rassurant. Par contre, l'utilisation d'un distancemètre dont on n'aurait pas au préalable vérifié consciencieusement le « *pseudo-étalonnage* » fait courir un risque non négligeable de devoir tout recommencer !

10. Questions subsidiaires

Arrivé à ce stade du sujet, plusieurs questions restaient encore en suspens et pour tenter de répondre à ces questions, un travail complémentaire devait être entrepris.

10.1. Comment « étalonner » rigoureusement un Disto X au moyen des 56 mesures préconisées ?

La méthode la plus simple pour réaliser l'ensemble des 56 mesures du « pseudo-étalonnage » d'un DistoX2 est, bien évidemment, de le tenir à la main en essayant de rester éloigné de toute source de perturbation magnétique (enlever sa montre) et de viser des points fixes aisément identifiables. Elle donne des résultats tout à fait acceptables pour peu qu'on soit attentif sur les visées et qu'on bouge le moins possible entre chacune des quatre rotations longitudinales.

Un des auteurs de cet article utilise cette méthode dans une ancienne tour médiévale en pierres sèches et très éloignée de tout conducteur électrique. Cette opération a été présentée dans l'article de juillet 2018, « Évaluation des DistoX V. 1.0 », page 37 (téléchargeable à l'adresse suivante :

<http://souterweb.free.fr/boitaoutils/topographie/annexes/Evaluation%20DistoX%201.0.pdf>)

De nombreux spéléos ont aussi tenté d'améliorer la méthode en concevant un support qui permettrait d'être plus stable que lorsque l'on tient le DistoX à la main. Ces réflexions se sont soldées par un premier objet qui a été présenté par un club portugais (EASDA de Torres Vedras au nord de Lisbonne) en août 2016 au Royaume-Uni pour le cinquième congrès Euro Spéléo qui se tenait alors à Austwick dans le Yorkshire. Un PowerPoint fut projeté pour en présenter la fabrication de ce support ainsi que son mode d'emploi. Voir l'article en ligne à l'adresse : <https://aesda.org/tag/eurospeleo/>

L'auteur de ces lignes a tenté d'améliorer le principe de cet outil en imaginant un support rotatif qui limiterait les déplacements du DistoX une fois qu'il serait posé dessus et qui serait muni de cales pour effectuer les visées inclinées sans avoir à la maintenir en place avec la main. L'objectif en améliorant la stabilité était d'avoir un meilleur résultat final lors du calcul de la correction par le logiciel.

Bien entendu, dans ces deux stations de « pseudo étalonnage » il n'y a aucune partie métallique : pour éviter toute perturbation ils sont tous les deux 100 % bois.

²⁰ Le terme étant galvaudé, il sera parfois placé entre guillemets et/ou en italiques dans cet article.

Au final l'utilisation de ce type d'appareil ne donne pas des résultats aussi bons qu'espéré. Une expérience comparative nous a même permis de constater qu'il est même parfois possible d'avoir un meilleur coefficient avec une méthode manuelle très rigoureuse. Nous allons voir pourquoi.



Figure 106 : Le « calibrateur » de l'AESDA

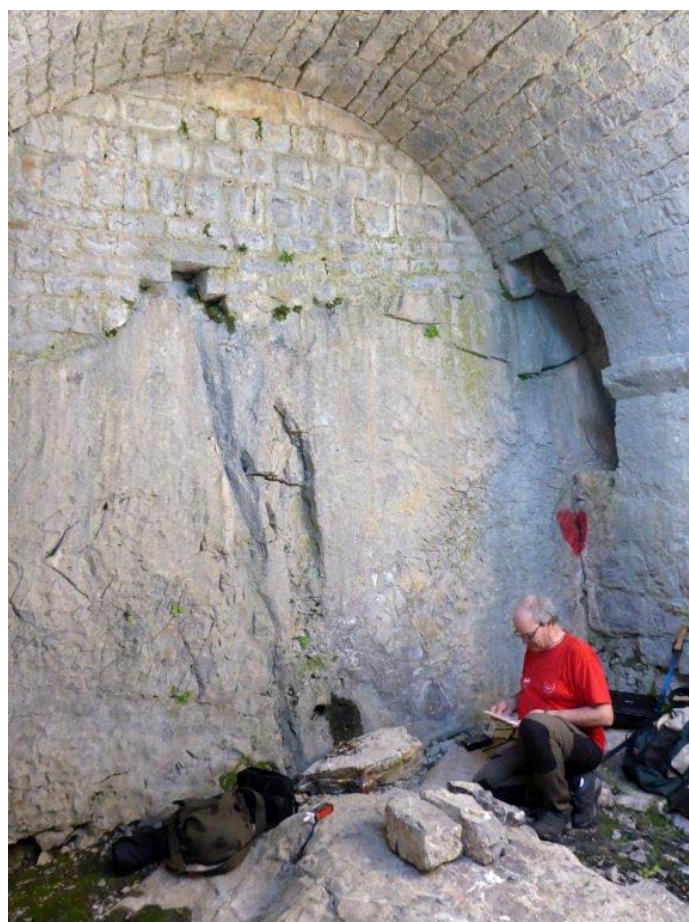


Figure 107 : Séance d'étalonnage à Cazevieille

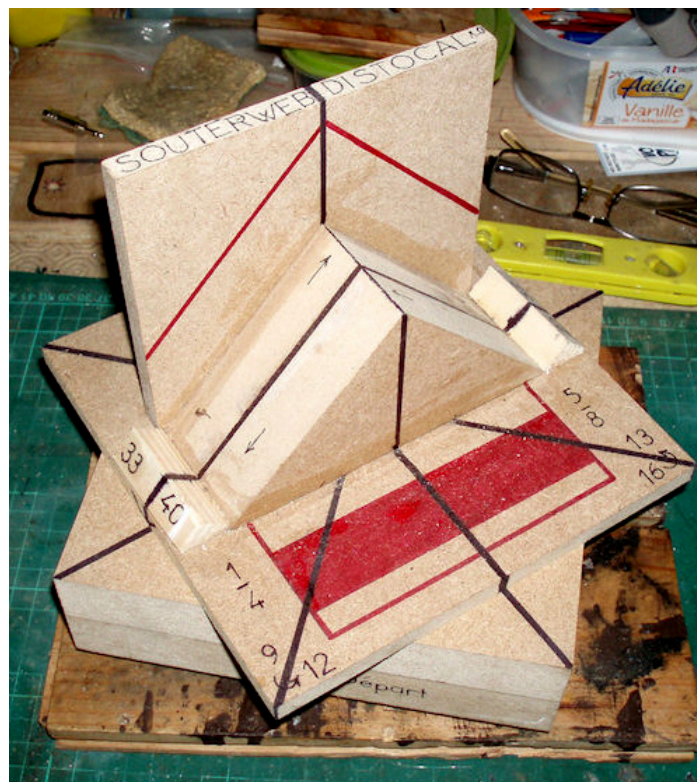


Figure 108 : Le "calibrateur rotatif" de Domi

Le problème est inhérent à ces structures : lorsque l'on effectue les 4 rotations axiales avec le DistoX posé sur le support en bois, le spot du laser change de position. En effet le laser n'est pas positionné au centre géométrique du DistoX et de ce fait le spot se promène lors de cette manœuvre et les 4 mesures en rotation ne sont pas coaxiales. Or l'algorithme de calcul du coefficient de correction suppose qu'elles le soient.

Pour bien voir ce phénomène nous l'avons matérialisé sur l'illustration ci-dessous :

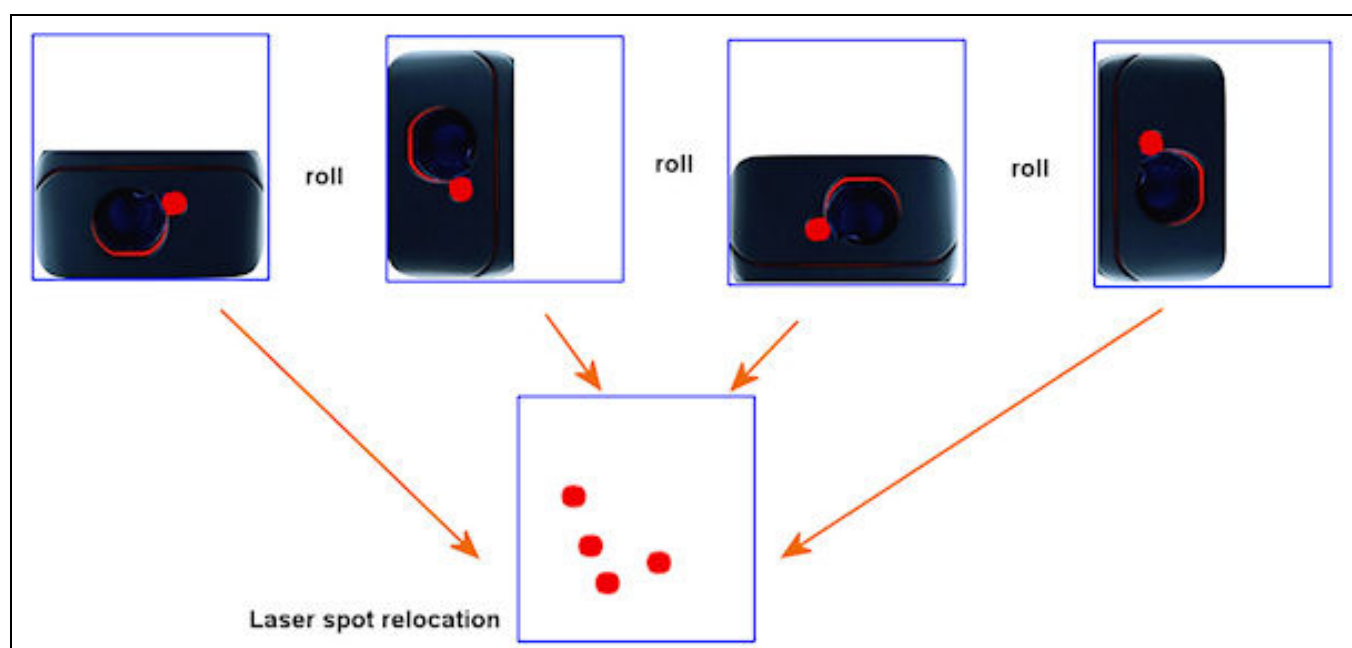


Figure 109 : Souci de désaxement du spot laser en rotation.

Pour palier à cet inconvénient il faudrait concevoir un support qui permette de faire tourner le DistoX selon l'axe de son laser. En cherchant sur le Web on trouve plusieurs bricolages qui tiennent compte de cette contrainte.

Tout d'abord il y a le cylindre dont la vidéo a été postée sur Youtube fin 2017 par un anglais dont le pseudo est « huminthing ». Il s'agit de calibrer un DistoX ancien modèle (basé sur le Leica Disto A3) mais le principe serait également fonctionnel avec un DistoX2. Il permet de faire tourner le distancemètre selon l'axe du laser et ainsi de respecter l'immobilité du spot. Pour cela il faut d'abord faire pivoter le cylindre selon son axe longitudinal face à un écran, puis fixer le Disto sur un support à l'intérieur avec du ruban adhésif afin de bien placer le spot du laser dans l'axe de l'orifice de la face avant. Ensuite seulement les 56 mesures peuvent être effectuées, sans l'aide d'une cible, car le spot sera immobile.

Ce « calibrateur » est formé de trois pièces :

- un cylindre ouvert incorporant un support pour le DistoX et percé à une extrémité
- un berceau plastique en demi-cercle dans lequel le cylindre vient s'insérer et tourner
- un pied en plastique pour surélever le berceau et effectuer les mesures inclinées à 45°

La vidéo de présentation est visible à cette adresse : https://www.youtube.com/watch?v=_MPIsTRMdlq



Figure 110 : Un "calibrateur" respectant l'axe du laser en rotation.

Le spéléo ukrainien Mykyta Kozlov a fabriqué un autre système, disponible sur le Web, et qui résout la question d'une autre façon.

Ce dernier nécessite d'être monté sur un pied photo amagnétique et être fixé au bout d'une rallonge en aluminium qui va écarter le DistoX de toute influence résiduelle de certaines parties du pied photo tout en lui donnant de l'espace pour évoluer. Cette rallonge joue un peu le même rôle que la rallonge inox fabriquée par nos soins pour les expériences décrites dans l'article de juillet 2018, « Évaluation des DistoX V. 1.0 », page 40 (voir adresse de téléchargement ci-dessus).

En dehors de cette rallonge amagnétique, le système est composé de plusieurs pièces qu'il faudra usiner en aluminium ou faire imprimer à l'imprimante 3D.

- un cube tronqué et perforé (56 directions)
- un sabot muni d'un axe de rotation aligné sur le laser du DistoX

Il est aussi possible de choisir comme support un cuboctaèdre tronqué qui va permettre d'ajouter 12 directions de calibration supplémentaires (68 au total) afin d'affiner encore le réglage du DistoX et d'abaisser encore plus le coefficient résiduel.

La rallonge est montée sur le pied photo, le sabot se fixe sur le DistoX avec une vis photo alu, le cube se fixe sur la rallonge avec des vis amagnétiques. Ensuite on enfonce l'axe du sabot successivement dans chacun des trous du cube où on fait tourner le DistoX de 90° entre chaque mesure (ajustage par frottement).

Il faut noter que tous les fichiers nécessaires à cette opération sont disponibles sur le Web à l'adresse : https://bitbucket.org/ngry/distox2_cube/src Ces fichiers sont exploitables avec le logiciel gratuit OpenSCAD disponible sur : <http://www.openscad.org/>

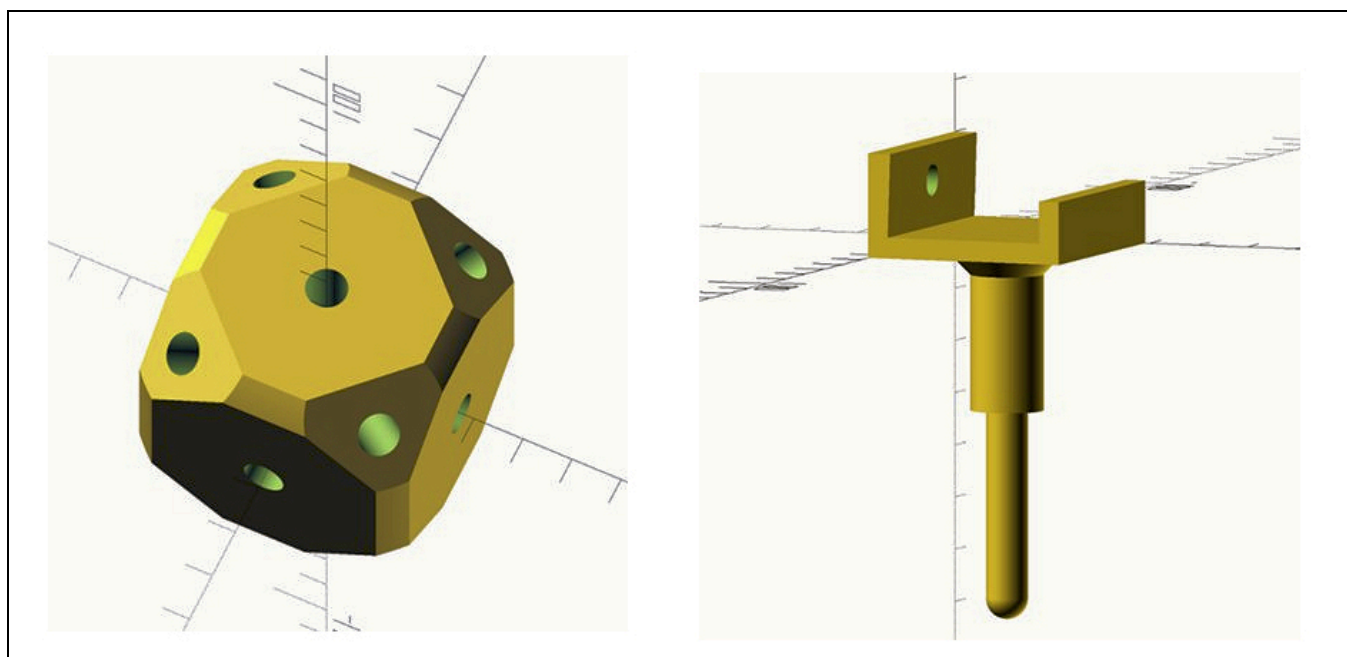


Figure 111 : Les deux pièces du système cube/pivot



Figure 112 : Le système cube/pivot monté sur la rallonge alu pour pied photo.

Une vidéo de la mise en œuvre de ce système est disponible à l'adresse suivante :
<https://www.youtube.com/watch?v=A7fQdz4pPtE>

10.2. Comment le « pseudo-étalonnage » d'un DistoX devient-il obsolète ?

Au cours de l'atelier topographie du rassemblement Caussenard d'Arre (30) en septembre 2024, une des interrogations qui est revenue le plus souvent a été « - Pourquoi est-ce que le Disto perd sa précision au bout d'un moment ? ». Effectivement on peut s'interroger sur le problème suivant : dans quelles conditions et à quelle fréquence un DistoX voit-il son réglage optimal devenir défaillant ?

Il n'est pas facile de répondre à cette question car, si on connaît plusieurs éléments défavorables au bon fonctionnement de l'appareil (DistoX ou BRIC), il est quasiment impossible de prévoir la fréquence à laquelle il va falloir le réajuster. Ce qui est certain c'est que la stabilité dans la durée du « pseudo étalonnage » (par les 56 mesures) est fluctuante et incertaine. Énumérons d'abord quelques facteurs dont l'expérience a prouvé qu'ils vont dégrader l'étalonnage lors du stockage de l'appareil :

- Présence proche d'un champ magnétique (perforateur avec aimants au stator, haut-parleurs, stylets magnétiques de tablette...)
- Présence proche d'un champ électrique (batteries, appareillages électriques en fonction, lampes allumées, lignes électriques alimentées, smartphone allumé...)
- Fortes fluctuations de température et de pression (voyages en avion...)

De plus le facteur temps entre en compte car même stocké dans de très bonnes conditions l'étalonnage de l'appareil va diminuer au cours du temps probablement à cause simplement de phénomènes électroniques internes (modification de la tension de la batterie, usure des composants...).

Vous comprendrez alors que le nombre de variables est trop important pour qu'on puisse donner de fourchette ni d'estimation sur l'écart entre deux étalonnages.

La seule solution est donc de vérifier systématiquement la précision des mesures avant de commencer une topographie. Pour cela on peut choisir deux points et effectuer un aller-retour en pratiquant 4 visées avec rotation axiale de 90° entre chacune (tourner le DistoX sur lui-même comme lors de l'étalonnage). Au total nous aurons donc 8 visées (4 à l'aller et 4 au retour). Souvent une seule visée au retour peut suffire (5 visées au total seulement). Exporter ensuite ces données vers un logiciel de carnet topo (Topodroid p. e.), si nécessaire les nommer correctement pour que la dernière visée renvoie bien sur le point de départ et vérifier que le bouclage est correct. Si le résultat est mauvais (plusieurs % d'écart) alors un nouveau « pseudo-étalonnage » sera nécessaire.

10.3. La véritable courbe d'étalonnage est-elle encore valable après un « pseudo-étalonnage » ?

Expériences à réaliser.

À RÉDIGER

11. Remerciements

Tous nos remerciements à :

- Jean-Pierre Rouges pour son aide précieuse le jour des relevés à la Salamandre.
- Richard Villeméjeanne pour nos échanges fructueux.
- Philippe Vernant pour la fourniture des données de la topographie de la Caverne du Maure (34).
- Marco Corvi (TopoDroid) et Beat Heeb (PocketTopo) pour les nombreux mails et contacts que nous avons eus avec eux.

12. Annexe : qu'est-ce qu'un écart-type ?

L'écart type (SD pour Standard Deviation en anglais), aussi orthographié écart-type, est une notion mathématique définie en probabilités et appliquée à la statistique. En probabilité, l'écart-type est une mesure de la dispersion d'une variable aléatoire ; en statistique, il est une mesure de dispersion des données. Il est défini comme la racine carrée de la variance, ce qui ne nous avance pas beaucoup.

Nous sommes dans un cas particulier car nous recherchons l'écart-type d'une variable aléatoire qui prend un nombre fini de valeurs réelles (variable aléatoires discrètes). Cette variable se matérialise par une colonne de valeurs dans Excel. Si on appelle :

- m la valeur moyenne de toutes les valeurs
- n le nombre de valeurs
- e_i une valeur particulière
- r_i un écart particulier
- q l'écart type des valeurs

$$r_i = e_i - m$$

et

$$m = \frac{\sum e_i}{n}$$

Dans ce cas et par définition, l'écart-type q

$$q = \frac{1}{n} \sqrt{\sum r_i^2}$$

Le problème, dans cette formule, c'est qu'elle fait intervenir la valeur moyenne lors du calcul d'un écart particulier r . Il faut donc déjà calculer la valeur moyenne avant d'évaluer chaque écart particulier, l'élever au carré, faire la somme de tous ces écarts élémentaires au carré et, enfin, en faire la moyenne. On peut développer la formule ci-dessus en

$$q = \frac{1}{n} \sqrt{\sum \left(e_i - \frac{\sum e_i}{n} \right)^2}$$

Le carré de la différence c'est la somme des carrés moins le double produit ou, comme on disait au collège, $(a-b)^2 = a^2 - 2ab + b^2$ ☺

$$q = \frac{1}{n} \sqrt{\sum \left(e_i^2 + \frac{(\sum e_i)^2}{n^2} - 2 \cdot e_i \cdot \frac{\sum e_i}{n} \right)}$$

Quand on fait la somme, à la fin, on retrouve les termes suivants :

$$q = \frac{1}{n} \sqrt{\sum e_i^2 + n \cdot \frac{(\sum e_i)^2}{n^2} - 2 \cdot \frac{\sum e_i}{n} \cdot \sum e_i}$$

Qui se simplifient ainsi :

$$q = \frac{1}{n} \sqrt{\sum e_i^2 + \frac{(\sum e_i)^2}{n} - 2 \cdot \frac{(\sum e_i)^2}{n}}$$

$$q = \frac{1}{n} \sqrt{\sum e_i^2 - \frac{(\sum e_i)^2}{n}}$$

Alors pour terminer (ouf) :

$$q = \sqrt{\frac{\sum e_i^2}{n} - \left(\frac{\sum e_i}{n} \right)^2}$$

Autrement dit : l'écart type q est la racine carrée de la moyenne des carrés moins le carré de la moyenne. Il suffit donc, lorsqu'on a calculé e dans une colonne, de calculer e^2 et de le mettre dans une autre colonne. À la fin, on somme les deux colonnes et on calcule facilement l'écart type q .

Dans le cas où on récupère des valeurs à la volée (les unes après les autres sans savoir quand cela va s'arrêter), il n'est donc pas nécessaire de conserver les valeurs individuellement. Il est facile quand on reçoit une nouvelle valeur :

- De l'additionner à la somme des valeurs,
- D'en calculer le carré et de l'additionner à la somme des carrés
- D'ajouter +1 au nombre de valeurs reçues

À la fin (quand on décide d'arrêter) il est alors simple, avec ces trois variables, de calculer la valeur moyenne et l'écart-type. C'est ce qui est fait par une des macros en Visual Basic.

Par contre, pour accéder à la distribution, il faudrait compter - à la volée - dans un échantillon de valeurs prédéterminées. Ce n'est pas la méthode retenue pour afficher les distributions de cette étude.

13. Bibliographie

- ❖ Kaye, Thomas A. (1981). Analysis of the Propagation of Error in Cave Surveys. - Proceedings of the Eighth International Congress of Speleology: a meeting of the International Union of Speleology, p. 800-801
- ❖ AFNOR, (1986). Traitement des résultats de mesure. Propagation des erreurs (NF X 06-046). - Paris, - 8 p.
- ❖ Prophete P. (1998). Topographie souterraine in « Dossier Instruction EFS », FFS-EFS, Lyon
- ❖ Bourdillon C. Coordinateur, (2001). Notions de base sur les incertitudes et le traitement des données expérimentales en physique, chimie, biologie. - Université de Technologie de Compiègne
- ❖ Joint Committee for Guides in Metrology, BIPM, (2008). Guide pour l'expression de l'incertitude de mesure.
- ❖ Thrun, R (2009). A Statistical Study of Survey Errors and Closure Adjustments or How Accurate are our Cave Surveys?
- ❖ Faculté des sciences Institut de physique, (2014). Introduction au calcul d'erreurs. - Université de Neuchâtel

14. Table des illustrations

Figure 1 : Travaux au col de Thalys, François au théodolite.....	9
Figure 2 : Travaux à la Salamandre, François et Jean-Pierre au pied du puits	9
Figure 3 : Justesse, fidélité et exactitude relative d'une série de 10 mesures	11
Figure 4 : Série de 10 mesures de mauvaise qualité	12

Figure 5 : Erreur sur le relèvement.....	13
Figure 6 : Erreur instantanée et erreur maximale	15
Figure 7 : D=30m G=25° Erreur $\pm 10^\circ$	16
Figure 8 : Exemple de positionnement des 10 premiers points topo (visées de 10 m).....	17
Figure 9 : Écart géométrique 100 visées de 10 m, erreur de relèvement maxi $\pm 10^\circ$	18
Figure 10 : Écart géométrique 100 visées de 10 m, erreur de relèvement maxi $\pm 10^\circ$	19
Figure 11 : Écart géométrique 100 visées de 10 m, erreur de relèvement maxi $\pm 10^\circ$	19
Figure 12 : Écart géométrique 100 visées de 10 m, erreur de relèvement maxi $\pm 10^\circ$	20
Figure 13 : Écart géométrique 10 000 visées de 10 m, erreur de relèvement maxi $\pm 10^\circ$	20
Figure 14 : Écart géométrique 10 000 visées de 10 m, erreur de relèvement maxi $\pm 10^\circ$	21
Figure 15 : Effet de l'erreur de décentrement, B et B' ne se superposent pas.....	22
Figure 16 : Propagation de l'erreur de positionnement pour 500 visées	23
Figure 17 : Propagation de l'erreur de positionnement pour 2500 visées.....	23
Figure 18 : Propagation de l'erreur de positionnement pour 10 000 visées	24
Figure 19 : 5 tranches de 100 visées	24
Figure 20 : Exemple d'une topographie aléatoire de 10 mesures de 100 m	27
Figure 21 : Exemple d'une topographie aléatoire de 20 mesures de 50 m	27
Figure 22 : Exemple des 1000 premières valeurs prises par la série aléatoire.....	28
Figure 23 : Distribution de 1000 valeurs de [-1, +1] par pas de 0,1	29
Figure 24 : Nuage sur la base de coordonnées x,y aléatoires.....	29
Figure 25 : Distance des points du nuage par rapport à 0,0 (numéro du point en abscisse).....	30
Figure 26 : Distribution des distances à 0,0 (pas d'analyse 0,1)	30
Figure 27 : Répartition des distances.....	31
Figure 28 : Nuage des coordonnées x,y (loupe)	34
Figure 29 : Distribution des écarts.....	35
Figure 30 : Nuage des coordonnées x,y (loupe)	35
Figure 31 : Distribution des écarts.....	36
Figure 32 : Cas typique d'un bruit de mesure de $\pm 0.5^\circ$ (visées de 10 m)	37

Figure 33 : Cas typique d'un bruit de mesure de $\pm 0.5^\circ$ (visées de 50 m)	37
Figure 34 : Cas typique d'un bruit de mesure de $\pm 0.5^\circ$ (visées de 100 m)	38
Figure 35 : Écarts constatés sur 5 topos (10 visées de 100 m)	39
Figure 36 : Écarts constatés sur 5 topos (100 visées de 10 m)	39
Figure 37 : les deux paramètres aléatoires de l'erreur de décentrement	40
Figure 38 : Cas typique d'un décentrement maxi de 0.1 m (visées de 100 m)	41
Figure 39 : Cas typique d'un décentrement maxi de 0.1 m (visées de 10 m)	41
Figure 40 : Cas typique d'un décentrement maxi de 0.4 m (visées de 10 m)	42
Figure 41 : Représentation géométrique de l'excentricité d'un compas	43
Figure 42 : Cas typique d'une distorsion de $\pm 1^\circ$ (visées de 100 m)	44
Figure 43 : Cas typique d'une distorsion de $\pm 1^\circ$ (visées de 50 m)	45
Figure 44 : Cas typique d'une distorsion de $\pm 1^\circ$ (visées de 10 m)	45
Figure 45 : Écart statique de 1° (visées de 100 m)	46
Figure 46 : Écart statique de 1° (visées de 100 m) avec $\pm 0.1^\circ$ de bruit	47
Figure 47 : Écart statique de 1° (visées de 50 m)	48
Figure 48 : Écart statique de 1° (visées de 10 m)	48
Figure 49 : Écart statique de 1° (visées de 10 m) / loupe	49
Figure 50 : Ecart mesurés sur IRIS 50 en septembre 2018	50
Figure 51 : Écarts non lissés + courbe de tendance + équation	50
Figure 52 : Écarts + courbe de tendance + équation pertinente	51
Figure 53 : Graphique de la courbe de tendance	51
Figure 54 : Écart corrigé lissé	51
Figure 55 : Écart corrigé non lissé	52
Figure 56 : Comparaison de l'écart de gisement avec les deux DistoX	53
Figure 57 : Précision attendue avec le DistoX n°1 et des visées de 10 m	54
Figure 58 : Distribution des écarts du DistoX n°1. Visées de 10 m, résolution 0.1 m	54
Figure 59 : Précision attendue avec le DistoX n°2 et des visées de 10 m	55
Figure 60 : Distribution des écarts du DistoX n°2. Visées de 10 m, résolution 0.2 m	55

Figure 61 : Visées courtes et longues sur une même topographie	56
Figure 62 : Sinusoïde de non linéarité (excentricité) +/- 3°	61
Figure 63 : Sinusoïde de non linéarité (excentricité) +/- 1°	61
Figure 64 : Deux cheminements topographiques dont un est erroné	63
Figure 65 : Bruit +/- 2° et décentrement 0,1 (topographie virtuelle de 100 visées)	64
Figure 66 : Bruit +/- 0.5° et décentrement 0,1 (topographie virtuelle de 100 visées)	65
Figure 67 : Un peu de triangulation.....	66
Figure 68 : Une topographie aléatoire entre deux points fixes connus	66
Figure 69 : Topographie simulée d'une traversée.....	67
Figure 70 : Topographie simulée d'une boucle.....	68
Figure 71 : Vecteur d'erreur à répartir sur une traversée.....	69
Figure 72 : Comparaison des mesures exactes et erronées (décalage du 0), traversée	70
Figure 73 : Comparaison des mesures exactes et compensées (décalage du 0), traversée	71
Figure 74 : Écart avant et après compensation (décalage du 0), traversée	71
Figure 75 : Écart avant et après compensation (NL), traversée	72
Figure 76 : Écart avant et après compensation (décentrement), traversée, essai 1	73
Figure 77 : Écart avant et après compensation (décentrement), traversée, essai 2	73
Figure 78 : Écart avant et après compensation (bruit), traversée, essai 1.....	74
Figure 79 : Écart avant et après compensation (bruit), traversée, essai 2.....	74
Figure 80 : Écart avant et après compensation (bruit), traversée, essai 3.....	75
Figure 81 : Vecteur d'erreur à répartir sur la boucle.....	76
Figure 82 : Comparaison des mesures exactes et erronées (décalage du 0), boucle.....	77
Figure 83 : Écart avant et après compensation (NL), boucle.....	77
Figure 84 : Écart avant et après compensation (décentrement), boucle, essai 1	78
Figure 85 : Écart avant et après compensation (décentrement), boucle, essai 2.....	78
Figure 86 : Écart avant et après compensation (bruit), boucle, essai 1	79
Figure 87 : Écart avant et après compensation (bruit), boucle, essai 2	79
Figure 88 : Écart avant et après compensation (bruit), boucle, essai 3	80

Figure 89 : Exemple d'une courbe d'étalonnage de DistoX2	83
Figure 90 : L'écran principal de Topocor	84
Figure 91 : Situer le dossier .zip de TopoDroid	87
Figure 92 : Détail de l'affichage de Topocor	87
Figure 93 : Affichage des tâches en cours par Topocor	88
Figure 94 : Comment Topocor signale-t-il une erreur.....	88
Figure 95 : Les champs à vérifier avant exécution	88
Figure 96 : Le bouton IMPORT de TopoDroid.....	89
Figure 97 : Premier avertissement d'écrasement de Topocor	89
Figure 98 : Second avertissement d'écrasement de Topocor.....	89
Figure 99 : Le croquis <1> PLAN de la cavité native "Exemple"	91
Figure 100 : Les statistiques complètes de la cavité native "Exemple"	91
Figure 101 : Le croquis <2> PLAN de la cavité native "Exemple"	92
Figure 102 : Le croquis <1> PLAN de la cavité modifiée "ZExemple".....	92
Figure 103 : Les statistiques complètes de la cavité ZExemple2.....	93
Figure 104 : Erreur signalée par Topocor	94
Figure 105 : Message signalant des valeurs de distance nulles	94
Figure 106 : Le « calibrateur » de l'AESDA	97
Figure 107 : Séance d'étalonnage à Cazevieille	97
Figure 108 : Le "calibrateur rotatif" de Domi.....	98
Figure 109 : Souci de désaxement du spot laser en rotation.....	98
Figure 110 : Un "calibrateur" respectant l'axe du laser en rotation.	99
Figure 111 : Les deux pièces du système cube/pivot.....	100
Figure 112 : Le système cube/pivot monté sur la rallonge alu pour pied photo.....	101

Crédit photographique : *Dominique ROS et Richard Villeméjeanne*

*François MARCHAND (S.C. du Jura)
Dominique ROS (S.C. de Montpellier)
2024*