

Incertitude de la mesure de terrain en géomorphologie littorale. Approche statistique et quantification des marges d'erreur

Serge Suanez, Aurélie Dehouck*, Pierre Stephan**

Un des objectifs de la mesure en géomorphologie littorale est d'étudier de façon diachronique les changements morphosédimentaires d'un environnement côtier. La période d'observation et la fréquence des relevés dépendent du but recherché. On choisira une haute fréquence (relevé hebdomadaire) lorsque la problématique est d'analyser le rôle des épisodes à forte récurrence (tempêtes hivernales) dans la mobilité des formes littorales (Lee et Birkemeir, 1993). À l'inverse, une fréquence beaucoup plus faible sera adoptée (relevé annuel) lorsque l'objectif est de suivre l'évolution d'une côte sur du long terme à très long terme (Levoy, 1998).

Le problème qui se pose alors est de savoir si les modifications observées relèvent bien de l'action des agents de forçage météo-marins ou si elles ne sont pas le résultat d'erreurs inhérentes à la mesure. Cette étude se propose de quantifier à partir de traitements statistiques les incertitudes liées à la mesure de terrain effectuée au théodolite (figure 1a et 1b), et au DGPS (figure 1c et 1d). Les données utilisées proviennent de suivis réalisés sur plusieurs plages du Finistère et des Côtes d'Armor effectués dans le cadre de travaux de thèse et/ou de recherches contractuelles. Une partie de ces résultats, ceux qui concernent la mesure au théodolite, a déjà fait l'objet d'une présentation dans le cadre des séminaires de notre UMR LETG – 6554 CNRS (Suanez *et al.*, 2005). Pour cette étude, ces données ont été réactualisées en intégrant notamment le travail sur la mesure DGPS.

Qu'est-ce qu'un levé topo-morphologique ?

Trois types de levés topo-morphologiques sont généralement réalisés pour le suivi des environnements côtiers. Dans les trois cas, les informations obtenues correspondent à des coordonnées X,Y et Z projetées dans un référentiel connu.

* GEOMER, LETG UMR 6554 CNRS, Institut Universitaire Européen de la Mer, Place Nicolas Copernic, Technopôle Brest Iroise, 29280 Plouzané, France

Figure 1 : Appareils de mesure les plus utilisés en topo-morphologie. 1a : théodolite (modèle Leica TCR303); 1b : réflecteur monté sur sa canne; 1c : base DGPS (modèle Trimble 5700); 1d : mobile DGPS (modèle Trimble 5800).

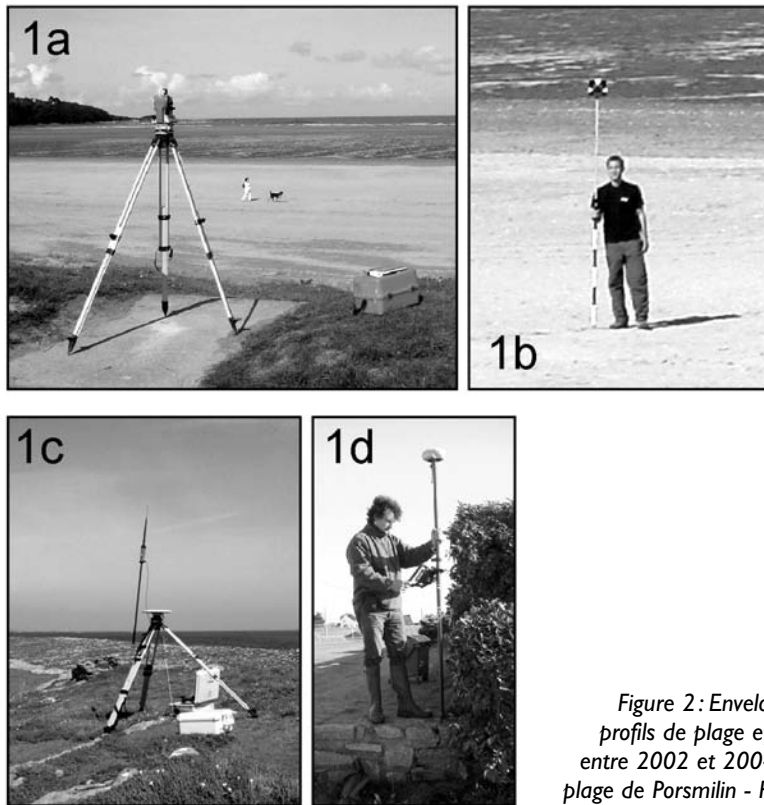
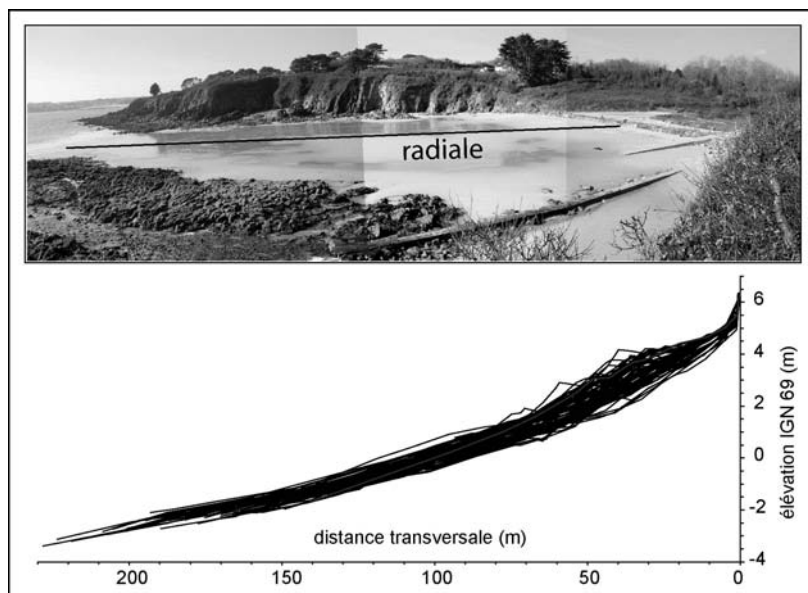


Figure 2 : Enveloppe de profils de plage effectués entre 2002 et 2004 sur la plage de Porsmilin - Finistère (Dehouck et al., 2005)



Le premier concerne les *enveloppes de profils de plage*, il offre une vision en deux dimensions des changements altitudinaux d'une plage (figure 2). Dans ce cas, la mesure s'effectue le long de radiale(s) perpendiculaire(s) au trait de côte. Il est alors important de connaître la marge d'erreur altitudinale (Z) induite par la mesure.

Le deuxième type correspond à du *linéaire côtier*, il offre également une vision en deux dimensions des changements en plan du trait de côte et/ou du front de dune (figure 3). La mesure s'effectue alors en suivant une ligne de référence telle que la limite végétale d'un cordon dunaire ou le contact terre / mer pour les côtes microtidales. Il est alors important de connaître la marge d'erreur en X et Y.

Enfin, le dernier type de levé concerne la réalisation de Modèle(s) Numérique(s) de Terrain (MNT) à partir desquels il est possible de construire des cartes en isolignes (figure 4). Dans ce cas, la mesure consiste à lever la morphologie de la plage dans les trois dimensions X, Y et Z permettant ainsi de quantifier les volumes de sédiments perdus ou gagnés par cette dernière. Il est donc important de connaître les marges d'erreur dans les trois dimensions X, Y et Z.

D'un protocole rigoureux dépend la qualité de la mesure

Effectuer un levé topo morphologique suppose au préalable tout un protocole rigoureux d'équipement du site permettant d'assurer une bonne qualité de la mesure. C'est à partir de cette démarche méthodologique qu'il est possible d'estimer les marges d'erreurs inhérentes à la mesure.

La première opération revient à installer un *point de mise en station* sur lequel la base fixe du théodolite et/ou du DGPS est positionnée. Ce point est matérialisé par un clou topographique scellé dans une surface « normalement » horizontale et stable (figure 5).

Dans un deuxième temps, il est important de mettre en place des *points de calage*. Ces derniers correspondent à des « invariables » et servent à contrôler la pertinence de la mesure d'un levé (à un temps T) sur l'autre (à un temps T+1). Ils sont également matérialisés par des clous topographiques scellés dans des éléments fixes du paysage, tels que des murets, des affleurements rocheux, etc. (figure 6).

Ainsi, à chaque levé la base fixe du théodolite et/ou du DGPS est positionnée sur son *point de mise en station* et les *points de calage* sont mesurés. Dès lors, si l'on considère que ces derniers sont invariables, les coordonnées en X, Y et Z obtenues sur ces points devraient être identiques d'un levé sur l'autre. Or, l'expérience nous montre que des décalages sont observés en matière de positionnement (tableau 1).

Figure 3 – Cinématique du front de dune entre les mois d’octobre 2002 et de septembre 2003 obtenue à partir de mesures de front de dune en baie de Saint-Michel-en-Grève – Côtes d’Armor (Suanez et Stéphan, 2006)

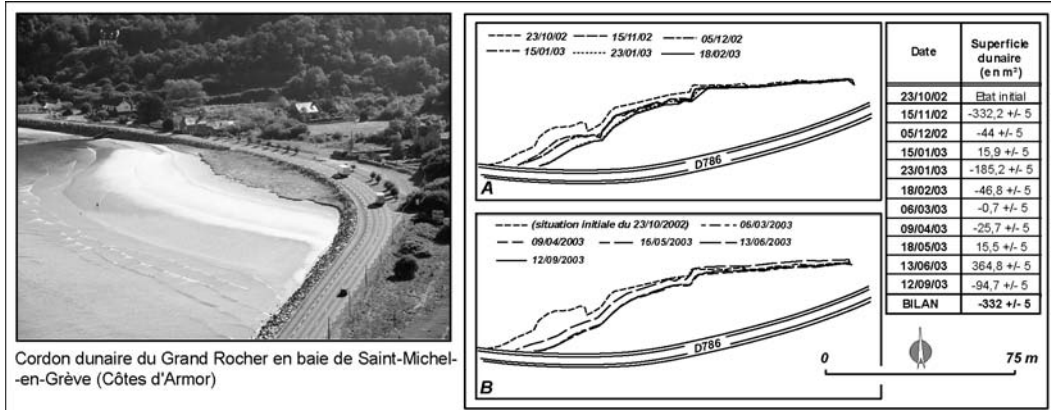


Figure 4 – Carte en isolignes du cordon littoral de Mengleuz (Commune de Logonna-Daoulas – Finistère) réalisée à partir d’un MNT (Stéphan et al., 2005).

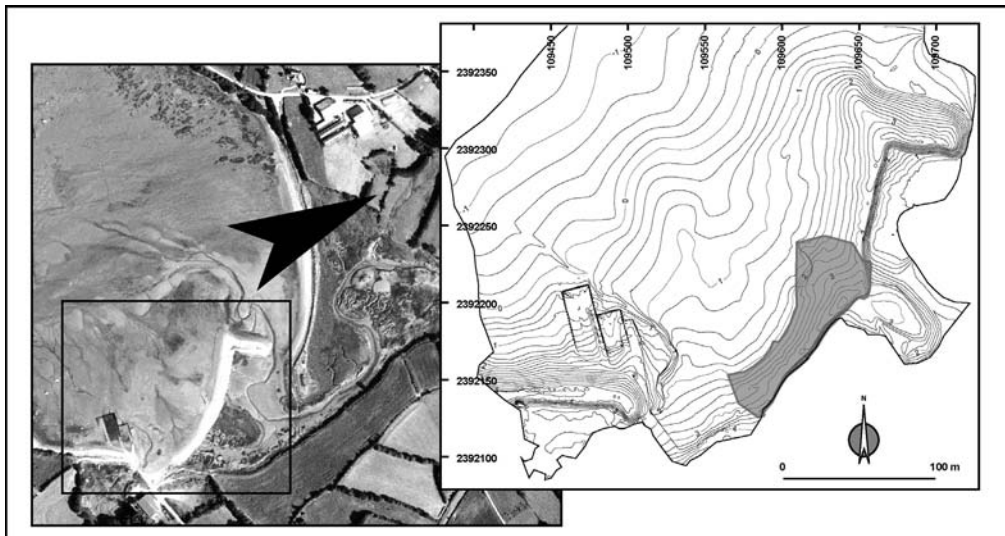


Figure 5: Exemples de mise en station d'un théodolite et d'un DGPS. A - en situation optimale sur une surface plane. B - en situation « difficile » sur un affleurement rocheux.

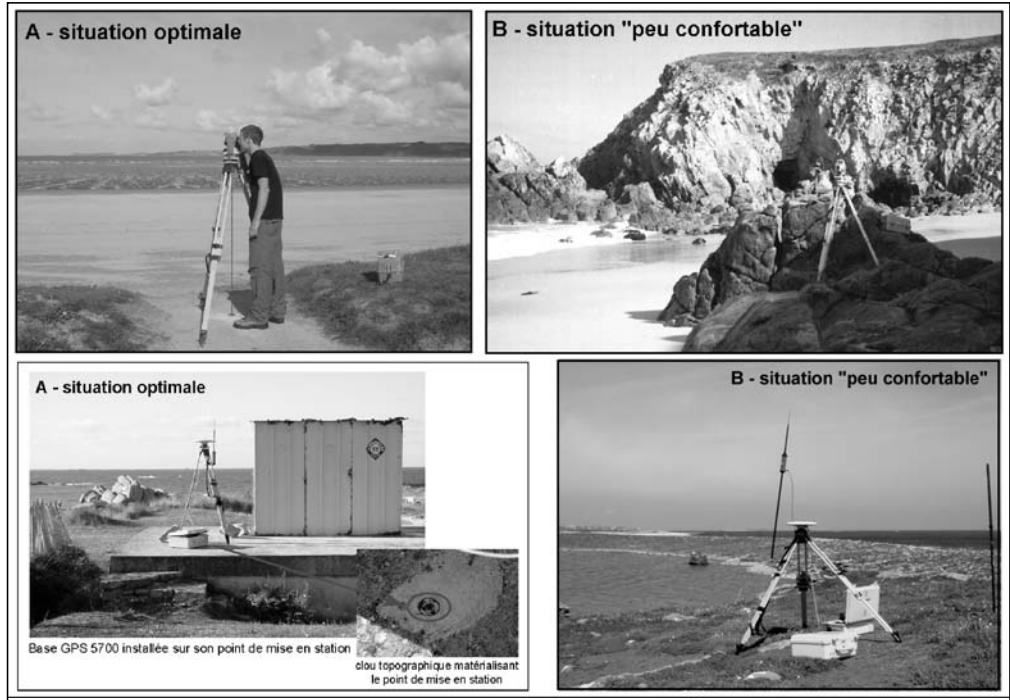


Figure 6: Clous topographiques matérialisant des points de calage installés sur différents types de supports stables

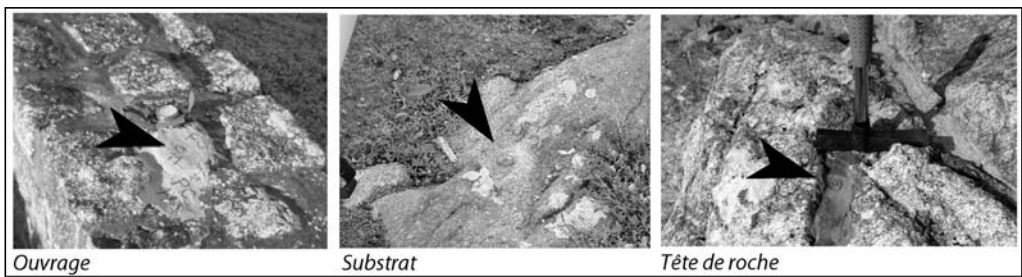


Tableau 1 : Exemple de décalages obtenus en écart type (valeurs métriques) sur deux points de calage (Haut de Cale; Bas de Cale) en baie de Saint-Michel-en-Grève (Côtes d'Armor) à partir de mesures effectuées sur la période 2000-2003.

YAR	BAS DE CALE			HAUT DE CALE	
	X	Y	Z (NGF)	X	Y
11/02/2000	-109,248	-148,422	5,83	-110,359	-163,923
29/06/2000	-109,241	-148,442	5,83	-110,396	-164,029
07/08/2000	-109,173	-148,365	5,82	-110,357	-163,92
15/09/2000	-109,177	-148,46	5,83	-110,32	-163,984
16/11/2000	-109,288	-148,279	5,83	-110,4	-163,863
15/02/2001	-109,141	-148,456	5,82	-110,224	-163,927
24/05/2001					
18/01/2002	-109,123	-148,373	5,82	-110,365	-164
13/06/2002	-109,179	-148,448	5,83	-110,316	-163,995
12/09/2002					
10/10/2002	-109,218	-148,426	5,883	-110,341	-163,965
23/10/2002	-109,245	-148,403	5,827	-110,346	-163,988
15/11/2002	-109,245	-148,432	5,837	-110,342	-163,983
05/12/2002	-109,197	-148,367	5,841	-110,342	-163,983
15/01/2003	-109,197	-148,367	5,841	-110,342	-163,983
23/01/2003	-109,199	-148,46	5,798	-110,363	-163,98
18/02/2003	-109,21	-148,45	5,833	-110,37	-163,97
06/03/2003	-109,2	-148,446	5,825	-110,35	-163,995
09/04/2003	-109,163	-148,442	5,831	-110,357	-163,971
16/05/2003	-109,143	-148,414	5,843	-110,36	-163,992
13/06/2003					
12/09/2003				-110,36	-163,975
<i>moyenne</i>	-109,20	-148,41	5,83	-110,35	-163,97
<i>écart type</i>	0,041	0,046	0,016	0,035	0,037

Origine des sources d'erreur

L'origine de ces erreurs tient à trois raisons (Brabant, 2003). La première est liée à une mauvaise mise en station de la base fixe (théodolite et DGPS) d'un levé sur l'autre. Cela induit un décalage angulaire de l'azimut qui se répercute sur le positionnement en X et Y des points (figure 7). L'azimut correspond à l'angle horizontal qui oriente le plan cartésien dans lequel sont exprimées les coordonnées X et Y des points que l'on mesure (Brabant, 2003). L'axe de visée de l'azimut fixe l'axe des ordonnées. Pour la mesure au théodolite l'azimut est défini par l'opérateur comme c'est expliqué ci-dessous ; pour la mesure DGPS, c'est le nord géographique qui est directement pris en compte par la base fixe.

La deuxième provient d'une mauvaise planimétrie de la base fixe du théodolite ou du DGPS (figure 8). Cette dernière est calée, par la lecture

d'une bulle, sur un plan « virtuel » horizontal. Ce nivellement permet de fixer une surface plane de référence à partir de laquelle la hauteur des points se réfère. Cette erreur joue en grande partie sur les décalages altitudinaux enregistrés (coordonnée Z).

Figure 7: Illustration des décalages angulaires obtenus à partir d'une mauvaise installation de la base fixe sur le point de mise en station d'un levé à un autre.

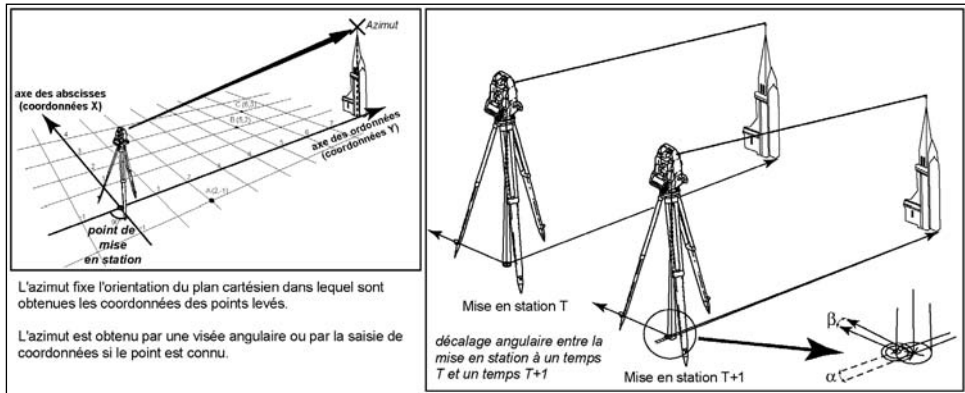
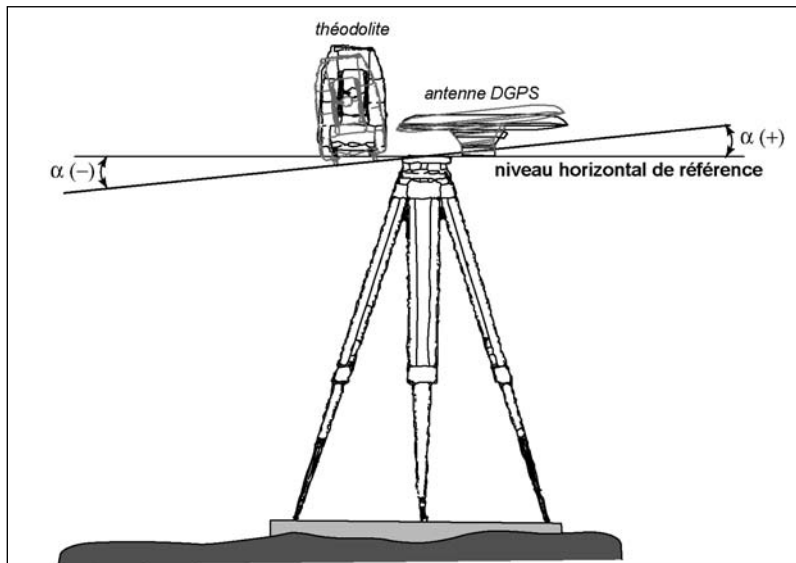


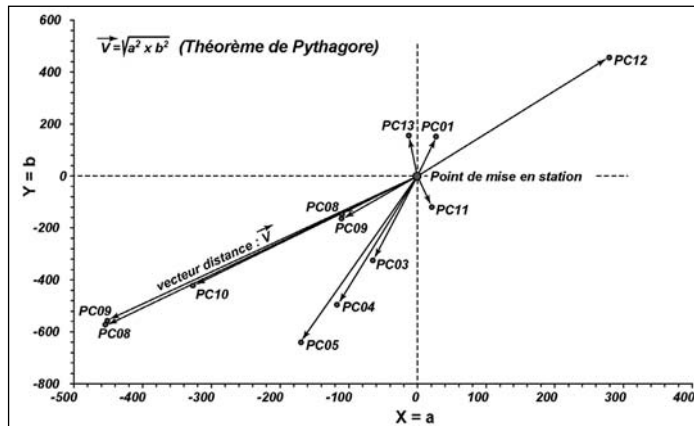
Figure 8: Mauvaise planimétrie ou mauvais nivellement de la base fixe et ses conséquences sur la mesure altitudinale (coordonnées Z)



Ces calculs ont été réalisés par ajustement linéaire (régression simple) permettant de répondre à l'hypothèse de départ qui est que *plus la distance du point mesuré est importante par rapport au pont de mise en station, plus la marge d'erreur augmente*. Cela s'explique comme on l'a vu par le fait que ces appareils mesurent des valeurs angulaires largement dépendantes du positionnement et du calage planimétrique de la base fixe et/ou du mobile. Le traitement statistique se décompose en trois phases.

Dans un premier temps, nous avons calculé les vecteurs « distance » de chaque point de calage : *distance par rapport au point de mise en station qui correspond à l'hypoténuse du triangle rectangle*. Cette opération est effectuée en utilisant le théorème de Pythagore (figure 11).

Figure 11 : Illustration et calcul des vecteurs « distance » pour des points de calage (appelés PC.). La position de chacun d'entre eux dans le plan cartésien se réfère au point de mise en station (coordonnées X=0 et Y=0), à partir duquel ils ont été mesurés.



Dans un second temps, nous avons construit une matrice de données comportant plusieurs informations (tableau 2) : (i) le nombre d'individus en tant que point de calage et son référencement ; (ii) la répétitivité de la mesure pour chaque individu ; (iii) les coordonnées X et Y de chaque individu (valeur moyenne calculée sur la répétitivité) ; (iv) les vecteurs « distance » calculés à partir des coordonnées précédentes ; (v) les écarts-types en X, Y et Z calculés sur la répétitivité pour chaque individu.

Enfin, nous avons calculé les marges d'erreur en X, Y et Z à partir d'une régression linéaire sur les trois couples de variables : V distance – écart type X ; V distance – écart type Y ; V distance – écart type Z. Ces ajustements linéaires permettent d'obtenir l'équation $Y = ax + b$ pour chaque modèle mathématique, et de calculer une marge d'erreur pour une distance associée. Nous séparons les résultats obtenus pour la mesure au théodolite (figure 12) de ceux obtenus pour la mesure au DGPS (figure 13)

Tableau 2: Exemple de matrice de résultats calculée pour l'ensemble de la population traitée.

nb individus	référencement	répétitivité	X	Y	V distance	écartype X	écartype Y	écartype Z
1	St Michel PC1	15	27,042	150,994	153,40	0,048	0,028	
2	St Michel PC3	14	-64,650	-326,235	332,58	0,089	0,023	0,073
3	St Michel PC4	8	-116,878	-496,861	510,42	0,242	0,053	0,089
4	St Michel PC5	7	-169,336	-641,595	663,56	0,278	0,052	0,129
5	St Michel profil 7	8	-89,688	-395,638	405,68	0,051	0,030	0,045
6	St Michel profil 8	10	-41,693	-236,431	240,08	0,058	0,024	0,023
7	St Michel profil 9	10	-19,314	-113,558	115,19	0,024	0,013	0,009
8	St Michel profil 10	10	9,776	48,856	49,82	0,013	0,014	0,029
9	St Efflam PC11	12	20,853	-120,526	122,32	0,016	0,016	
10	St Efflam PC13	11	-12,437	155,584	156,08	0,091	0,019	0,042
11	St Efflam P1	12	-49,321	-236,777	241,86	0,030	0,026	0,016
12	St Efflam P2	12	-2,928	13,111	13,43	0,019	0,029	0,026
13	St Efflam P3	12	3,200	-35,948	36,09	0,029	0,024	0,020
14	St Efflam P4	12	8,927	-81,138	81,63	0,051	0,014	0,024
15	Roscoat (haut de cale)	9	-454,110	-573,370	731,416	0,154	0,146	
16	Roscoat (bas de cale)	10	-451,300	-558,051	717,699	0,169	0,123	0,112
17	Roscoat (station Yar)	8	-326,907	-422,084	533,875	0,107	0,045	0,058
18	Yar (bas de cale)	21	-109,198	-148,413	184,26	0,041	0,046	0,016
19	Yar (haut de cale)	21	-110,346	-163,968	197,64	0,035	0,037	
20	Yar (station Roscoat)	11	280,499	454,247	533,87	0,229	0,175	0,108
21	Yar profil 5	12	-175,008	-210,791	273,97	0,052	0,045	0,045
22	Yar profil 6	11	-129,581	-180,427	222,14	0,116	0,087	0,086
23	Porsmilin buse	42	58,452	14,020	60,11	0,035	0,041	0,025
24	Posmilin cale	43	-4,634	-13,106	13,90	0,030	0,043	
25	Porsmilin platier	44	39,270	-144,000	149,26	0,035	0,032	0,033
26	Prosmilin profil	44	-9,539	-48,048	48,99	0,047	0,041	0,010
27	Corsen Nord	12	68,639	-7,482	69,05	0,032	0,017	
28	Corsen Milieu	33	-63,224	83,222	104,51	0,046	0,055	0,028
29	Corsen Sud	34	-66,657	129,580	145,72	0,059	0,050	0,032
30	Corsen Profil 1	33	-33,357	43,431	54,76	0,037	0,036	0,021
31	Corsen Profil 2	32	-74,916	138,693	157,63	0,055	0,049	0,040

Figure 12: Ajustements linéaires et équations de régression permettant de calculer les marges d'erreur en X, Y et Z pour la mesure au théodolite.

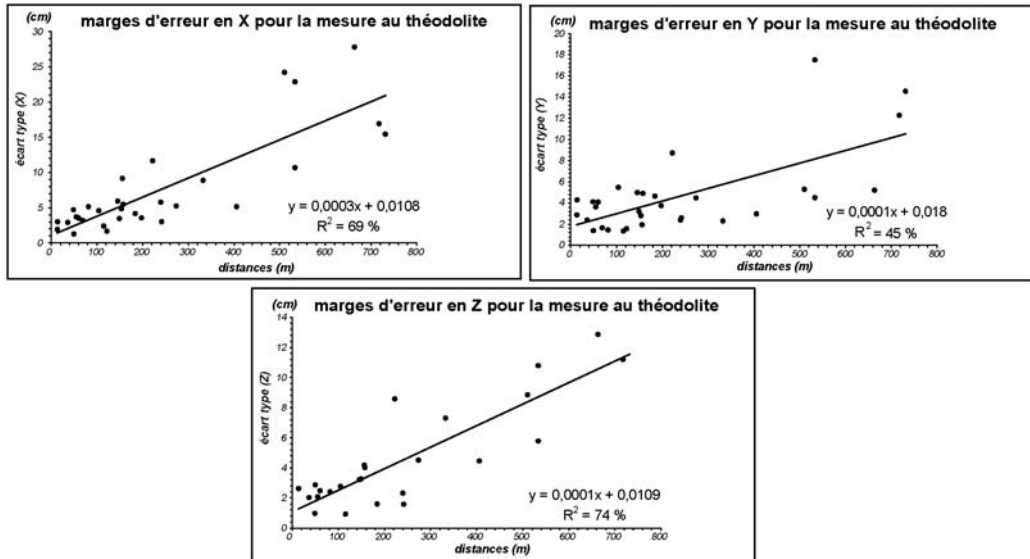
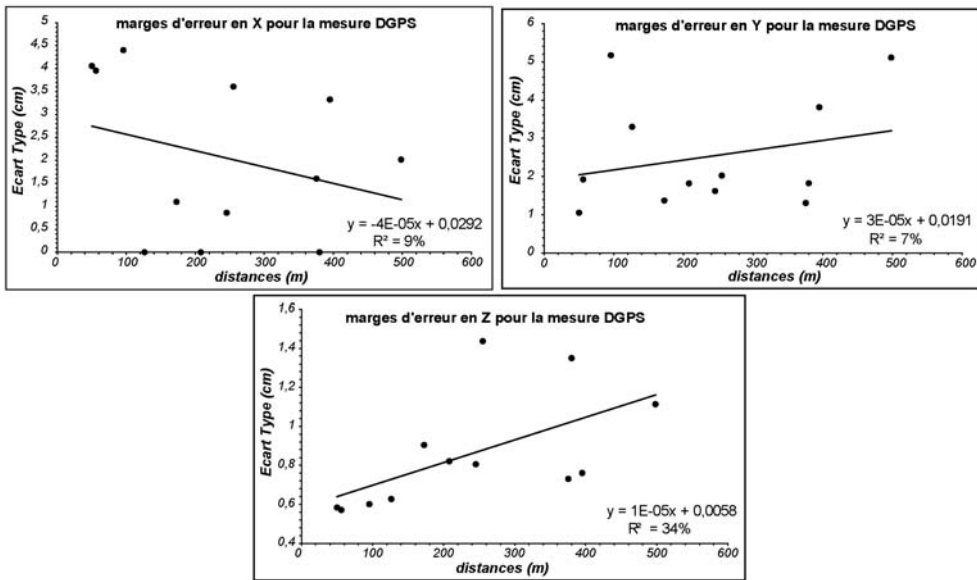


Figure 13 : Ajustements linéaires et équations de régression permettant de calculer les marges d'erreur en X, Y et Z pour la mesure DGPS.



Résultats

Les résultats montrent que pour la mesure au théodolite, les marges d'erreur en X, Y et Z, augmentent bien avec la distance (figure 12). Les ajustements linéaires suffisamment significatifs (45 à 74 % de variance) permettent de modéliser cette relation à partir des équations de régression. Ainsi, les erreurs peuvent atteindre +/- 22 à +/- 9 cm en positionnement planaire (X, Y) pour une distance de 700 m (distance limite d'utilisation de ces appareils). À la même distance, elles sont de +/- 8 cm pour les altitudes (tableau 3).

Pour la mesure DGPS, l'incertitude apparaît moins importante. On note une absence de relation pour le positionnement en X et Y, et quelle que soit la distance, les marges d'erreur sont inférieures à +/- 5 cm. Concernant les altitudes, une relation peu significative (34 % de part de variance) s'exprime montrant qu'à une distance de 700 m, l'erreur en Z varie entre +/- 1,28 cm (tableau 3).

Conclusion

D'un point de vue méthodologique, les résultats obtenus par le traitement statistique (régression linéaire) sur les levés effectués au théodolite, montrent une bonne relation entre la distance du point mesuré (par rapport à la base) et la qualité mesure en elle-même : plus la distance

Tableau 3: Marges d'erreur obtenues en fonction de la distance pour la mesure au théodolite et au DGPS

Distances	Résultats obtenus par la mesure au théodolite			Résultats obtenus par la mesure DGPS		
	X (cm)	Y (cm)	Z (cm)	X (cm) (< 5 cm)	Y (cm) (< 5 cm)	Z (cm) (tend. faible)
50 m	+/- 3	+/- 2	+/- 2	Abs. Tend	Abs. Tend	+/- 0,63
100 m	+/- 4	+/- 3	+/- 2	Abs. Tend	Abs. Tend	+/- 0,68
200 m	+/- 7	+/- 4	+/- 3	Abs. Tend	Abs. Tend	+/- 0,78
400 m	+/- 13	+/- 6	+/- 5	Abs. Tend	Abs. Tend	+/- 0,98
700 m	+/- 22	+/- 9	+/- 8	Abs. Tend	Abs. Tend	+/- 1,28

augmente, plus les marges d'erreur en X,Y et Z sont importantes, et inversement. Ce type de levé, reposant sur le principe de la mesure angulaire, peut donc produire de l'information comportant une part d'incertitude non négligeable suivant les cas. Pour la mesure au DGPS, l'absence de relation montre que la distance du point mesuré par rapport à la base n'intervient pas dans la qualité des données obtenues. L'incertitude, dans ce cas, s'explique par bien d'autres paramètres qui ne sont pas pris en compte dans l'analyse statistique, tels que le nombre et le positionnement des satellites au moment du levé, les interférences atmosphériques jouant la qualité de la transmission du signal, etc.

D'un point de vue pratique, si l'on désire minimiser les marges d'erreur de la mesure au théodolite, en égalant par exemple celles de la mesure DGPS, il est recommandé de travailler dans un rayon de 100 à 200 m. Au-delà de cette distance, l'incertitude du levé topo-morphologique peut devenir important. Dans ce cas, il faut alors multiplier les mises en station dès lors que la distance (ou la surface) à lever devient supérieure à ce seuil. Cela suppose ensuite de recourir à des calculs géométriques (rotation / translation) afin de ramener toutes les mesures dans un même référentiel cartésien. Toutefois, l'expérience montre que ces « manipulations » génèrent aussi leur part d'incertitude.

Bibliographie

- BRABANT M., 2003. *Maîtriser la topographie. Des observations au plan*. Eyrolles, Paris, (2^e édit.), 542 p.
- DEHOUCQ A., CUQ V., FICHAUT B., SUANEZ S., 2005. Premiers éléments de caractérisation morphodynamique de deux plages de la mer d'Iroise, *Actes du colloque des VIII^e Journées Nationales Génie Côtier-Génie Civil*, Compiègne 7-9 septembre 2004, édité par D. Levacher, P. Sergent, A. Ouahsine et le Centre français du littoral (éd.), Tome I, pp 357-364.

- LEE G.-H., BIRKEMEIR W.A., 1993. Beach and nearshore survey data: 1985-1991, *CERC Field Research Facility: Technical Report CERC-93-3*, U.S. Army Waterways Experiment Station, Vicksburg, Mississippi, 26 p. plus appendices.
- LEVOY F., 1998. *Suivi de l'évolution des côtes du département de la Manche de 1991 à 1998*. Conseil Général de la Manche, Caen, 257 p.
- STEPHAN P., SUANEZ S., FICHAUT B., 2005. Impacts de l'anthropisation sur l'évolution morphosédimentaire d'un système littoral de flèches en chicane: le sillon de Mengleuz à Logonna-Daoulas en rade de Brest (Finistère), In *Milieux littoraux. Nouvelles perspectives d'étude*, P. Durand, L. Goeldner-Gianella, (dir.), L'Harmattan, pp 95-114.
- SUANEZ S., DEHOUCQ A., STEPHAN P., FICHAUT B., CUQ V., 2005. Estimation par traitement statistique des marges d'erreur inhérentes à la mesure tachéométrique en géomorphologie. In *Instrumentation et mesures de terrain*, N. Dupont, L. Lespez (dir.), Séminaire de l'UMR LETG 6554 CNRS, 30 janvier 2004 à Rennes 2, (<http://letg.univ-nantes.fr/SeminaireUMR30012004MP.pdf>), pp 1-10.
- SUANEZ S., STEPHAN P., 2006. Forçages météo-marins et dynamique morphosédimentaire saisonnière des cordons dunaires. Exemple de la baie de Saint-Michel-en-Grève (Côtes d'Armor, Bretagne), *Géomorphologie: relief, processus, environnement*, n° 2, pp 91-110.