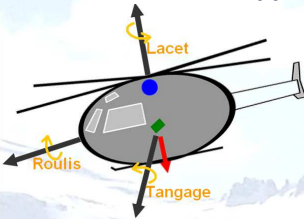


## Geomonitoring de l'enneigement par Radar / GNSS / INS depuis un hélicoptère

### 1. Contexte

- La neige représente une des principales sources d'eau en milieu montagneux.
- **La quantité d'eau retenue sous forme de neige a une importance économique et sociale prodigieuse.**
- Elle affecte la quantité d'eau disponible des différents milieux naturels, de l'agriculture, de l'eau potable, de la prévention contre les crues et inondations et, en Suisse notamment, de l'énergie hydro-électrique.
- Afin de la quantifier la quantité d'eau stockée sous forme de neige, deux mesures sont essentielles : la profondeur du manteau neigeux et la densité de la neige.

### 3. Correction développée



Hypothèses :

- Le capteur IMU est parfaitement aligné avec l'hélicoptère.
- Le profil de vol est parfaitement perpendiculaire au flanc de la montagne.
- La mesure est faite perpendiculairement au XY de l'IMU, c'est-à-dire parfaitement sous l'hélicoptère.

La correction est purement géométrique

$$profondeur_{neige\ corrigée} [m] = profondeur_{neige} [m] * \frac{\cos(\alpha + \beta) \cos(\mu)}{\cos(\alpha)}$$

$\alpha$  étant la pente,  $\beta$  le tangage et  $\mu$  est fonction du roulis et du tangage.

Le tangage et le roulis sont extraits des mesures IMU.

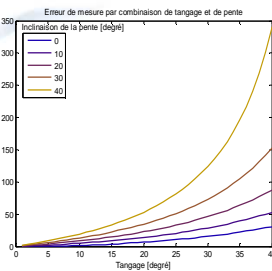
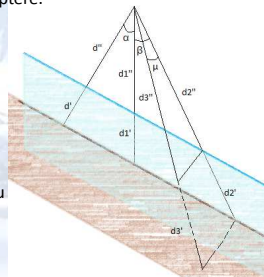
Sur le graphique ci-contre, l'erreur de mesure est représentée en fonction de la pente et de tangage.

Pour une pente représentative de 20° et un tangage de 10°, l'erreur de la mesure est de 8%.

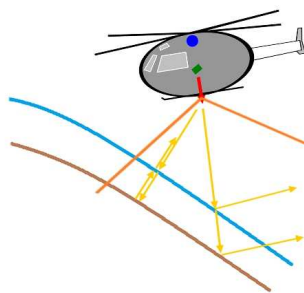
La mesure de la profondeur de neige dépend aussi de la densité, puisque la vitesse de propagation de l'onde à travers la neige dépend de la constante diélectrique de la neige :

$$v = c_0 * \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\epsilon}}, \quad \epsilon = (1 + 0.845 * \frac{\rho_{neige}}{1000})^2$$

$\Delta$ densité [kg/m <sup>3</sup> ]	50	100	150	200
$\Delta$ profondeur [m]	0.039	0.075	0.109	0.141



### 5. Discussion



Après avoir approfondi le fonctionnement des divers procédés de mesures, nous avons obtenu les résultats suivants:

1. Un GPR à une ouverture typique de 90° sur l'axe avant-arrière et 60° sur l'axe perpendiculaire.
2. L'onde radar a une fréquence centrale de 400 MHz, équivalente à une longueur d'onde de 75cm, la neige se comporte donc comme un miroir.

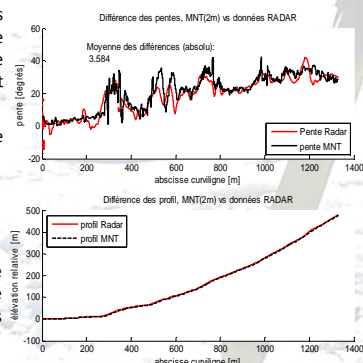
→ Le système d'acquisition de données ne fonctionnent pas comme on le pensait, mais comme sur la figure ci-contre.

Cette hypothèse explique les différents résultats de l'expérience. La mesure ne dépend donc pas de l'orientation de l'hélicoptère. L'onde radar est réfléchi perpendiculairement à la pente.

Nous pouvons donc proposer une nouvelle correction :

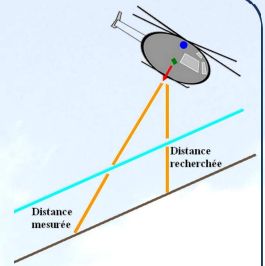
$$Profondeur_{verticale} [m] = \frac{Profondeur_{normale} [m]}{\cos(\alpha)}$$

Comme nous le démontrons sur le graphique ci-contre, la pente peut être directement extraite des mesures radar afin de corriger les mesures.



### 2. Objectifs et Stratégie

- **Quantifier et corriger l'erreur de mesure due à l'orientation de l'hélicoptère.**
- Identifier les sources d'erreurs possibles dans le calcul de la quantité d'eau contenue sous forme de neige présente dans un bassin versant.

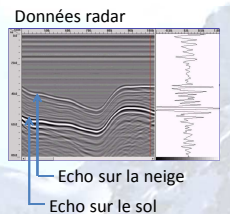


3 instruments utilisés :

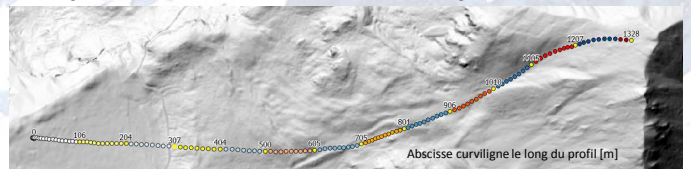
1. Radar à pénétration de sol (GPR)
2. Centrale inertielle de navigation (MEMS-IMU)
3. Système de positionnement (GPS)

Le principe du GPR est très intuitif, le comportement est le même que la lumière dans un milieu transparent. Un changement de milieu provoque la réflexion du signal, c'est-à-dire des échos radar.

Un IMU est instrument pour mesurer les accélérations et les vitesses angulaires.



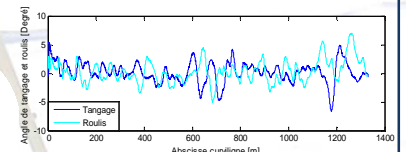
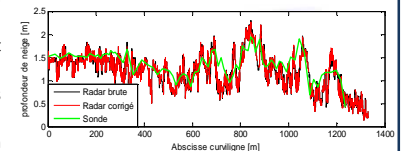
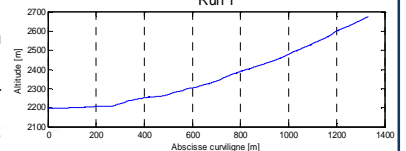
### 4. Expérience in situ : Vallon de Réchy (VS)



Le profil est long de 1.3 km. Des mesures de profondeur de neige ont été prises à la sonde tous les 15 mètres environ. Les mesures à la sonde sont considérées comme vraies. Le tracé a été choisi tel qu'il représente toute la vallée.

Observations :

- Le tangage reste faible tout au long du profil.
- **La correction n'apporte aucun bénéfice, au contraire.**
- Le temps de vol de l'onde jusqu'au sol ne dépend pas du tangage de l'hélicoptère.
- Les mesures non-corrigées sont proches des mesures par sondes.
- L'erreur de mesure n'est pas dépendante du tangage.
- Les erreurs ont une distribution proche d'une courbe gaussienne.



	Erreur	Radar brute	Radar corrigé
Sonde	Moyenne	-0.137	-0.138
Verticale	Écart-type	0.216	0.216
Sonde	Moyenne	-0.100	-1385
Normale	Écart-type	0.203	0.216

### 6. Conclusions

- Aucune erreur n'est directement due à l'orientation de l'hélicoptère
- Les mesures de profondeur de neige sont normales à la pente
- Les erreurs de mesures sont exacts : le biais est faible
- Les erreurs de mesures sont imprécises : l'écart-type est grand
- Une erreur en densité de neige affecte fortement les mesures de profondeur

### 7. Recommandations

- Prévoir des profils avec une topographie peu accidentée
- Voler le plus proche du sol possible
- Préférer des mesures de densité éloignées
- Eviter le tangage à plus de 15° dans les pentes

En collaboration avec :

