Zeitschrift: Vermessung, Photogrammetrie, Kulturtechnik : VPK = Mensuration, photogrammétrie, génie rural

Herausgeber: Schweizerischer Verein für Vermessung und Kulturtechnik (SVVK) = Société suisse des mensurations et améliorations foncières (SSMAF)

Band: 91 (1993)

Heft: 2

Artikel: Application de la méthode des paramètres d'échelle locaux dans le réseau-test de Turtmann

Autor: Rüeger, J.-M. / Dupraz, H.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-234935

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 13.07.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

Application de la méthode des paramètres d'échelle locaux dans le réseau-test de Turtmann

J.-M. Rüeger, H. Dupraz

La réduction classique des distances électroniques, avec une «première correction de vitesse» basée sur des données météorologiques observées aux deux extrémités, conduit souvent à des distances réduites incorrectes. Dans certains cas, la méthode des paramètres d'échelle locaux offre une alternative où l'observation de la température, de la pression et de l'humidité de l'air aux stations-réflecteurs n'est plus nécessaire.
Après une brève présentation de cette méthode, on montre en s'appuyant sur les mesures effectuées dans le réseau-test de Turtmann qu'elle permet d'atteindre, même dans le cas de grandes différences de niveau, de vents et d'ensoleillement très variables, de meilleures précisions internes et externes que la méthode de réduction traditionnelle.
En septembre 1991, l'Institut des mensurations de l'EPF-Lausanne a mesuré, en un jour, avec deux Wild Distomat DI 3000, toutes les distances du réseau de huit piliers, dans les deux sens. Leur compensation tridimensionnelle a livré une précision a posteriori de ± (0,26 mm +0,18 ppm); la compensation bidimensionnelle des mêmes mesures a donné ±(0,85 mm +0,94 ppm). Par comparaison avec les valeurs de référence de l'Office fédéral de topographie, les écarts des coordonnées compensées sont dans les deux cas inférieurs à ±4,3 mm. Ces résultats ont également été comparés avec ceux d'une nouvelle compensation de distances observées en 1986 avec un Mekometer ME 5000, et avec des observations réalisées en Australie.

Die traditionelle Reduktion elektronisch gemessener Distanzen mit einer ersten Geschwindigkeitskorrektion, die aus meteorologischen Messungen an den Endpunkten abgeleitet wird, führt häufig auf eine Verfälschung der reduzierten Distanzen. In speziellen Fällen bietet sich die Methode der lokalen Massstabsparameter als Alternative an, die ohne Messungen von Lufttemperatur, Luftdruck und Luftfeuchtigkeit an den Reflektorstationen auskommt. Nach einer kurzen Einführung in diese Methode wird am Beispiel des schweizerischen GPS Testnetzes Turtmann gezeigt, dass die Anwendung der Methode der lokalen Massstabsparameter, selbst bei grossen Höhenunterschieden, unterschiedlicher Sonneneinstrahlung und variierenden Windverhältnissen, bessere innere und äussere Genauigkeiten liefert als die traditionelle Reduktionsmethode. Bei einer Neumessung des Netzes mit zwei Wild Distomat DI 3000 durch die ETH Lausanne im Jahre 1991 wurden alle Strecken im 8-Punkt-Netz in einem Tag in beiden Richtungen gemessen. Distanzgenauigkeiten (a posteriori) von ± (0,26 mm +0,18 ppm) bei dreidimensionaler und ± (0,85 mm +0,94 ppm) bei zweidimensionaler Ausgleichung wurden erzielt. Die Restklaffungskomponenten (in Richtung der Koordinatenachsen) der ausgeglichenen Koordinaten gegenüber den Referenzwerten des Bundesamtes für Landestopographie sind in beiden Fällen kleiner als ±4,3 mm. Diese Resultate wurden mit denjenigen einer Neuausgleichung der Mekometer ME5000 Messungen aus dem Jahre 1986 und australischer Testmessungen verglichen.

1. Introduction

La mesure électronique des distances (MED) s'appuie sur la connaissance de la vitesse de la lumière. Lors de mesures de distances dans l'atmosphère, cette vitesse dépend de l'indice de réfraction de l'air, et donc de sa densité. Normalement, ces grandeurs sont obtenues à partir de mesures de la température, de la pression et de l'humidité, puis prises en compte sous la forme de la «première correction de vitesse». Naturellement, les données météorologiques utilisées pour cette correction devraient correspondre aux valeurs moyennes le long du trajet de l'onde.

Dans la pratique quotidienne, on se contente de saisir les paramètres météorologiques aux deux extrémités des distances mesurées, à la hauteur de l'instrument. Comme le trajet de l'onde, pour les distances d'une certaine longueur, n'est généralement pas parallèle au sol, les paramètres météorologiques ainsi mesurés ne correspondent pas exactement à ceux valables sur l'ensemble du chemin parcouru par le rayon. On sait que par journées chaudes et ensoleillées on mesure souvent des températures trop élevées (jusqu'à 5 °C). Par nuits claires, on mesure souvent des températures trop basses (jusqu'à 6 °C, voir [16]). Il en résulte que les distances peuvent être faussées de quelques ppm. Cela explique les différences souvent constatées entre mesures de jour et de nuit, ou celles bien connues entre distances mesurées simultanément à l'aide d'ondes centimétriques ou lumineuses.

Plusieurs, méthodes ont vu le jour au cours des ans pour réduire ces erreurs sur les observations météorologiques. On peut par exemple mesurer ces paramètres en utilisant des mâts de 3 à 10 mètres, ou le long du trajet de l'onde grâce à l'emploi d'un avion, d'un hélicoptère ou d'un planeur motorisé. On peut aussi ne mesurer des distances que par temps couvert et venteux. Mais ces méthodes sont trop coûteuses pour la plupart des applications.

Il existe une méthode très différente, connue à l'origine sous le nom de «méthode des rapports de distances» (en anglais: line ratios, length ratios), et utilisée aujourd'hui sous le nom de «méthode des paramètres d'échelle locaux» (en anglais: local scale parameters).

Cette méthode se passe, en principe, de la saisie des paramètres météorologiques. L'échelle absolue des distances est déterminée par les points fixes introduits dans la compensation. A la base, on introduit dans la compensation un paramètre d'échelle inconnu et commun à toutes les distances mesurées à une même station pendant un temps relativement court. Avant la compensation, les distances doivent avoir été corrigées pour tenir compte des gradients verticaux de température et de pression. Les fondements physiques de la méthode ont été publiés en 1989 (voir [21]).

Des essais réalisés de 1988 à 1990 en Australie dans des régions légèrement accidentées, ont donné de très bons résultats: la répétabilité atteignait ±1 mm pour des distances comprises entre 1,4 et 4,3 km mesurées avec un WILD Distomat DI 3000 (voir [21]). Une compensation simultanée de quatre époques d'observation par cette méthode indiqua une erreur moyenne standard a posteriori de ±(0,9 +0,5 ppm). Pour comparaison, une compensation classique commune, avec distances réduites de la première correction de vitesse, indiqua une erreur moyenne a priori sensiblement plus défavorable, ± (0,75 +1,4 ppm). Ces résultats réjouissants, obtenus en terrain plutôt plat appelaient une confirmation par des essais à conduire dans un réseau marqué par des différences altimétriques beaucoup plus grandes. Dans ce but, F. K. Brunner suggéra d'utiliser le réseau-test suisse de Turtmann.

2. Introduction à la «méthode des paramètres d'échelle locaux»

Pour la compréhension de la méthode des paramètres locaux, il faut rappeler quelques caractéristiques de la couche atmosphérique limite, qui peut atteindre une altitude de plusieurs centaines de mètres. A l'intérieur de cette couche, les surfaces isothermiques sont à peu près parallèles à la surface du sol. La partie inférieure de cette couche-limite, dans laquelle la température et l'humidité varient beaucoup en fonction de la saison, du temps et du moment de la journée, s'appelle souvent «couche proche». Elle s'étend, de jour, jusqu'à 20–50 m au-dessus du sol. Dans la couche située au-dessus d'elle, les gradients de température et d'humidité ne varient plus beaucoup en fonction du moment de la journée: de jour, le gradient (négatif) de température ne s'écarte presque pas de la valeur adiabatique; il s'en rapproche complètement quand on monte dans cette couche.

Pendant la nuit se produit une inversion de température, qui fait mesurer au sol des températures plus basses que dans la couche située plus haut. Au cours de la nuit, la couche proche peut atteindre plusieurs décamètres et la couche-limite quelques hectomètres. Contrairement aux comportements de jour, c'est un gradient de température positif qui domine, pour égaler peu à peu vers le haut la valeur adiabatique.

Lorsqu'on mesure d'assez longues distances, il est fréquent que le trajet de l'onde quitte la couche proche et traverse surtout la couche-limite située au-dessus, dans laquelle les gradients de température et d'humidité sont beaucoup plus stables. Le fait que le trajet de l'onde soit situé en grande partie au-dessus de la couche proche est exploité dans les développements physico-mathématiques: la couche proche est ignorée et toutes les distances mesurées sont réduites aux conditions atmosphériques de la couche-limite grâce à celles observées aux stations-instruments. Dans la compensation, on peut déterminer pour chaque station-instrument un (ou plusieurs) paramètre d'échelle local, qui se rapporte en principe à la température et à l'humidité qui auraient été observées en l'absence de la couche proche.

L'altération par la couche proche des distances mesurées (effets de proximité du sol) est relativement faible, car la hauteur de cette couche n'excède pas quelques décamètres. On peut l'illustrer avec un petit exemple. Supposons une station-instrument située sur une calotte de rayon égal à 200 m et des visées d'inclinaisons inférieures à dix degrés; alors l'altération moyenne d'une distance est comprise entre 0,05 et 0,065 mm/°C. Même si l'effet de sol atteint 5 °C pour la température, les distances mesurées ne sont pas faussées de plus de 0,25 mm. Si toutes les distances issues de la même station-instrument sont altérées de la même quantité et qu'elles sont de longueurs comparables, la plus grande partie de cette altération est interprétée comme erreur d'échelle et attribuée comme facteur d'échelle local à la station.

Des effets de proximité de sol identiques agissent au voisinage des stations-réflecteurs. Leur prise en compte par les facteurs d'échelle locaux (des stations-instruments) sera d'autant plus efficace que les conditions de topographie, d'ensoleillement et de vent seront comparables sur les stations-réflecteurs.

En résumé, on peut dire que les distances mesurées en un court laps de temps:

- sont affectées par les mêmes effets de proximité du sol à la station-instrument;
- sont affectées par les mêmes effets de proximité du sol aux stations-réflecteurs;
- subissent les mêmes altérations d'échelle, pour autant qu'elles correspondent à des profils en long comparables, ayant une même couverture du sol et soumis à un ensoleillement et des vents identiques.

Par conséquent, toutes les distances obersvées à une station-instrument en un court laps de temps auront des échelles comparables, pour autant qu'on ait préalablement modélisé et éliminé les différences d'échelle provoquées par les gradients de température et de pression et par les différences d'altitude avec les stations-réflecteurs.

La formule développée par F. K. Brunner est donnée ici sans démonstration. Pour des développements complets, on consultera Brunner et Rüeger 1992 (voir [7]). Cette formule (voir [21]) réduit la distance mesurée d' à la corde du chemin suivi par le rayon d_2. (Les symboles sont repris de [18]). Elle ne remplace donc pas seulement la première et la deuxième correction de vitesse par l'intégration de l'indice de réfraction le long du chemin parcouru, mais aussi la correction géométrique du chemin curviligne d' à la corde d_2 entre l'instrument et le réflecteur. On suppose ici que les distances sont mesurées avec un distancemètre où la constante d'échelle est initialisé avec PPM = O.

La différence d'altitude entre A et B est désignée par Δh; la distance zenithale ellipsoïdique (sans réfraction, calculée par rapport aux normales sur l'ellipsoïde), de A vers B est désignée par z. T_A est la température (en ° Kelvin), mesurée à la station-instrument A; IC est la correction instrumentale (avec constante d'addition, etc.) et n_{REF} est l'indice de réfraction appliqué automatiquement par le distancemètre aux valeurs mesurées lorsque PPM = O. Le cœfficient C_A peut être exprimé ainsi:

$$c_A = -0{,}02439 \frac{(n_A - 1)}{T_A} \qquad (2)$$

L'indice de réfraction n_A à la station A, à estimer comme paramètre inconnu, est dégagé de l'effet de la couche proche (effet de proximité du sol). Comme tel, il est égal pour toutes les distances mesurées en A pendant un court laps de temps. Dès que deux ou plusieurs équations contiennent le même indice de réfraction n_A, on peut déterminer celui-ci par compensation comme «paramètre d'échelle local» inconnu. Il résulte de l'équation (1) que le paramètre d'échelle local n'est pas déterminé directement, mais comme différence $(n_{REF} - n_A)$.

L'avant-dernier terme de l'équation (1) modélise le gradient de pression et le comportement adiabatique de la température le long chemin MED. Le dernier terme correspond à la correction géométrique pour passer du chemin MED curviligne à la corde rectiligne. Les écarts aux conditions adiabatiques dans la couche-limite de l'atmosphère, qui se trouve, comme on l'a déjà dit, entre la limite supérieure de la couche proche (env. 20 à 100 m au-dessus du sol) et la limite inférieure de l'atmosphère libre située au-dessus (env. 1200 m), peuvent être pris en compte par un terme supplémentaire. Pour des mesures effectuées de jour, on peut admettre que les conditions adiabatiques sont remplies dans la couche-limite de l'atmosphère et alors ce terme est considéré comme nul. On doit prévoir la nuit un petit effet diabatique. La grandeur de cet effet étant inconnue, on introduit un gradient vertical Θ' inconnu de la température potentielle pour toutes les mesures effectuées de nuit avec des distances au sol supérieures à 50 m. Comme les paramètres d'échelle locaux, il est déterminé par la compensation (voir [21]).

Il ressort de l'équation (1) que la méthode des paramètres d'échelles locaux ne se passe pas totalement de données météorologiques. L'observation de la température de l'air T_A à la station-instrument est nécessaire, car son estimation à partir d'une atmosphère-standard serait trop imprécise. Comme on l'a vu, la compensation livre les paramètres d'échelle locaux sous la forme $(n_{REF} - {}_A)$. L'équation (1) montre aussi que l'indice de réfraction n'intervient pas seulement dans le deuxième terme, mais aussi dans les deux

$$d_2 = d' + d'(n_{REF} - n_A) + IC - c_A \frac{\Delta h}{2} d' + \frac{d'^3}{24} c_A^2 \sin^2 z \qquad (1)$$

derniers. Si n_{REF} est connu, on devrait pouvoir tirer l'indice de réfraction en A du paramètre d'échelle local déterminé en ce point et l'appliquer par itération dans les deux derniers termes de (1). Mais en fait, les paramètres d'échelle locaux compensés peuvent aussi être entachés d'erreurs d'échelle indépendantes de l'indice de réfraction, comme par exemple l'erreur d'échelle des coordonnées des points fixes, ou celle du distancemètre. Comme elles peuvent être non-négligeables, le logiciel développé actuellement à l'Université de New South Wales calcule pour ces 3 termes un indice de réfraction à la station A basé sur la température, la pression et l'humidité observées.

Par rapport aux solutions développées jusqu'ici, les avantages de la solution représentée par les équations (1) et (2) sont les suivants (voir [2]):

- développement rigoureux des équations à partir des lois de la physique de la couche-limite de l'atmosphère;
- aucune utilisation d'atmosphères-standards;
- observation de la température (et si possible de la pression et de l'humidité) seulement à la station-instrument.

Lors d'observations par la méthode des paramètres d'échelle locaux, il faut respecter quelques règles: contrairement à la mise en œuvre courante de la MED, les réseaux (et les bases d'étalonnage) ne peuvent plus être observés «ligne par ligne». Toutes les distances issues d'une même station doivent être observées en tant que groupe, aussi vite que possible, dans le sens des aiguilles d'une montre, puis en sens inverse (comme lors de séries angulaires, mais dans la même position de la lunette). Le schéma de mesure est représenté à la fig. 1. La mesure d'un tel groupe de distances ne devrait pas excéder une demi-heure. Les variations de température, pression et humidité linéaires par rapport au temps sont éliminées par cette manière de procéder. Une autre différence par rapport aux mesures MED courantes vient de ce qu'il faut observer le plus grand nombre possible de distances aller et retour, afin d'atteindre un nombre suffisant de mesures surabondantes. C'est pourquoi il faut prévoir le stationnement-instrument sur le plus grand nombre possible de points du réseau.

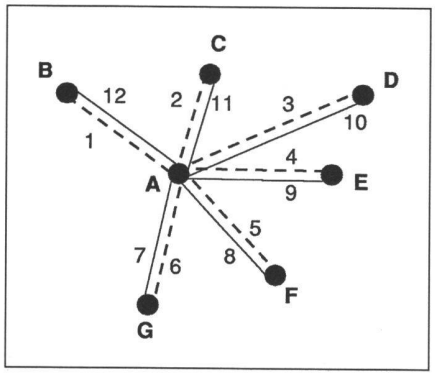

Fig. 1: Schéma d'observation des distances par la méthode des paramètres d'échelle locaux. Depuis A, on observe d'abord les distances 1 à 6 dans le sens des aiguilles d'une montre, puis les observations 7 à 12 dans le sens contraire. En outre, on ne mesure que la température en A.

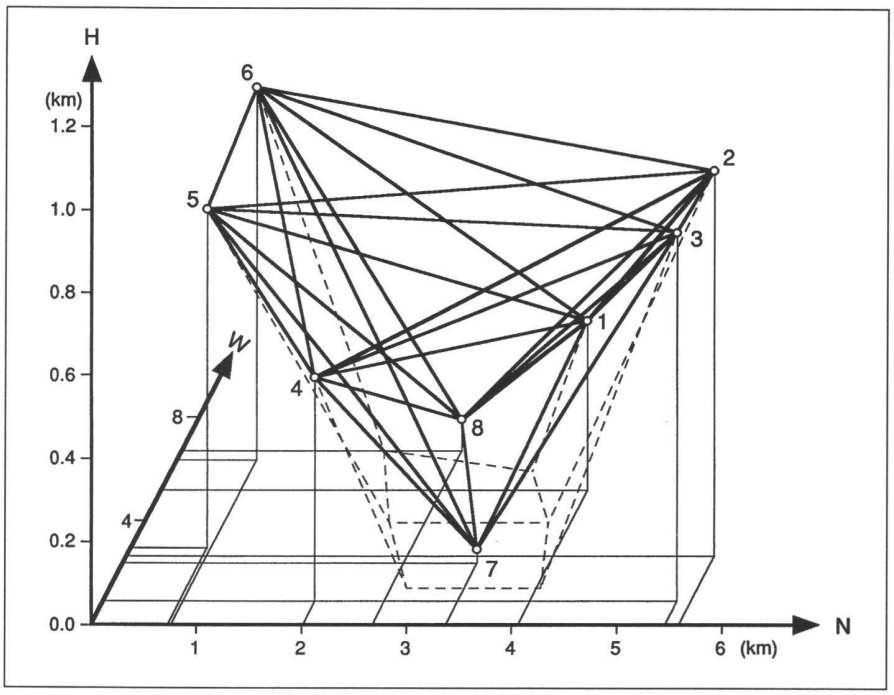

Fig. 2: Représentation tridimensionnelle des visées dans le réseau-test de Turtmann. Sur cette figure, on regarde vers l'ouest (Loèche). Le sud est à gauche, le nord à droite. Les coupes verticales de la vallée du Rhône entre les points (de l'est vers l'ouest) 4–3, 5–2 et 6–1 sont indiquées en traits fins. Les points 4 à 6 sont situés sur le flanc gauche, les points 1 à 3 sur le flanc droit. Les points 7 et 8 sont situés au fond de la vallée, à une altitude d'environ 600 m sur mer. Les points les plus élevés (2, 3 et 6) ont une altitude d'environ 1500 m.

3. Mesures de distances dans le réseau-test de Turtmann

3.1 Le réseau-test de Turtmann

Les buts visés par la création du réseau-test de Turtmann ont déjà été évoqués en plusieurs occasions. Ce réseau de huit points, situé dans la vallée du Rhône entre Sierre et Viège, fut observé en 1985/86 selon toutes les règles de l'art de la géodésie terrestre et astronomique, afin d'établir des coordonnées de référence les plus précises possible. Comme résultat d'une compensation tridimensionnelle, et en considérant comme fixe l'un des points de la vallée, les ellipsoïdes d'erreur des sept autres points sont inférieurs à 0,5 mm dans la direction radiale vers le point fixe et inférieurs à 10 mm tangentiellement (voir [22]). La grandeur et la forme du réseau sont donc beaucoup mieux déterminées que son orientation dans le système géocentrique de coordonnées. On trouve à la figure 2 une représentation du réseau-test.

3.2 Les mesures de 1986

Dans une première phase, on a procédé à une nouvelle compensation par la méthode des paramètres locaux d'échelle des 221 distances mesurées en 1986 avec le Mekometer ME5000 et mises gracieusement à disposition par l'Office fédéral de topographie. Lors des calculs effectués en 1986, on n'avait pas appliqué la méthode des paramètres d'échelle locaux. Bien au contraire: les conditions météorologiques avaient été déterminées de différentes manières, notamment en survolant les lignes de mesure avec des planeurs motorisés (voir [9]). Les mesures avaient duré selon la station de 1 h ¼ à 3 h ⅔. D'après les carnets de terrain, les températures pouvaient varier pendant la mesure des 7 distances de 1 °C à 4,8 °C, ce qui pouvait modifier les paramètres locaux d'échelle entre 0,15 ppm et 0,8 ppm.

3.3 Les mesures de 1991

En 1991, grâce à de bonnes expériences réalisées avec le Distomat Wild DI 3000 (voir [21]) et à d'excellents résultats de laboratoire ayant mis en évidence des résolutions d'environ ±0,5 mm et une stabilité d'échelle de ±0,2 ppm, on décida d'utili-

ser à Turtmann cet équipement plus simple et plus rapide. En effet, pour des distances comprises entre 1,9 et 7,4 km, la résolution du ME5000, quoique bien meilleure, ne joue plus un rôle déterminant. Par contre, on a maintenu l'emploi de réflecteurs Kern ME5000 à cause de leurs constantes ajustées à ±0,05 mm et de leur hauter connue à ±0,1 mm.
Pour la calibration des constantes d'addition des deux DI 3000, on a utilisé la base d'étalonnage de Turtmann mise en place par le Service du cadastre du Canton du Valais. Les mesures ont eu lieu le 24.09.91.
Quant au réseau proprement dit, une première mesure a été tentée le 26.09.91. A cause de nuages stationnaires contre les flancs de la vallée, la procédure de la figure 1 n'a pas pu être respectée. Les conditions météorologiques s'améliorèrent sensiblement le jour suivant (27.09.91). Les observations ce jour-là ont pu suivre la procédure souhaitée et ont duré de 10 h 48 à 18 h 40. Température, pression et humidité furent observées toutes les 10 minutes à chaque station, afin de pouvoir aussi – éventuellement – corriger les observations de la «première correction de vitesse».
On a effectué plusieurs pointés, basés sur le signal électronique optimum, à l'aller, puis au retour, ce qui donne 8 mesures vers chaque point du réseau. La moyenne des 8 mesures a été exploitée ensuite. A chaque arrivée sur une nouvelle station-instrument, le distancemètre était immédiatement allumé, sans interruption jusqu'à la fin de la station. Une station complète avec 7 réflecteurs, selon le schéma de la figure 1, a duré ce jour-là entre 15 et 35 minutes.

4. Compensations bidimensionnelles

4.1 Compensation des mesures 1986

On a d'abord compensé séparément les mesures effectuées par la firme Kern en 1979 sur sa base d'étalonnage d'Aarau. On a obtenu une précision a posteriori de ces mesures d'étalonnage de ±(0,09 mm +0,11 ppm). Celles-ci ont ensuite été introduites dans la compensation simultanée du réseau et de la base d'étalonnage. Dans le réseau, on connaissait les mesures originales, ce qui a permis d'estimer la précision a priori de toutes les lignes à partir des répétitions.

4.2 Compensation des mesures 1991

On a d'abord compensé séparément les observations de la base d'étalonnage. On a ensuite introduit dans la compensation combinée du réseau et de la base toutes les mesures sur base avec ± (0,34 mm + 0,36 ppm). Dans le réseau également, on a estimé la précision de chaque ligne par des répétitions (mode DIST). Une régression linéaire en fonction de la longueur des distances a donné ± (0,82 mm +0,04 ppm) pour une distance observée une seule fois. Combinée avec une erreur de centrage estimée à ±0,2 mm, cette valeur a été introduite comme précision a priori des moyennes des distances pour l'ensemble du réseau.

Epoque de mesure	1986	1991
Instrument	2 x Kern ME 5000	2 x Wild DI 3000
Epoque des mesures	30 juin–3 juillet 1986	27 septembre 1991
Procédure s/figure 1	non	oui
Nombre d'observ. sur base	63	80
Nombre d'observ. dans le réseau	60	54
Nombre des par. d'échelle locaux	25	22
Nombre de coord. inconnues	21	18
Nombre de constantes d'addition	2	2
Nombre de degrés de liberté	75	92
Précision (a posteriori) des distances moyennées sur la base	±(0,09 mm+0,12 ppm)	±(0,34 mm+0,37 ppm)
Précision (a posteriori) des distances moyennées dans le réseau	±(0,20 mm+1,02 ppm)	±(0,85 mm+0,94 ppm)
Précision des paramètres estimés:		
– constante d'addition	±0,05–0,06 mm	±0,16 mm
– param. d'échelle locaux (sur la base)	±0,2–0,7 ppm	±0,5–1,1 ppm
– param. d'échelle locaux (ds le réseau)	±0,4–0,8 ppm	±0,5–0,7 ppm
– coordonnées (en moyenne, pour tous les points du réseau, après transf. dans réseau libre)	X: ±1,6 mm Y: ±1,6 mm	X: ±1,7 mm Y: ±1,6 mm
Précision des coordonnées (basée sur les résidus par rapport à la référence, en moyenne pour tous les points)	X: ±4,6 mm Y: ±2,6 mm	X: ±4,1 mm Y: ±2,5 mm
Précison des diff. de coordonnées 1986–1991 (basée sur les résidus, en moyenne pour tous les points)	DX: ±2,9 mm, DX: ±1,4 mm	

Tab. 1: Réseau-test de Turtmann. Résumé des résultats des compensations 2D avec la méthode des paramètres d'échelle locaux pour les époques 1986 (Mekometer ME 5000) et 1991 (Distomat 1991). La distance 7–8 n'existe que dans la compensation 1986. (X, Y: coordonnées civiles de la Projection suisse).

Le tableau 1 fournit un résumé des principaux résultats des compensations bidimensionnelles. Pour 1986, il faut rappeler que les distances dans le réseau n'ont pas pu être mesurées selon le schéma et avec la rapidité souhaitées. Grâce à des mesures plus rapides et un profil constant, la précision des distances sur base est sensiblement meilleure. La précision des coordonnées transformées dans un réseau libre atteint en moyenne ±1,6 mm. Pour disposer d'une information sur d'éventuelles erreurs systématiques sur les coordonnées, on a comparé celles issues du modèle des paramètres d'échelle locaux avec celles de la compensation terrestre de référence (voir chap. 3.1) de l'Office fédéral de topographie. Les écarts résiduels moyens (±2,6 mm en Y et ±4,6 mm en X) figurent dans le tableau 1 et montrent que la précision des points estimée à partir de la compensation est plutôt optimiste. La moins bonne correspondance en X (Nord-Sud) s'explique probablement par le fait que les distances les plus inclinées, qui sont les moins bien décrites par le modèle des paramètres d'échelle locaux, sont justement orientées Nord-Sud. D'éventuelles erreurs sur les altitudes ellipsoïdiques suivent un comportement identique.
Le tableau 1 fournit aussi les résultats correspondants de la compensation 1991. La précision de la base est meilleure, à cause des profils identiques. La précision des coordonnées transformées dans un réseau libre atteint en moyenne ±1,7 mm. Là encore, d'éventuelles fautes systématiques des coordonnées peuvent être mises en évidence par comparaison avec la compensation de référence de l'Office fédéral de la topographie (voir chap. 3.1).
Pour 1986, dans la figure 3, les grands vecteurs d'erreur des stations 6 et 8 sont orientés selon la ligne 6–8, mais avec le signe contraire. On voit le même phénomène sur la ligne 2–7. Ces deux lignes sont très inclinées, elles sont parallèles à la pente et très proches du sol. Lors de la

nouvelle détermination en 1991, on a pu établir que pour la visée 6–8, l'éloignement du sol n'atteignait que 0,8 mètre; quant aux visées 2–7 et 4–7, elles frôlent des collines à mi-chemin. Il est clair que les paramètres d'échelle locaux modélisent moins bien ces visées-là. Comme les visées traversant la vallée sont plus longues et plus nombreuses, elles jouent un plus grand rôle dans la détermination des paramètres d'échelle. L'existence de coordonnées quasi-vraies pour le réseau a permis d'étudier ces effets. Dans une compensation spéciale, on a gardé toutes les coordonnées comme fixes et introduit un paramètre d'échelle séparé pour chaque ligne du réseau. Par comparaison avec ceux issus des mêmes stations, les paramètres d'échelle pour les visées 2→7, 7→2, 6→8, 8→6 sont tous plus petits de 7 ppm. Il faut donc imaginer, pour ces visées proches du sol, des températures de 7 °C inférieures à celles valables en atmosphère ouverte, par exemple à cause de vents chauds soufflant dans la vallée.

Pour 1991, la figure 3 montre les vecteurs-résidus d'une transformation de Helmert; le tableau 1 indique les résidus moyens. Ces derniers sont un peu plus petits que ceux issus des données de 1986. Pour l'analyse des résidus des coordonnées 1991, on a supposé que les huit points du réseau n'avaient pas bougé entre 1986 et 1991.

Ce sont de nouveau les vecteurs-résidus des stations 2, 4 et 7, parallèles aux lignes 2–7–4, qui attirent l'attention. Sur la ligne 6–8, les résidus sont nettement plus petits qu'en 1986. Il ressort aussi de la figure 3 que les résidus des années 1986 et 1991 sont comparables. Une transformation des coordonnées de 1986 sur celles de 1991 livre en moyenne des résidus nettement plus petits, de ±1,4 mm en Y, et ±2,9 mm en X. Pour un réseau d'environ 5 km, cela correspond à 0,5 ppm. La méthode des paramètres d'échelle locaux convient donc particulièrement bien pour les mesures de déformation.

Comme en 1991 on avait tout de même saisi les données météorologiques, il était aussi possible de réduire normalement les distance et de les compenser sans paramètres d'échelle locaux. Les vecteurs-résidus par rapport aux coordonnées de référence (±3,2 mm en Y et ±5,5 mm en X) sont plus grands que par la méthode des paramètres locaux. Là encore, cette dernière méthode apparaît comme meilleure.

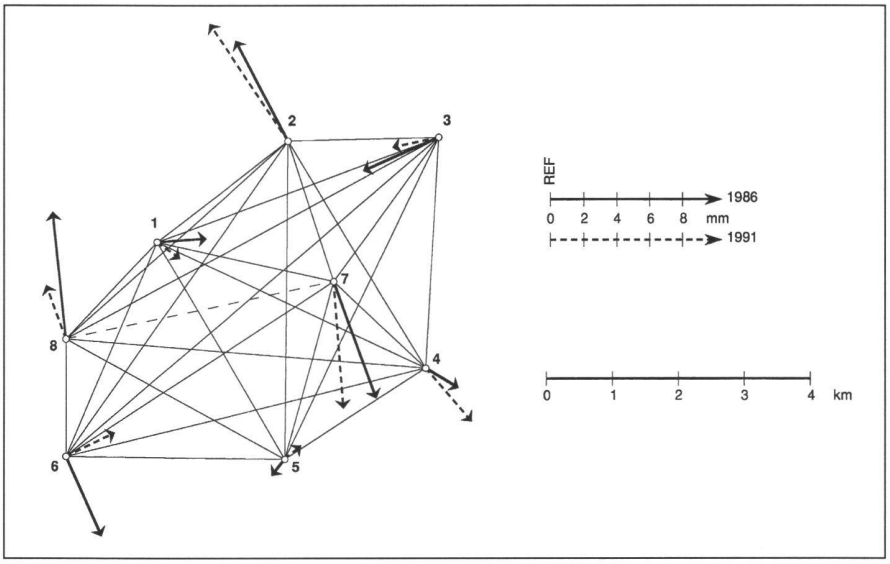

Fig. 3: Vecteurs-résidus des coordonnées des compensations des distances observées en 1986 et 1991 par la méthode des facteurs d'échelle locaux, par rapport aux coordonnées issues de la compensation de référence du réseau terrestre complet. Les coordonnées de référence marquent l'origine des vecteurs-résidus.

Epoque de mesure	1986	1991
Instrument	2 x Kern ME 5000	2 x Wild DI 3000
Epoque des mesures	30 juin–3 juillet 1986	27 septembre 1991
Procédure s/figure 1	non	oui
Nombre d'observ. sur base	63	80
Nombre d'observ. dans le réseau	60	54
Nombre des par. d'échelle locaux	24	22
Nombre de coord. inconnues	26	23
Nombre de constantes d'addition	2	2
Nombre de degrés de liberté	71	87
Précision (a posteriori) des distances moyennées sur la base	±(0,09 mm+0,12 ppm)	±(0,36 mm+0,39 ppm)
Précision (a posteriori) des distances moyennées dans le réseau	±(0,25 mm+0,55 ppm)	±(0,26 mm+0,18 ppm)
Précision des paramètres estimés:		
– constante d'addition	±0,05–0,06 mm	±0,16 mm
– param. d'échelle locaux (sur la base)	±0,2–0,7 ppm	±0,5–1,2 ppm
– param. d'échelle locaux (ds le réseau)	±0,4–0,5 ppm	±0,2 ppm
– coordonnées (en moyenne, pour tous les points du réseau, après transf. dans réseau libre)	X: ±6,4 mm Y: ±2,3 mm Z: ±7,6 mm	X: ±3,3 mm Y: ±1,1 mm Z: ±3,9 mm
Précision des coordonnées (basée sur les résidus par rapport à la référence, en moyenne pour tous les points)	X: ±3,0 mm Y: ±1,6 mm Z: ±3,9 mm	X: ±4,3 mm Y: ±2,5 mm Z: ±2,6 mm
Précison des diff. de coordonnées 1986–1991 (basée sur les résidus, en moyenne pour tous les points)	DX: ±2,9 mm DX: ±1,4 mm DX: ±2,8 mm	

Tab. 2: Réseau-test de Turtmann. Résumé des résultats des compensations 3D par la méthode des paramètres d'échelle locaux pour les mesures 1986 (Mekometer ME 5000) et pour les mesures 1991 (Distomat DI 3000). La distance 7–8 ne figure que dans les données 1986. (X, Y, Z: coordonnées cartésiennes géocentriques).

5. Compensations tridimensionnelles

La mesure électronique des distances se prête idéalement à la compensation tridimensionnelle dans un système cartésien de coordonnées, car les distances dans l'espace s'observent directement. Tous les problèmes liés aux systèmes de projection et aux systèmes d'altitudes, qui surgissent lors des habituelles réductions de distance dans le plan de projection en vue d'une compensation bidimensionnelle, disparaissent. Cela suppose naturellement que les trois coordonnées de chaque point soient bien déterminées par la

géométrie du réseau et par le plan d'observation. Le réseau-test de Turtmann a été conçu en conséquence, et autorise même, grâce à sa grande extension altimétrique, une détermination par des distances seules.

5.1 Compensation des mesures 1986

Pour la compensation tridimensionnelle, les précisions issues de la compensation bidimensionnelle ont été reprises comme valeurs a priori. Un nombre minimum de coordonnées a été bloqué pour la compensation libre. On a alors estimé les précisions a posteriori des groupes de distances sur base et dans le réseau. Pour le premier groupe, on a trouvé ± (0,09 mm +0,12 ppm); pour le deuxième, ± (0,25 mm +0,55 ppm). Par comparaison avec la compensation bidimensionnelle, le terme PPM des distances dans le réseau est de 50% plus petit et correspond mieux à des expériences antérieures. Il semble que les altitudes fixes de la compensation bidimensionnelle introduisent quelques tiraillements. Malgré le gain de précision des distances du réseau, il faut se souvenir qu'elles n'ont pas pu être observées selon le schéma ni selon la rapidité souhaités.

5.2 Compensation des mesures 1991

Les précisions a priori des distances ont été reprises de la compensation 2D. Puis on a estimé la précision a posteriori des groupes de distances sur base et dans le réseau par une compensation commune, où l'on a cette fois ajusté les termes «Millimètres» et «PPM». Pour le premier groupe, on a trouvé ± (0,36 mm +0,39 ppm); pour le second, ± (0,26 mm +0,18 ppm). On a bloqué le minimum de coordonnées dans la compensation libre et attribué un paramètre d'échelle local à chaque point du réseau.

Le tableau 2 résume les principaux résultats de la compensation. La précision des mesures sur base, comparée à la compensation 2D, est identique. Par contre, la précision des distances du réseau s'améliore d'un facteur 4 et atteint le même ordre de grandeur que celle de la compensation de référence (chap. 3.1). Le tableau 2 montre aussi la meilleure précision des paramètres d'échelle locaux.

6. Conclusions

La compensation 2D des mesures de 1986 et de 1991, avec la méthode des paramètres d'échelle locaux, fournit des précisions meilleurs que 1,0 ppm et cela sans prise en compte des données météorologiques relevées aux stations-réflecteurs. La précision des distances est encore nettement améliorée par une compensation 3D (±0,18 ppm pour les données 1991) et atteint le même ordre de grandeur que celles de la compensation de référence de toutes les observations terrestres et astronomiques. Cela atteste d'une part l'efficacité de la méthode des paramètres d'échelle locaux et confirme d'autre part le problème posé par des altitudes «fixes» lors de la compensation de visées très inclinées. Le modèle mathématique et stochastique de la compensation 2D pourrait, dans les réseaux comportant des visées inclinées, être amélioré par l'emploi d'une compensation 3D et l'introduction des altitudes sous forme de coordonnées «observées» assorties d'une matrice de covariance complète (méthode Bayes). Cette manière de faire permettrait, par surcroît, de compenser séparément les mesures sur base et de n'introduire ensuite que les paramètres d'étalonnage ainsi obtenus, avec leur matrice de covariance, dans la compensation du réseau. Pour les réseaux à grande extension altimétrique, il est aussi conseillé d'utiliser volontairement les mesures de distance pour la déterminaion altimétrique, et de procéder à une analyse tridimensionnelle. Cela devrait être possible dans beaucoup de réseaux de déformations (barrages), au moins pour le réseau aval.

Sur la base des recherches effectuées, on peut conseiller la méthode des paramètres d'échelle locaux (et renoncer à la première correction de vitesse) lorsque:

- l'échelle absolue peut être déduite du réseau (coordonnées données)
- le réseau doit être observé à plusieurs reprises
- le réseau peut être équipé de réflecteurs installés à demeure
- le réseau permet une bonne surdétermination grâce aux distances
- des stations-réflecteurs sans personnel sont souhaitables
- la grande précision interne du distancemètre électronique doit être exploitée à fond
- les profils topographiques de toutes les distances sont comparables
- les observations météorologiques aux stations-réflecteurs sont impossibles
- les distorsions du réseau par les effets de proximité du sol sur les données météorologiques (et par conséquent sur la première correction de vitesse) doivent être évitées
- on cherche une méthode efficace et exacte pour les mesures de précision.

Les auteurs tiennent à disposition de toute personne intéressée un texte beaucoup plus complet, disponible en français et en allemand.

Remerciements

Les mesures au Mekometer effectuées en 1986 ont été aimablement mises à disposition par l'Office fédéral de topographie, qui a aussi livré les résultats de sa compensation globale de toutes les mesures terrestres et astronomiques comme référence, et les données générales sur le Système de la Projecton suisse. La firme Kern & Co AG a mis à disposition les mesures correspondantes effectuées sur sa base d'étalonnage.

Les mesures de 1991 ont bénéficié de plusieurs appuis. Les auteurs remercient notamment pour leur collaboration R. Barahona, S. Coraducci, K. Dalle Fusine, M. Mielbradt, M. Stahl, étudiants; M. Borel, J.-R. Gros, P. Poirier, I. Sancho, assistants; M. F. Rüeger, P. D. Rüeger, auxiliaires, A. Miserez, professeur. L'Ecole d'Ingénieurs de l'Etat de Vaud (EINEV) à Yverdon a prêté un Distomat DI 3000. Plusieurs institutions ont prêté des réflecteurs ME5000 (IGP-Zurich, Office fédéral de topographie, succursale LEICA Heerbrugg de Unterentfelden, Institut für Geodäsie der Universität der Bundeswehr, München). L'Office fédéral de topographie a encore assuré le montage et le démontage des piliers d'observation et le prêt d'un abondant matériel.

Nos remerciements vont aussi à MM. B. Hirsch, K. Becek, R. B. Pascoe et K. D. Sippel pour l'implémentation des logiciels PC (compensations 2D) et à B. R. Harvey pour la mise à disposition de logiciels Macintosh en vue de la compensation tridimensionnelle. L'analyse tridimensionnelle de toutes les données australiennes et des données 1986 de Turtmann a été conduite par K. D. Sippel. Les données de 1991 ont été préparées par M. Borel et I. Sancho.

Bibliographie partielle:

[7] Brunner, F. K., Rüeger, J. M., 1992: Theory of the Local Scale Parameter Method for EDM.
A paraître dans Bulletin géodésique, août 1992.

[8] Chablais, H., Gubler, E., Schneider, D., Wiget, A., 1988: Die geodätische Landesvermessung in der Schweiz, heute und morgen. Vermessung-Photogrammetrie-Kulturtechnik (VPK), 86. Jg., Nr. 4, S. 154–163.

[9] Chaperon, F., 1988: Meteorologische Messungen. In: Fischer, W. (Ed.), 1988: GPS-Testnetz Turtmann: Messungen und Resultate. In: Protokoll der 138. und 139. Sitzung der Schweizerischen Geodätischen Kommission, Schweiz. Naturforschende Gesellschaft, Anhang 1, S. 39–42.

[16] Mitter, J., 1962: Über die Bestimmbarkeit der Ausbreitungsgeschwindigkeit der Trägerwellen bei der elektronischen Entfernungsmessung. Allgemeine Vermessungsnachrichten (AVN), 69. Jg., S. 139–157.

[18] Rüeger, J. M., 1990: Electronic Distance Measurement – An Introduction. 3. vollst. überarb. Aufl., Springer-Verlag, Berlin–Heidelberg–New York, 283 S.

[21] Rüeger, J. M., Brunner, F. K., Besek, K., 1989: EDM Monitoring Surveys using a Local Scale Parameter Model. In: Proc., Symposium on Surveillance and Monitoring Surveys (SAMS'89), 9–10 November 1989, Dept of Surveying and Landinformation, University of Melbourne, Parkville Vic 3052, Australia, S. 183–194.

[22] Schneider, D., 1987: 3D Test Net Turtmann. In: Swiss Geodetic Commission and Federal Office of Topography (Ed.). Report on the Geodetic Activities in the Years 1983 to 1987. Presented to the 19th General Assembly of the Int. Union of Geodesy and Geophysics, Vancouver, Canada, August 1987, pp. 7–8.

[23] Schneider, D., 1988: Terrestrische Messungen und Auswertungen. In: Fischer, W. (Ed.), 1988: GPS-Testnetz Turtmann: Messungen und Resultate. In: Protokoll der 138. und 139. Sitzung der Schweizerischen Geodätischen Kommission, Schweiz. Naturforschende Gesellschaft, Anhang 1, S. 35–39.

[24] Wirth, B., 1990. Höhensysteme, Schwerepotentiale und Niveauflächen: Systematische Untersuchungen zur zukünftigen terrestrischen und GPS-gestützten Höhenbestimmung in der Schweiz. Band 42, Geodätische-Geophysikalische Arbeiten in der Schweizerischen Geodätischen Kommission, 204 S.

Adresse des auteurs:

J.-M. Rüeger
School of Surveying
University of New South Wales
P.O. Box 1
Kensington, NSW 2033 (Australia)

H. Dupraz
Ecole Polytechnique Fédérale
de Lausanne
Géodésie et mensuration
GR-Ecublens
CH-1015 Lausanne

Drainage et zone tampon hydrologique

M. Soutter

Une description physico-mathématique des fluctuations du rabattement d'une nappe phréatique par un drain sous l'effet des précipitations a été utilisée pour déterminer des séries de valeurs discrètes de la distance d'influence critique du drain, correspondant à quatre stations pluviométriques et à divers seuils de tolérance de la végétation du milieu à protéger. Ces seuils de tolérance sont définis par le rabattement admissible et par la durée et la fréquence d'apparition de la situation critique.
Une méthode d'approximation polynomiale et d'interpolation développé sur micro-ordinateur (PC ou Macintosh) permet alors de déterminer aisément, sur la base de ces séries de valeurs discrètes, la valeur de la distance d'influence critique du drain correspondant aux paramètres physiques introduits par l'utilisateur.

Ein physikalisch-mathematisches Modell, das die Verschiebung des Nullabsenkungspunktes des Grundwasserspiegels bei der Entwässerung beschreibt, wurde benutzt, um Serien von diskreten Werten der kritischen Drainage-Einflussdistanz zu erstellen, entsprechend vier Regenstationen und verschiedener Toleranzschwellen der Vegetation der Schutzzone. Diese Toleranzschwellen sind definiert durch die tolerierbare Absenkung und durch die Dauer und Frequenz des Vorkommens des kritischen Standes.
Ein Micro-Computer (PC oder Macintosh) mit polynomialem Abschätzungs- und Interpolations-Programm erlaubt, aufgrund dieser Serien von diskreten Werten die entsprechende Drainage-Einflussdistanz für alle physikalischen Parameter, die durch den Benutzer angegeben werden, einfach zu berechnen.

Les impacts du drainage sur l'environnement se manifestent de manière directe au niveau du sol en tant qu'écosystème (problème de la fertilité notamment) et au niveau des eaux de surfaces et des eaux souterraines, tant sur le plan de la qualité (potabilité, eutrophisation) que de la quantité (régime hydrologique des récepteurs, assèchement de milieux humides). La protection des biotopes humides, souvent situés dans le voisinage de zone drainées, est favorisée par le création de zones de transition ou zones tampon, dont les fonctions relèvent simultanément du domaine biologique, du domaine trophique et du domaine hydrique.
Bien que le drainage ait également un effet sur le comportement des substances intervenant dans les processus trophiques (nitrates et phosphates principalement), que ce soit directement, par une réduction du ruissellement, ou indirectement, par l'évolution des pratiques agricoles qu'il permet, son effet le plus manifeste se situe sur le plan hydrique, par son influence sur le niveau phréatique des zones voisines. L'objectif de la démarche présentée dans cet article consistait ainsi à proposer une méthode aisément applicable de dimensionnement des zones de transition du point de vue hydraulique. Il s'agissait en d'autres termes de déterminer à quelle distance d'un drain, les effets sur le régime hydrique souterrain restent dans des limites tolérables (fig. 1).

Description physico-mathématique

Dans une conception idéalisée du fonctionnement du drainage (fig. 1), l'extension latérale du rabattement de la nappe souterraine, soit la distance L, augmente en période sèche et diminue lors de précipitations. Bien que cette vision idéalisée ne corresponde sans doute que peu au fonctionnement réel du système, elle en reproduit les principes généraux et présente l'avantage d'en permettre une description mathématique. Les hypothèses nécessaires à une telle description (loi de Darcy applicable, sol horizontal homogène isotrope et indéformable, horizon imperméable horizontal, écoulement essentiellement horizontal, horizon superficiel subdivisé en deux domaines de teneurs en eau spécifiques, la saturation naturelle Θ_{sn} et la capacité de rétention Θ_{max}, nappe de forme elliptique) sont usuelles en la matière. La distance L critique peut être recherchée selon deux voies très différentes, soit par la distance atteinte à la fin de la période sèche de durée extrême, elle-même déduite de l'analyse de données météorologiques (régime de tarissement), soit l'étude des fluctuations de cette distance lors des alternances précipitations – périodes sèches. Dans les deux cas une hypothèse supplémentaire