

**Calcul de la coordonnée Z dans les étendues d'eau
(Relation entre l'altitude du bord et la profondeur)
- CAS DU LAC DE TAANAYEL -**

Dr. Naji Joseph Kehdy

Résumé. La capacité maximale d'un bassin d'eau pourrait être estimée en réalisant la carte 3D représentant ce dernier. Cela nécessite la présence des coordonnées X, Y et Z (latitude, longitude et altitude) de l'étendue d'eau. L'extraction de ces coordonnées en utilisant les méthodes connues présente plusieurs contraintes concernant le calcul de la coordonnée Z.

Vue ce contexte, nous avons proposé une méthode mathématique simple pour calculer la coordonnée Z du fond d'un bassin lacustre en vainquant les contraintes mentionnées. Cette méthode se base sur la relation entre l'altitude des bords du bassin et sa profondeur. Pour atteindre notre but, nous avons choisi une étendue d'eau à utilisation agricole, dans laquelle, cette méthode de mesure a été expérimentée et vérifiée. Cette étendue d'eau était à Taanayel, un village Libanais situé dans la plaine de la Béqaa.

Mots clés. Bassin, étendue d'eau, altitude, profondeur, étang, Taanayel.

1- Introduction

L'estimation de la capacité maximale d'une étendue d'eau pourrait être effectuée en calculant le volume de cette étendue, à travers une carte 3D. Ainsi, la quantité d'eau servant les divers besoins agricoles (irrigation), domestiques (utilisation par les habitants) et industriels (les produits alimentaires) sera quantifiée et une bonne gestion de l'eau pourrait être assurée. La réalisation de ce type de cartes nécessite l'existence des coordonnées X, Y et Z (latitude, longitude et altitude) de l'étendue d'eau. Néanmoins, plusieurs contraintes rendent difficile l'extraction de ces coordonnées et précisément la coordonnée Z (l'altitude du fond).

Une contrainte importante réside dans les appareils utilisés qui scannent le fond à travers des ondes sonores afin d'apporter ses altitudes. Or, cela présente deux inconvénients : le premier c'est que ce type d'appareil n'est pas économique, ainsi, ceux qui n'ont pas les moyens financiers suffisants ne peuvent pas l'acheter. Le deuxième, c'est que son utilisation est efficace pour les grandes étendues d'eau (océans, mers, grands lacs) dans lesquelles son déplacement est plus affranchi. Par contre, les petites étendues (notre cas d'étude) entravent ce déplacement par leur petite surface. Une autre contrainte concerne la carte topographique utilisée; La carte qui montre clairement les détails topographiques de la région (les latitudes, les longitudes et les altitudes des points de mesures) est celle à grande échelle (1/5000^e). Mais, ces cartes ne sont pas disponibles en permanence dans notre région. L'incertitude du GPS

dans certaines régions du monde (Liban à titre d'exemple) présente une contrainte additionnelle ; Il indique les mêmes coordonnées, même en se déplaçant des dizaines de mètres. Cela empêche la détermination des points proches les uns des autres sur les étendues d'eau. Cette contrainte est bien discernée en utilisant le système de coordonnées « Degré, minute, seconde ». Une autre contrainte fondamentale réside dans la méthode traditionnelle de levé topographique ; Un levé topographique est l'ensemble des opérations ayant pour objectif de recueillir sur le terrain les données nécessaires à l'établissement d'un plan ou d'une carte. Le levé est réalisé à partir d'observation sur le terrain au moyen d'instrument permettant de mesurer la latitude, la longitude et l'altitude des points d'échantillons (Milles et Al., 1999). Cette méthode inappliquée que sur les terrains secs, sera impossible dans le cas des étendues d'eau permanents. En particulier que le vidage de l'étendue d'eau sera une sorte de gaspillage des ressources en eau, dans une région à climat semi-continentale dont la quantité de précipitation ne dépasse pas le seuil de 600 mm par an. Par ailleurs, les sites internet qui génèrent les coordonnées X, Y et Z, avec la coopération de certains logiciels (Google Earth par exemple) donnent des résultats inexacts, en cas d'utilisation sur les étendues d'eau.

Vue ce contexte, existe-t-il une méthode efficace pour calculer ces coordonnées en vainquant les contraintes mentionnées ci-dessus ? Est-il possible de réaliser une carte 3D représentant l'étendue d'eau en établissant une formule mathématique simple basée sur la relation entre l'altitude des bords de l'étendue d'eau et sa profondeur?

Le but de notre travail est de proposer une méthode efficace qui pourrait aider les chercheurs à réaliser la carte 3D des étendues d'eau dans les régions où existaient les contraintes mentionnées ci-dessus. Et cela, dans le but d'aider les utilisateurs à estimer la capacité de leurs réservoirs d'eau.

2- Présentation de la zone d'étude

Pour expérimenter la nouvelle méthodologie, nous avons choisi une étendue d'eau qui constitue une partie d'un géofaciès situant dans le village de Taanayel au bord de la limite SSO du Caza de Zahlé dans la plaine de la Béqaa Centrale (Figure 1).

L'étendue d'eau choisie est un lac artificiel. Un lac est une grande étendue d'eau située dans un continent pour laquelle la profondeur, la superficie, ou le volume est suffisant pour provoquer une stratification de température (Touchart, 2000). C'est une pièce d'eau stagnante, dont la profondeur est suffisamment élevée (Supérieur à 5 m) pour empêcher la colonisation de tout le plan d'eau par des végétaux aquatiques enracinés sur le fond, ils se cantonnent à la périphérie, formant ce qu'on appelle une ceinture de végétation. Le caractère abrupt des pentes constitue un autre élément structurel de la plupart des grands lacs .

Ce facteur topographique limite l'extension de la végétation aquatique à une ceinture assez étroite autour du plan d'eau (Righetti, 2006). En outre, il ne s'agit ni d'un étang ni d'un marais ni d'un marécage ni d'une tourbière. Un étang est une étendue d'eau fermée colonisée sur toute son étendue par la flore littorale et ayant une profondeur moyenne inférieure à 5 mètres, (Arrignon, 1998).

Par ailleurs, le marais est un milieu humide inondé dont le substrat est saturé et recouvert d'eau durant la plus grande partie de la saison de croissance (Buteau et al. 1994). Le marais, sans arbres et mal drainé, comprend des végétations aquatiques ou herbacées qui ne dépassent pas 2 m de hauteur (CIT, 2004). Cette étendue, permanente

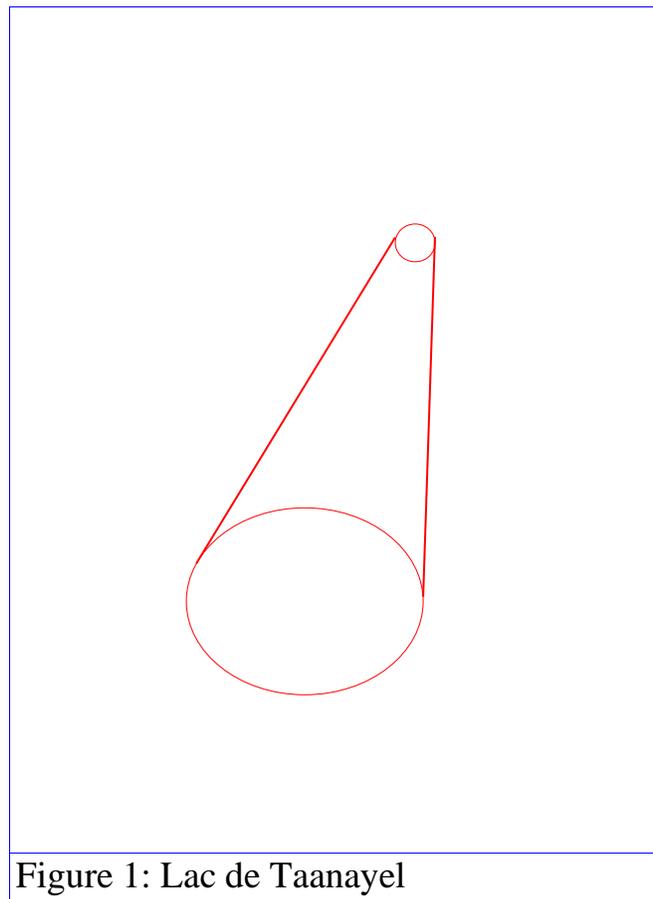


Figure 1: Lac de Taanayel

ou saisonnière, peut être côtier, continental ou résultant des estuaires (Georges, 2002). En outre, le marécage est un secteur recouvert d'eau de façon temporaire ou permanente et parsemée d'arbres et d'arbustes, dépassant 2 m de hauteur et couvrant plus de 35 % de la surface (CIT, 2004). Une tourbière est un ancien lac comblé en tout ou en partie par de la tourbe. Le couvert végétal est constitué de sphaignes, de lichens et d'éricacées (Provencher L. et Al, 2005).

Le lac étudié, foré durant les années 70 sous la direction des Pères Jésuites, est couvert sur ses bords d'une couverture végétale incomplète. Il est dépourvu de tout genre de végétations aquatiques enracinées sur son fond ou flottantes à sa surface. Ce lac, dénué de tourbe, a une profondeur maximale de 6.70 m, supérieure à celle d'un étang.

Notre zone d'étude peut être considérée comme un cas typique pour expérimenter notre nouvelle méthodologie, et cela à cause de la présence de plusieurs facteurs: Le premier facteur concerne les caractéristiques géométriques du lac: Sa surface qui est égale à 60000 m² environ et sa profondeur maximale qui vaut 6.78 m environ, ont formé des conditions favorables pour expérimenter et prouver la nouvelle méthodologie. Le deuxième facteur porte sur l'importance touristique du lac : Selon Nohad Bsaibiss, ingénieur à l'Arc-en-ciel, le lac accueille plus de 200000 touristes par an. Il forme avec son entourage (arbres verts, étendues d'eau, animaux aquatiques, etc.) une biodiversité attirant les visiteurs. Donc, il est important d'estimer, à travers la nouvelle méthodologie, la quantité d'eau qui peut être contenue dans le lac, dans le but de la conserver pendant une longue période. Le dernier facteur est d'ordre agricole. Selon Bsaibiss, la surface des terrains cultivés et irrigués de l'eau du lac atteint 100 hectares (1 km²) environ. Ainsi, l'estimation du volume de l'eau qui peut y contenir permet de contrôler la quantité de l'eau utilisée dans l'irrigation. Cela est nécessaire parce que le lac se situe dans une région ayant un climat semi-aride qui connaît une instabilité dans son régime pluviométrique : succession des années arides et des années sèches.

Les caractéristiques physiques et anthropiques du lac ont formé les conditions nécessaires pour exécuter les étapes d'expérimentation nécessaires pour prouver notre nouvelle méthodologie.

3- Méthodologie

Cette partie vise à expliquer les deux étapes exécutées afin de collecter les informations de base qui nous ont permis de calculer l'altitude du fond du lac et les altitudes de ses bords. Et cela, dans le but d'établir une relation mathématique afin de réaliser sa carte 3D et estimer sa capacité maximale (volume) .

La première étape a été basée sur le travail théorique visant à fixer des points de longitudes (coordonnées X) et de latitudes (coordonnées Y) à la surface du lac et à ses bords. Cette étape a pour but d'accomplir la partie théorique de la méthode angle–distance ; Il s'agit d'une ancienne méthode d'orientation modifiée pour être adaptée à

notre cas d'étude. Cette méthode nous a permis d'accéder, sur le terrain, aux coordonnées X et Y. Cela a été réalisé en utilisant les images satellites de « Google Earth » couvrant notre zone d'étude.

La deuxième étape a consisté à se diriger et à se déplacer vers les points de latitude et de longitude à la surface du lac. C'est une forme d'application, sur le terrain, de la procédure théorique de la méthode angle-distance. La combinaison de ces

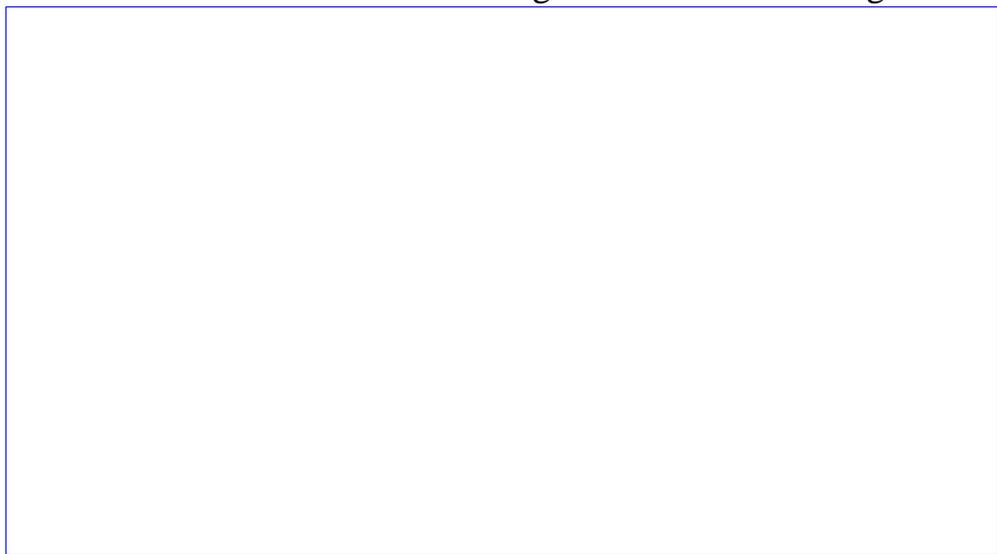


Figure 2: Grilles, coordonnées X et Y et points d'altitude sur les bords du lac

deux étapes de mesure et la modification de certaines procédures (Cf. Travail théorique), nous a permis de mesurer l'altitude du fond du lac (Coordonnées Z)

3-1 -Travail théorique

Ici, c'est la détermination des points des échantillons et la manière par laquelle nous les avons atteints qu'il sera en question. Nous avons déterminé, sur une image satellite extraite de « GoogleEarth » à 1/4500° (Figure 2), 60 points d'échantillons, qui, au-dessous desquels, nous avons mesuré l'altitude du fond du lac (Tableau 1). Ces échantillons ont été choisis au niveau des intersections entre les grilles couvrant la totalité du lac et de ses bords : une surface de 60 000 m² environ.

Tableau 1 : Coordonnées X et Y des points d'intersection des grilles

Co	Longitude	Latitude	Co	Longitude	Latitude	Co	Longitude	Latitude
1	35.866637	33.790840	45	35.867703	33.790219	F3	35.867100	33.790016
2	35.866435	33.791040	46	35.867508	33.790422	F4	35.866880	33.790225
3	35.866208	33.791250	47	35.867289	33.790630	F5	35.866660	33.790428

4	35.866021	33.79144	48	35.867070	33.790847	X1	35.86629	33.792242
5	35.865810	33.791650	49	35.867062	33.791252	X2	35.86639	33.792146
6	35.866029	33.791860	50	35.866850	33.791448	X3	35.86649	33.792061
7	35.866217	33.79205	51	35.866647	33.791657	X4	35.86701	33.791534
8	35.866430	33.792260	52	35.866850	33.791860	X5	35.86706	33.791471
9	35.866635	33.792470	53	35.867054	33.791657	X6	35.86700	33.791442
10	35.866846	33.792670	54	35.867274	33.791454	X7	35.86697	33.791486
11	35.867057	33.792470	55	35.867477	33.791252	X8	35.86701	33.791458
12	35.867274	33.792270	56	35.867696	33.791043			
13	35.867486	33.792070	57	35.867914	33.790834			
14	35.867689	33.791870	58	35.867703	33.790632			
15	35.867899	33.791660	59	35.867493	33.790834			
16	35.868109	33.791460	60	35.867273	33.791043			
17	35.868336	33.791250	A	35.866434	33.790630			
18	35.868532	33.791050	A1	35.866247	33.790840			
19	35.868752	33.790850	A2	35.866012	33.791029			
20	35.868532	33.790640	A3	35.865810	33.791232			
21	35.868320	33.790420	A4	35.865590	33.791441			
22	35.868125	33.790220	B	35.865379	33.791664			
23	35.867922	33.790000	B1	35.865607	33.791853			
24	35.867719	33.789800	B2	35.865811	33.792062			
25	35.867500	33.790010	B3	35.866006	33.792251			
26	35.867297	33.790210	B4	35.866226	33.792460			
27	35.867077	33.790420	B5	35.866431	33.792660			
28	35.866866	33.790630	B6	35.866634	33.792875			
29	35.866858	33.791040	C	35.866862	33.793097			
30	35.866647	33.791250	C1	35.867057	33.792886			
31	35.866443	33.791460	C2	35.867268	33.792677			
32	35.866232	33.791650	C3	35.867486	33.792483			
33	35.866435	33.791850	C4	35.867680	33.792281			
34	35.866640	33.792060	D	35.867890	33.792087			
35	35.866853	33.792270	D1	35.868093	33.791878			
36	35.867062	33.792060	D2	35.868312	33.791676			
37	35.867266	33.791870	D3	35.868524	33.791462			

38	35.867486	33.79166	D4	35.868719	33.791259
39	35.868320	33.79084	D5	35.868940	33.791056
40	35.867696	33.79146	E	35.869151	33.790853
41	35.867898	33.79125	E1	35.868956	33.790643
42	35.868117	33.79104	E2	35.868736	33.790440
43	35.868117	33.79063	E3	35.868532	33.790230
44	35.867914	33.79042	E4	35.868337	33.790007
			E5	35.868125	33.789804
			E6	35.867930	33.789600
			F	35.867726	33.789397
			F1	35.867515	33.789609
			F2	35.867296	33.789806

La densité des points des échantillons était de 4 points pour chaque 31 m². Elle correspond au déplacement d'une seconde d'arc dans le système de coordonnées « Degré, minute, seconde » (en considérant que chaque 1 degré d'arc vaut 111 km environ).

La densité choisie convenait à la méthode de krigeage « Krigind »: C'est une méthode d'interpolation qui estime les valeurs numériques des points non mesurés entre deux points mesurés. Le krigeage réalise l'interpolation spatiale par calcul de l'espérance mathématique d'une variable aléatoire (Bogaert, 2007). Il est utilisé automatiquement par le logiciel « Surfer 10 » pour réaliser la carte 3D. Plus la densité des points est grande, plus elle contribue à une finesse considérable en ce qui concerne l'application de l'interpolation. Le choix de cette densité a également dépendu de la variation de l'angle de la boussole. Les conditions de choix ont assuré l'équilibre entre les besoins d'interpolation et les limites de déplacement en utilisant la boussole. Par contre, cette densité se diffère de celle proposée par le FAO (2009) qui est égale à un point pour un quadrillage d'ordre de 5 m x 5 m, dans le cas du calcul de la hauteur de l'eau quand l'étendue d'eau est pleine, grande et de forme irrégulière (cas de notre étendu d'eau) .

L'imperfection de cette méthode s'attache à la distance séparant les points de mesure ; la première remarque qui pourrait être notée est que cette distance (5 m x 5 m), très petite, pourrait entraver le déplacement entre les points de mesure même en utilisant un petit bateau ayant une longueur de 3 m. Le problème se multiplie lors de l'implantation des flotteurs repérant les points de mesures ; ces flotteurs forment un facteur supplémentaire qui entrave le déplacement. La deuxième remarque est que le FAO n'a pas justifié le choix de cette distance ; pourquoi une distance de 5 m x 5 m et

non pas de 1m ou de 10 m ? Donc, une méthode étant générale et non justifiée, ne peut pas être appliquée dans notre zone d'étude.

En outre, nous avons agrandi l'échelle de l'image satellite utilisée, de 1/20000° à 1/4500°, et cela, parce que la petite échelle ne permet pas de tracer clairement le réseau de grilles et d'implanter les points des échantillons ; Sur l'image à petite échelle (1/20000°), nous avons d'abord tracé une ligne joignant deux points localisés au centre de l'image parce que plus on s'éloigne du centre, plus l'échelle se modifie et produit d'erreurs d'échelle (Provencher, 2007). Puis, à l'aide d'une règle graduée nous avons mesuré la distance en cm entre ces deux points. La distance était de 0.5 cm ou de 100 m (nombre obtenu en multipliant 0.5 cm par 20000 cm qui correspondait à l'échelle de l'image). Enfin, en utilisant une photocopieuse, nous avons agrandi l'image. La nouvelle distance séparant les deux points a été mesurée de nouveau. Elle valait 4.4 cm ce qui est équivalent à 20000 cm. Donc, 1 cm sur la nouvelle image valait 4500 cm (20000 cm / 4.4 cm).

Après la détermination des points des échantillons, il était nécessaire de préciser la manière, par laquelle, ils ont été atteints à la surface du lac. Il s'agit de déterminer sur l'image satellite deux points: Un point de départ (F) situé au bord sud du lac (Figure 2) et correspondant à un bouton ; un repère fixé au sol¹. Au niveau de (F), ayant une altitude de 873 m, le lac atteint sa capacité maximale. Ce point s'accorde avec une ligne parallèle à la longitude traversant l'image satellite et s'orientant vers le nord Lambert de l'image. Puisque la boussole ne s'oriente que vers le nord magnétique, nous avons tracé une autre longitude passant par le point de départ, recoupant la longitude de Lambert et s'orientant vers le nord magnétique. Cette ligne décrivait un angle de 4° 9' (Gouvernement du Canada. Ressource naturelle Canada, 2014) dans notre région d'étude avec la longitude Lambert. Cet angle correspondant à la déclinaison magnétique² entre le nord de l'image et le nord magnétique indiqué par la boussole, a été calculé en servant du site internet de Canada. Nous avons vérifié notre résultat en utilisant la carte topographique de la région : La déclinaison magnétique indiquée sur cette carte et revenant à l'année 1964 était égale à 3° 22'. Puisque le nord magnétique varie chaque année, sur une durée de 50 années (de 1964 à 2014), la variation était égale à 0° 47'. Cela nous a permis de recalculer la déclinaison magnétique de l'année 2014. Le résultat obtenu était identique à celui du site internet.

¹Le repère fixe ne peut pas être déplacé, et par la suite, il conserve la précision des coordonnées X et Y qui ont été utilisées plus tard dans l'orienter sur le terrain.

² La déclinaison magnétique est l'angle formée entre la direction du nord magnétique (Nm) et la direction du nord géographique (Ng) et celle du nord Lambert de la carte. La déclinaison magnétique peut être positive si le Nord magnétique est à l'est du Nord géographique ou négative si le Nord magnétique est à l'ouest du Nord géographique (voir le schéma ci-dessus). Elle est souvent exprimée en degrés, minutes d'arc, secondes d'arc.

Et un point d'arrivée (24) correspondant au point d'échantillon d'intersection le plus proche du point (F).

En joignant par une ligne droite le point (24) au point (F), nous avons obtenu un angle formé de la nouvelle longitude orienté vers le nord magnétique, du point de départ et du point d'arrivé. Cet angle est mesuré et noté. La distance qui sépare le point de départ (F) du premier point d'arrivé (24) a été mesurée sur l'image par une règle graduée en cm et elle a été transformée en m en fonction de l'échelle de l'image. Les mêmes étapes ont été appliquées sur les autres points fixés à la surface du lac. Après la détermination des coordonnées X et Y des échantillons et la détermination des angles d'orientation, la mesure de la profondeur sera possible.

3-2- Travail sur le terrain

Le travail sur le terrain a consisté à mesurer la hauteur actuelle de l'eau du lac à partir des points des échantillons et à mesurer la hauteur du vide à l'aval. Par la suite, les paramètres nécessaires à la formulation de l'équation mathématique seront mesurés.

Les mesures de la hauteur actuelle de l'eau ont été réalisées en utilisant une boussole, une mesure graduée et une corde graduée munie à l'un de ses extrémités d'un poids à base large qui conserve l'exactitude des mesures en empêchant le poids et la corde de s'enfoncer dans la couche argileuse qui couvre le fond du lac d'une épaisseur supérieure à 0.5 m.

Un groupe de 3 personnes équipées d'un bateau ont exécuté le travail. La première personne s'est installée sur le point (F). Elle a pivoté l'habitacle rotatif de la boussole jusqu'à ce que l'angle désiré est devenu en face du point indice. Elle a tenu la boussole bien droite dans sa main et elle s'est assurée que la flèche de direction est pointée devant soi. Ensuite, elle a pivoté sur soi-même avec la boussole jusqu'à ce que la pointe nord de l'aiguille aimantée ait été exactement sur la pointe de la flèche incrustée (Figure 3).

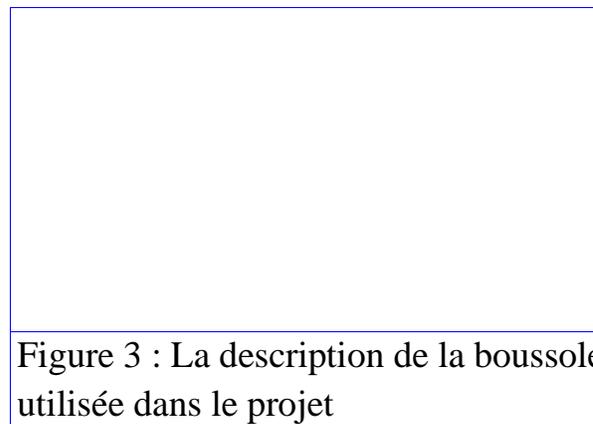


Figure 3 : La description de la boussole utilisée dans le projet

L'azimut choisi est devenu devant soi au bout de la flèche de direction, et l'angle déjà calculé sur la carte est atteint sur le terrain. Une fois l'angle est atteint, la personne a tiré une extrémité de la mesure graduée. La deuxième personne s'est dirigée, dans l'eau, vers le point (24) en tirant l'autre extrémité de la mesure graduée.

Au-dessous de ce point, elle a lancé la corde dans l'eau et elle a mesuré la profondeur. Le point (24) a constitué, à son tour, le point de départ vers un nouveau point de mesure, et ainsi de suite jusqu'au dernier point. Les mesures ont été effectuées lorsque l'eau était à un certain niveau X; le lac n'était ni vide ni à son niveau maximal. La hauteur du vide du lac a été calculée à son aval. Une tige rigide s'étalant du bord a été prolongée au-dessus du point (24) ; le point le plus profond du lac. De cette tige se pend une corde graduée munie d'un flotteur à son extrémité. Une fois le flotteur touchait la surface de l'eau, il indiquait la distance séparant le bord de la surface.

4- Résultats

Les mesures précédentes nous ont permis de proposer une formule mathématique qui est nécessaire à la réalisation de la carte 3D du lac.

4.1. Formule mathématique

Cette formule se base sur 3 paramètres essentiels :

Le premier concernel'altitude au niveau de laquelle l'eau contenue dans le lac atteint sa hauteur maximale (Al_{max}) ; 6.78 m. Il s'agit d'une variable qui est équivalente à l'altitude du bord Sud du lac au point (F). Cette altitude qui est égale à 873 m a été extraite de la carte topographique de la région à 1/20000°. Le deuxième porte sur la hauteur actuelle de l'eau (Nac) à un instant donné et sur un point de mesure donné (Tableau 2) ; c'est une variable qui correspond à la profondeur de la partie inondée du lac au niveau de chaque point d'échantillon fixé à sa surface.

Le troisième paramètre porte sur la hauteur du vide du lac à l'aval (H_{vav}) qui, dans notre zone d'étude, se localise au niveau du point d'échantillon (24). Cette variable, qui est égale à 3.28 m (Figure 4), ne varie pas dans la même étendue d'eau mais elle doit être recalculée sur chaque nouvelle étendue.

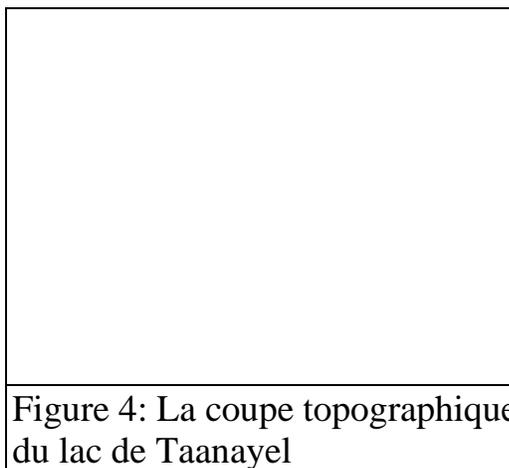


Figure 4: La coupe topographique du lac de Taanayel

Si on ajoute la valeur de la hauteur du vide (3.28 m) à toutes les hauteurs actuelles

de l'eau mesurées au niveau des points

Tableau 2: Hauteur actuelle de l'eau contenue dans le lac

Code	Hauteur actuelle (m)	Code	Hauteur actuelle (m)
1	2.03	31	1.63
2	1.82	32	1.47
3	1.76	33	1.56
4	1.59	34	0.60
5	1.47	35	1.40
6	1.36	36	1.56
7	1.20	37	1.70
8	1.48	38	1.91
9	2.14	39	2.08
10	2.45	40	2.47
11	2.09	41	2.69
12	1.80	42	2.83
13	1.20	43	2.96
14	1.34	44	3.09
15	1.59	45	3.08
16	2.01	46	2.83
17	2.43	47	2.57
18	2.76	48	2.31
19	3.05	49	2.11
20	3.17	50	1.88
21	3.28	51	1.25
22	3.41	52	1.34
23	3.45	53	1.70
24	3.50	54	2.07
25	3.12	55	2.24
26	2.92	56	2.44
27	2.50	57	2.61
28	2.17	58	2.64
29	2.06	59	2.40
30	1.78	60	2.34

d'échantillons, le lac sera plein. Et cela, parce que la surface entière du lac se trouve à des altitudes inférieures à 873 m: l'altitude à laquelle l'eau atteint sa hauteur maximale.

Ainsi, une relation pourrait être établie entre (Al_{max}), (N_{ac}) et (H_{vav}) afin de calculer l'altitude du fond de l'étendue d'eau (T_f) au niveau d'un point donné à sa surface. (T_f) est égale à la somme du niveau actuel de l'eau (N_{ac}) à un point d'échantillon donné et la hauteur du vide du lac à l'aval (H_{vav}) soustraite de l'altitude au niveau de laquelle l'eau contenue dans le lac atteint sa hauteur maximale (Al_{max}). Cette relation pourrait être exprimée par la formule mathématique suivante:

$$T_f = Al_{max} - (N_{ac} + H_{vav})$$

Tels que,

- T_f L'altitude du fond de l'étendue d'eau exprimée en mètre
- Al_{max} L'altitude au niveau de laquelle l'eau contenue dans le lac atteint sa hauteur maximale exprimée en mètre
- N_{ac} La hauteur actuelle de l'eau exprimée en mètre
- H_{vav} La hauteur du vide du lac à l'aval (la distance séparant la surface de l'eau du niveau à partir duquel le lac atteint son niveau maximal) exprimée en mètre

L'altitude moyenne du fond de l'étendue d'eau est égale à :

$$T_{f moy} = \frac{\sum_{i=1}^n T_{f1} + T_{f2} + \dots + T_{fn}}{n}$$

Tels que,

- $T_{f moy}$ L'altitude moyenne du fond de l'étendue d'eau exprimée en mètre
- T_f L'altitude du fond de l'étendue d'eau à un point donné exprimée en mètre
- n Le nombre de valeurs obtenues

Tableau 3: Altitudes du fond du lac

Code	Altitude (m)						
1	868	31	868	16	868	46	867
2	868	32	868	17	867	47	867
3	868	33	868	18	867	48	867
4	868	34	869	19	867	49	868
5	868	35	868	20	867	50	868
6	868	36	868	21	866	51	868
7	869	37	868	22	866	52	868
8	868	38	868	23	866	53	868
9	868	39	868	24	866	54	868
10	867	40	867	25	867	55	867
11	868	41	867	26	867	56	867
12	868	42	867	27	867	57	867
13	869	43	867	28	868	58	867
14	868	44	867	29	868	59	867
15	868	45	867	30	868	60	867

En appliquant la formule précédente sur tous les points d'échantillons, nous

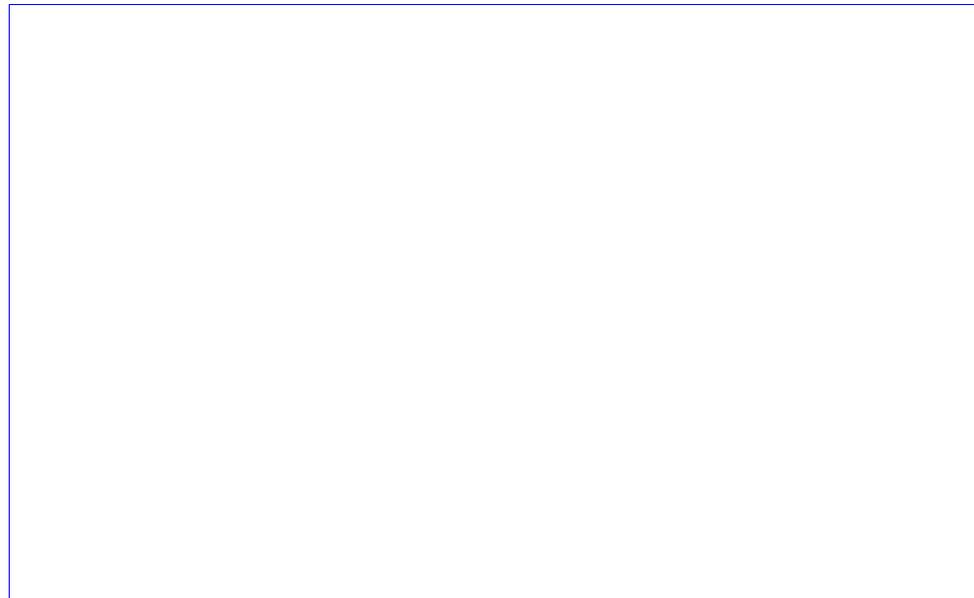


Figure 4: Carte 3D du lac de Taanayel

obtiendrons les altitudes du fond du lac (Tableau 3) qui, avec les altitudes du bord (A, A1, ..., F4, F5) et les coordonnées X et Y déjà mesurées, ont constitué une base de données qui nous ont permis de réaliser la carte 3D du lac.

4-2- Carte 3D du lac

4) a été réalisée à travers le logiciel « Surfer 10 ». Cette carte présente un fond plat dont l'altitude varie entre 866 et 868 m avec 2 m de dénivellation sur une distance de 407 m entre l'amont et l'aval. Le fond est entouré par des bords décrivant une différence d'altitude de 3 m environ entre son amont qui se coïncide avec le point (C) et son aval qui se coïncide avec le point (F) et qui a une altitude de 873 m du niveau de la mer. Le bord surplombe des rives raides ayant une pente de 40° en moyenne.

Le calcul du volume du lac montre que sa capacité maximale est de 131000 m^3 d'eau environ. Les fluctuations saisonnières du débit du canal qui alimente le lac au niveau du point (C) retentissent sur ce volume qui subit des variations de grande ampleur ; ainsi, la fonte de la neige vers mi-mai fait augmenter le débit du canal

jusqu'à 5 m³/s, et par la suite, la quantité de l'eau qui alimente le lac augmente et le lac atteint sa capacité maximale. Par contre, vers le fin d'octobre, le canal se tarit, et avec un débit nul, le volume de l'eau diminue jusqu'à 40 m³ environ.

5- Conclusion et discussion

En présence des contraintes qui peuvent empêcher les chercheurs de mesurer l'altitude du fond des étendues d'eau permanentes, exprimées par l'incertitude des GPS et par l'absence des cartes topographiques à grande échelle, nous avons pu développer une nouvelle méthode qui permet d'effectuer cette mesure. Une méthode basée sur une formule mathématique simple mais qui demande une démarche rigoureuse basée essentiellement sur la relation entre l'altitude du bord du lac et ses différentes altitudes de fond.

Dans notre travail, nous avons remplacé la carte topographique par l'image satellite de « Google Earth ». Cela pourrait être considéré comme une nouvelle approche pour réaliser plusieurs travaux qui ont été basés sur la carte topographique. L'avantage de cette nouvelle approche est qu'elle peut être valable dans les pays dans lesquels l'accès aux cartes topographiques est difficile voire impossible surtout au Liban. L'autre avantage est que l'utilisateur n'a pas besoin de faire des calculs sur la carte topographique pour obtenir les coordonnées voulues; ces coordonnées sont facilement présentées par l'image satellite du « Google Earth ».

Dans notre travail, nous avons pu démontrer l'incertitude du GPS au niveau des petites distances dans plusieurs pays comme le Liban. Vu ce problème, nous avons remplacé le GPS à la surface de l'eau, par la méthode angle – distance qui était dédiée aux terres fermes.

La nouvelle formule pourrait aider à réaliser des cartes 3D en utilisant plusieurs logiciels tel que « Surfer ». Par la suite, cela nous permet d'estimer le volume de l'étendue d'eau et par la suite de calculer sa capacité maximale.

Ici on peut poser les questions suivantes : est-ce que cette méthode pourrait être appliquée facilement par l'utilisateur (agriculteur, ...)? Ou bien va-t-il besoin d'un spécialiste pour l'aider?

6- Référence bibliographique

1. Arrignon J., 1998 – Aménagement piscicole des eaux douces. Paris, Techniques et documentation.
2. Righetti B., Aten. Pôle de ressources & de compétences pour la nature. Mémento de terrain N°83 [En ligne], 2014. <http://ct83.espaces-naturels.fr/les-lacs>. 22/12/2014.
3. Bogaert P., 2007- Analyse statistique de données spatiales et temporelles. Notes de cours. Université catholique de Louvain
4. Buteau, P., Dignard, N. et Grondin, P. (1994) Système de classification des milieux humides du Québec. Ministère de l'Énergie, de mines et des ressources du Canada et Ministère des Ressources naturelles du Québec, Québec.
5. CIT, Centre d'Information Topographique, (2004). Ressources naturelles Canada, Géomatique Canada, contrat 23258-055970/001/MTB.
6. CREDDO, terre humide, [En ligne], 2014. <http://www.creddo.ca/fr/actions/terreshumides.php>
7. FAO, estimations des besoins en eau [En ligne], 2014. ftp://ftp.fao.org/fi/CDrom/FAO_training/FAO_training/general/x6705f/x6705f02.htm. 19/8/2009.
8. Gouvernement du Canada, Ressource naturelle Canada, [En ligne], 2014. http://geomag.nrcan.gc.ca/calc/mdcal-r-fra.php?date=2014-12-12&latitude=33&latitude_minutes=47&latitude_direction=1&longitude=35&longitude_minutes=52&longitude_direction=-1. 14/12/2014
9. Le corridor forestier du Mont-Saint-Bruno, [En ligne], 2014. <http://cmsb.nature-action.qc.ca/>
10. Touchart L., décembre 2000 - « Qu'est-ce qu'un lac ? », Bulletin de l'association de géographes français, CNRS, vol. 4, p. 320 (ISSN 0004-5322).
11. Milles S. et Lagofon J., 1999, Topométrie et Topographie moderne, Tome 1 et 2, Eyrolles
12. Pêche en étang, [En ligne], 2014. <http://ge.ch/nature/information-nature/peche/peche-en-etang>. 17/12/2014.
13. Provencher L. et Dubois M., 2007. Précis de télédétection, volume 4, Méthodes de photointerprétation et d'interprétation d'image. Presses de l'Université de Québec.
14. Provencher L. et Dubois M., 17-04-2005. Guide d'interprétation visuelle des entités géographiques naturelles à partir des images ETM+ de Landsat et des photographies aériennes : terres humides (marais, marécages et tourbières). Sherbrooke 4^e version
15. Vues d'ensemble du Québec Atlas Québec. L'occupation du sol - Exemples photographiques, [En ligne], 2014. http://vuesensemble.atlas.gouv.qc.ca/site_web/exemple_classe/exemples_photos.htm.
16. جورج بيار، ٢٠٠٢، معجم المصطلحات الجغرافية، المؤسسة الجامعية للدراسات والنشر والتوزيع، بيروت