

## Les capteurs de transport de neige par le vent au banc d'essai

Le transport de la neige par le vent entraîne la formation de congères, augmente le risque d'avalanches et limite la visibilité. Afin d'améliorer la prévision du phénomène et de développer une ingénierie de protection, les acteurs locaux de la prévention ont besoin d'informations précises sur les quantités de neige transportée par le vent. Cet article fait le point sur les différentes technologies de mesure disponibles en comparant des essais réalisés in situ et en soufflerie avec plusieurs types de capteurs.

### De la nécessité d'estimer les quantités de neige transportées par le vent

Le transport éolien de la neige est un phénomène courant dans les régions polaires et les régions montagneuses froides. D'une façon schématique, la neige est érodée dans les endroits les plus ventés et déposée dans les zones de ralentissement du vent.

Il en résulte la formation de congères\* (photo ①), principalement gênante sur les voies de communications et autour des bâtiments, ou encore la formation de corniches (photo ②) au-dessus des zones de départ des avalanches\*, augmentant le risque de déclenchement. Par ailleurs, le manque de visibilité sur les routes pendant l'épisode de transport, ou encore l'érosion de la neige dans les domaines skiables, peuvent s'avérer problématique.

### ① EXEMPLE DE RELATION SEMI-EMPIRIQUE

Proposée par Dyunin et Kotlyakov (1980) pour une hauteur comprise entre 0 et 2 m :

$$Q = 0,2772(U_{10} - 5)^3 \quad \text{①}$$

avec Q débit (kg/m/s),  $U_{10}$  vitesse à 10 m du sol (m/s), 5 vitesse mesurée à 10 m du sol à partir de laquelle le transport de particules est amorcé (m/s). L'information essentielle apparaissant dans cette expression (et d'ailleurs dans la plupart des autres formules proposées) est que la quantité de neige transportée est proportionnelle au cube de la vitesse relative. Ainsi le débit de neige transportée par mètre linéaire (perpendiculairement à la direction du vent dominant et pour une hauteur comprise entre 1 et 2 m) est de l'ordre de 2 kilogrammes par mètre et par heure pour un vent de 7 m/s, alors qu'il sera de l'ordre de 200 kilogrammes par mètre et par heure pour une vitesse de 14 m/s.

Au vu de l'enjeu, un nombre important de recherches a été mené au Cemagref durant les trente dernières années avec, dans un premier temps, une approche par modélisation physique essentiellement réalisée en soufflerie puis, plus récemment, par modélisation numérique (modèle NEMO\*). Mais aussi sophistiqué que soit

① Congère générée par un bâtiment et bloquant une route.



② Corniches formées par le vent.



le modèle, un profil de concentration reste nécessaire pour son utilisation. Même des formulations empiriques, comme les règles d'ingénierie (Naaim-Bouvet et Brugnot, 1992) visant à dimensionner des barrières à neige, dispositifs classiques anti-congères, nécessitent de connaître, ou au moins d'estimer les quantités de neige transportées.

Certes de nombreuses formules liant quantité de neige transportée et vitesse du vent ont été établies. Semi-empiriques (c'est-à-dire couplant une approche théorique et des mesures *in situ*), elles diffèrent suivant les conditions expérimentales (encadré 1).

Ces estimations du débit sont globales : elles ne font pas souvent apparaître de variations selon la hauteur. Or, il est intéressant de souligner que la concentration massique (et donc le flux massique) est fonction de la hauteur (par rapport à la surface neigeuse) car les mécanismes physiques entrant en jeu sont variés et complexes (encadré 2).

La neige est un matériau éminemment transformable. Contrairement à l'érosion du sable par exemple, où la vitesse à partir de laquelle les particules sont arrachées dépend essentiellement du diamètre des particules, l'érosion de la neige par le vent dépend de la cohésion entre les grains de neige reprise au sol.

## 2 LES DIFFÉRENTS MÉCANISMES DE TRANSPORT DE NEIGE

Les différents mécanismes de transport de neige (figure 1) sont :

- la reptation\*,
- la saltation\* (photo 3),
- la diffusion turbulente\* (photo 3).

Au début de l'épisode de transport, les particules sont arrachées uniquement par entraînement aérodynamique, c'est-à-dire par la force du vent. La particule éjectée retombe sous l'effet de la gravité. Elle rebondit et éjecte d'autres particules ; on parle de saltation. Lorsque les particules n'ont pas suffisamment d'énergie pour en éjecter d'autres, on parle alors de reptation.

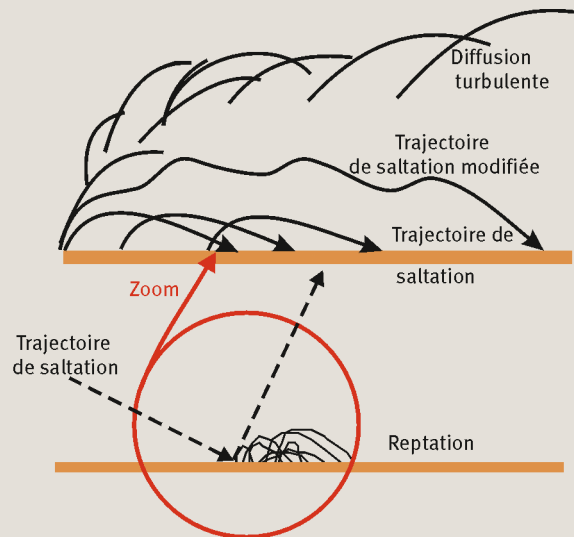
Quand les particules sont transportées par les tourbillons de l'air et ne touchent plus le sol, on emploie le terme de diffusion turbulente ou suspension.

C'est ainsi que par exemple, le sable du Sahara parvient parfois en Europe après avoir traversé la Méditerranée.

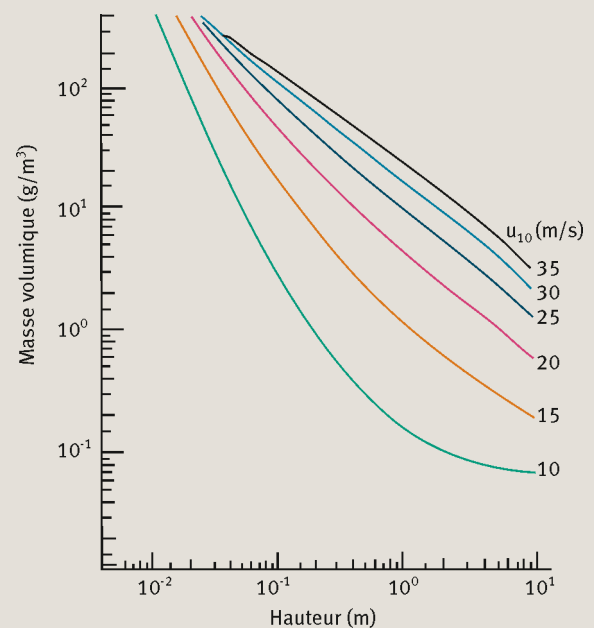
Dans le cas de la neige, on voit « fumer » les crêtes, puis la neige est transformée en vapeur par sublimation. Il existe un état intermédiaire appelé saltation modifiée où les particules qui sont amenées à avoir des impacts fréquents au niveau du sol, ont des trajectoires modifiées par les tourbillons de l'écoulement. Ce sont principalement la saltation et la saltation modifiée qui provoquent les accumulations de neige. Si la hauteur de la couche de saltation pure ne fait que quelques centimètres, on considère généralement que la hauteur de la couche de saltation modifiée est de 0,1 à 1 m. La couche de saltation, située au niveau du sol, connaît la plus forte concentration de neige.

Les données recueillies en Antarctique par Dingle et Radok (1960), puis analysées par Mellor et Fellers (1986), ont permis d'établir des lois polynomiales (figure 2) reliant le flux massique et la concentration massique à la hauteur et à la vitesse du vent (hauteur standard à 10 m au dessus du sol).

### 1 Les différents mécanismes de transport de neige par le vent



### 2 Concentration massique de la neige en fonction de la hauteur au-dessus du sol pour différentes vitesses de vent à 10 m (Mellor et Fellers, 1986)



3 Saltation et diffusion.



### 3 LA FORMULATION DE POMEROY ET GRAY (1993)

Une des formulations les plus abouties pour la couche de saltation est celle proposée par Pomeroy et Gray (1993) qui, couplée à une description de la couche de suspension par les équations de conservation de la masse et de la quantité de mouvement dans le cas d'une couche limite sur une zone plate, permet d'aboutir à :

$$C(z) = \frac{2 * 0.68}{2.8 * 1.6} \frac{\rho}{u_*} \left( 1 - \frac{u_*^2}{u_*^2} \right) \left( \frac{z}{0.08436 u_*^{1.27}} \right)^{\frac{\sigma_s U_f}{k u_*}} \quad (2)$$

où  $C(z)$  est la concentration en particules de neige ( $\text{kg/m}^3$ ) à la hauteur  $z$  (m),  $k$  est la constante de von Karman (prise égale à 0,41),  $\rho$  est la densité de l'air,  $\sigma_s$  est le nombre de Schmidt,  $U_f$  est la vitesse de chute des particules (m/s),  $u_*$  est la vitesse de frottement du vent (m/s), et  $u_{*s}$  est la vitesse de frottement seuil d'arrachement des particules (m/s).

Les études menées (Guyomarc'h et Merindol, 1995) par le Centre d'étude de la neige de Météo-France sur notre site d'altitude commun au Col du Lac Blanc ont montré que les particules de neige fraîche pouvaient être arrachées à partir d'un vent de 4 m/s (à 10 m), les grains à faces planes à partir d'un vent de 8 m/s, les grains fins d'un diamètre inférieur à 0,3 mm à partir de 12 m/s et ceux supérieur à 1 mm à partir de 20 m/s. Pour chaque type de neige, la vitesse d'arrachement seuil doit donc être déterminée, la seule connaissance de la vitesse du vent n'étant pas suffisante.

La formulation proposée par Pomeroy et Gray (1993) (encadré 3) est utilisée en entrée du modèle NEMO, modèle numérique de transport de neige par le vent développé au Cemagref. La formulation empirique régissant la concentration dans la couche de saltation a été obtenue à partir de données expérimentales recueillies dans les plaines du Canada (Pomeroy et Gray, 1993). Le type de neige et la topographie varient d'un site à l'autre et il est légitime de s'interroger sur la validité de telles formulations dans un contexte alpin. D'ailleurs si le modèle NEMO a été testé avec succès en comparant des congères obtenues en soufflerie et à saturation pour des particules sèches (sable, sciure...) au droit d'une barrière à neige en modèle réduit, les résultats du modèle ont été moins concluants lors de la comparaison avec les observations sur site au Col du Lac Blanc (Naaim-Bouvet et Naaim, 2009). Il est vraisemblable que l'imprécision des données d'entrée du modèle constitue une source d'erreur, d'où l'intérêt de mieux définir le profil de concentration.

### Un peu d'histoire : la grande époque des capteurs mécaniques

Les capteurs dits mécaniques (également nommées « pièges à neige ») ont longtemps été les systèmes les plus employés du fait de leurs bonnes performances, de leur facilité de réalisation et d'utilisation et de leur faible coût ; l'essentiel des formules empiriques actuellement utilisées a d'ailleurs été établi par le biais de ces appareils de mesures.

Les pièges à neige sont constitués d'une enceinte de forme et de capacité variables, disposant d'une admission et d'une évacuation d'air. Le mélange air-particules de neige pénètre par l'orifice d'admission placé face au vent. L'élargissement de la section à l'intérieur du piège, la présence de filtres ou de chicanes ou encore leur combinaison, réduisent la vitesse du vent et provoquent la séparation de l'air et des particules, l'air déchargé de particules neigeuses étant expulsé par l'orifice d'évacuation. Lorsque les pièges sont chargés de manière significative, ils sont pesés et la connaissance du temps de captation permet de calculer le flux  $F$  ( $\text{g/m}^2/\text{s}$ ).

$$F = \frac{M}{St} \quad (3)$$

avec  $M$  la masse de la neige (g),  $S$  la surface de l'orifice d'admission ( $\text{m}^2$ ) et  $t$  le temps d'exposition (s).

On considère que dans la couche de suspension, la vitesse horizontale du flux est égale à celle du vent et la concentration ( $\text{g/m}^3$ ) en particules devient donc :

$$C(z) = \frac{F(z)}{U(z)} \quad (4)$$

avec  $F(z)$  le flux de particules ( $\text{g/m}^2/\text{s}$ ) à la hauteur  $z$  et  $U$  la vitesse du fluide (m/s) à la hauteur  $z$ .

En France, le pionnier en matière de mesures de transport de neige fut René Garcia, qui lors de son hivernage à la station Charcot en 1958-1959, capta tout d'abord la neige dans des boîtes de conserves fixées sur un pieu face au vent. Par la suite, il améliora son système pour limiter la turbulence et le refoulement des particules, en y adjoignant un tube coudé vers le haut à l'arrière pour supprimer la compression de l'air ainsi qu'un grillage. La précision des mesures dépend en effet du produit de l'efficacité aérodynamique du piège et de l'efficacité de séparation  $(Q_2 - Q_3)/Q_1$ , où  $Q_1$  est le flux massique de neige à la hauteur de l'orifice d'admission du capteur,  $Q_2$  le flux massique pénétrant effectivement dans le piège et  $Q_3$  le flux massique ressortant du capteur. Comme il n'existe pas de mesures « étalon » pour  $Q_1$ , les différentes expériences visant à déterminer l'efficacité des capteurs mécaniques ont souvent consisté à comparer entre eux les différents types de capteurs mécaniques dans les mêmes conditions expérimentales. L'efficacité des différents capteurs mécaniques est une fonction croissante de la vitesse du vent.

De nombreux capteurs mécaniques ont été utilisés, chaque chercheur ayant son propre modèle. Une liste exhaustive serait longue ! Nous ne citerons ici que les capteurs présentant des avancées particulières (encadré 4).

Pour notre part, que ce soit dans le cas d'expertises, comme par exemple le long du tracé de l'autoroute Grenoble-Sisteron au début des années quatre-vingt dix, ou lors d'expérimentations de recherche sur notre site du Col du Lac Blanc, nous avons mis au point et utilisé les deux types de capteurs suivant :

- les « boîtes prismatiques » (photo 4) sont, comme leur nom l'indique, des boîtes de forme prismatique empilées les unes sur les autres et destinées à rester sur

place pendant toute la saison hivernale. L'air chargé de particules pénètre à l'intérieur de ces capteurs par un orifice de faible diamètre (1,5 cm). L'élargissement dû à la géométrie de la boîte, couplé à la présence de chicanes, conduit au dépôt de particules de neige à l'intérieur du capteur. L'air est ensuite évacué par un orifice de sortie muni d'un filtre. Ce dispositif nous a permis de déterminer que 163 tonnes de neige par mètre linéaire de crête avaient été transportées au Col du Lac Blanc durant l'hiver 88-89 ;

- les « filets à papillon » (photo 5) sont constitués d'une armature métallique sur laquelle vient se fixer un sac collecteur. Ce dispositif nécessite la présence d'expérimentateurs sur le site et est destiné à déterminer les quantités de neige transportée durant de courtes périodes. Les filets à papillon ont principalement permis de tester les systèmes acoustiques et optiques qui vont être présentés par la suite.

Dans le cadre d'une collaboration avec l'Université de Barcelone, ces capteurs ont également été mis en place sur le site expérimental de La Molina et ont donné lieu à des tests dans la soufflerie cryosphérique de Shinjo au Japon (Font *et al.*, 2001). Ces tests montrent que les boîtes prismatiques ont un meilleur comportement que les filets à papillon qui sous-estiment les faibles transports (cette sous-estimation ne se produit plus lorsque le transport est plus intense).



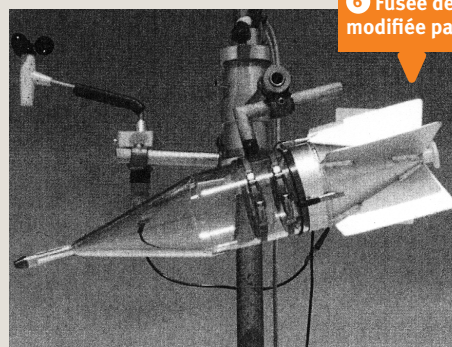
4 Boîtes prismatiques.



5 Filets à papillon.

#### 4 EXEMPLES DE CAPTEURS MÉCANIQUES

La fusée dite de Mellor, conçue en 1965, est munie d'une dérive pour permettre son orientation dans le sens du vent. Dans les années soixante-dix, le corps de la fusée (photo 6) est fabriqué en Plexiglass par les chercheurs suisses (IFENA\*, Institut fédéral pour l'étude de la neige et des avalanches) pour permettre de visualiser le taux de remplissage du capteur. Afin de connaître à la fois l'intensité et la direction du vent responsable du transport de la neige, une version multidirectionnelle est imaginée au Cemagref en 1989 sous la forme d'une « soucoupe volante » qui s'avérera peu opérationnelle, mais qui sera améliorée, en collaboration avec l'IFENA, pour donner lieu au driftomètre (Bolognesi *et al.*, 1995). Celui-ci est constitué d'une platine réglable en hauteur le long d'un mât et supportant huit capteurs dirigés vers les différentes directions cardinales (photo 7) : les orifices d'admission sont équipés de déflecteurs afin que seul le tube dont l'axe coïncide avec la direction du vent capte de la neige ; l'autre extrémité des tubes est évasée et est prolongée par un sac collecteur agissant comme un filtre. Le driftomètre est toujours opérationnel. Il permet, d'une part, de relever l'une des données les plus prédictives du système expert de prévision des avalanches Nivolog, et d'autre part, de mieux connaître les régimes de transport de neige par le vent avant l'implantation de dispositifs de protection comme les barrières à neige. Tous les capteurs présentés précédemment nécessitent une pesée manuelle, opération fastidieuse, qui a cependant pu être automatisée. Ainsi, en 1975, Jairell a conçu une fusée de type Mellor dans laquelle la neige n'est pas stockée mais tombe dans une jauge à précipitation enterrée dans le sol et qui permet de totaliser le transport de neige pendant toute la saison d'hiver, les données étant imprimées grâce à une balance automatique.

6 Fusée de Mellor  
modifiée par l'IFENA\*.

© R. Bolognesi.



7 Première version du driftomètre.

© R. Bolognesi.

### Des capteurs acoustiques : vers une automatisation du recueil des données

Après ces premiers essais, nous avons porté nos efforts sur le développement de capteurs automatiques de transport de neige par le vent, permettant un enregistrement automatique pendant la saison hivernale sans nécessiter d'intervention humaine. Notre choix s'est orienté vers un capteur acoustique. Sa première version « laboratoire », dans les années quatre-vingt dix, était constituée d'un micro placé dans une balle de ping-pong directement relié à un oscilloscope. Sa version « terrain », développée avec l'industriel AUTEK consistait en un microphone miniature à large bande placé dans un tube creux d'aluminium exposé au flux de particules (photo 8). Les sons dus aux impacts des particules sont convertis en signal électrique par un sonomètre sélectif en fréquence : un filtrage passe-bande élimine les basses fréquences dues au vent et les hautes fréquences hors de la gamme audible. La valeur efficace de ce signal est convertie en tension continue. Plus le flux des particules heurtant la structure à un instant donné est important, plus cette tension est de grande amplitude. La variation lente de la tension permet son enregistrement sur une centrale de mesures classique. Ce capteur a été testé lors d'une campagne de mesures réalisée dans la soufflerie climatique du CSTB\* (Centre scientifique et technique du bâtiment) (Michaux *et al.* 2001 ; Lehning *et al.*, 2002) et calibré grâce à l'utilisation de capteurs mécaniques de type « filet à papillons ». On trouvera la courbe d'étalonnage sur la figure 3. On remarque ainsi que le signal enregistré sur le capteur acoustique de transport semble proportionnel au flux de neige transportée. Il s'agissait ici d'un résultat préliminaire. Nous n'avons d'ailleurs utilisé ce capteur sur le terrain que comme un détecteur permettant de savoir s'il y avait ou non du transport de neige et si ce transport était faible moyen ou intense.

Dans le même temps, une société suisse (IAV Engineering) (Chritin *et al.*, 1999) mettait sur le marché un capteur de transport de neige par le vent portant le nom



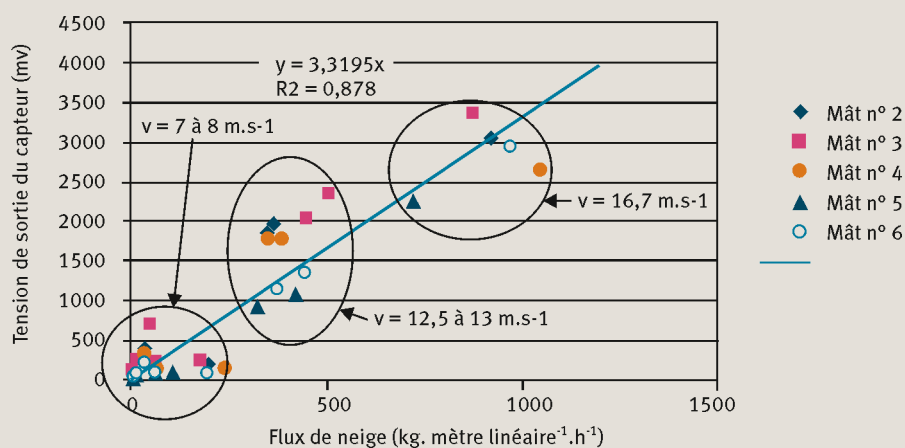
8 Capteur  
acoustique.

de Flowcapt, lui aussi basé sur un principe acoustique. Le Flowcapt (photo 9) est constitué de plusieurs tubes disposés verticalement, chaque tube étant équipé d'un microphone capable d'enregistrer le bruit causé par les impacts des grains de neige et de fournir un flux exprimé en  $g/m^2/s$ . À cette fin, les tubes sont étalonnés individuellement de manière industrielle pour des chocs supposés rigides élastiques sous un flux variable de particules cuboïdes de PVC à une vitesse constante de 1 m/s. La valeur du flux qui est retournée par le capteur est obtenue à partir de la relation :

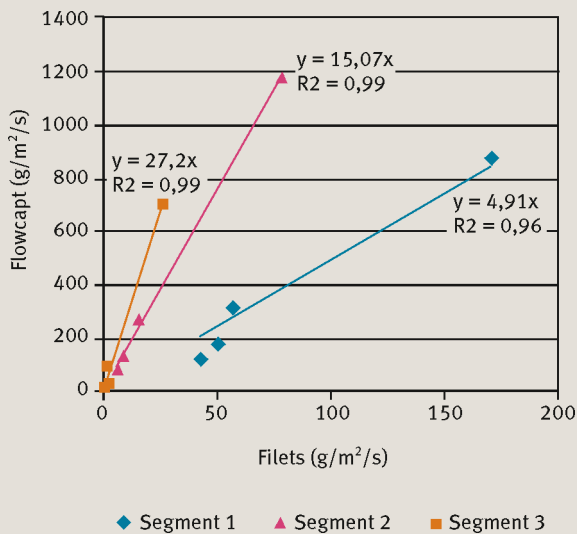
$$\text{Flux} = A(\text{Signal})^2 \quad 5$$

où A est le coefficient de calibration communiqué par le fabricant et propre à chaque tube.

3 Courbe d'étalonnage du capteur acoustique Cemagref/AUTEK obtenu dans la soufflerie du CSTB



#### 4 Comparaison des flux mesurés par les filets et les segments du Flowcapt (le segment 1 est le plus proche du sol) pour l'épisode du 2 février 2005



L'intérêt de ce dispositif par rapport au précédent est d'obtenir un profil de flux (et non une seule valeur intégrée), ce qui permet, d'une part, d'estimer les concentrations et les flux, mais également la valeur du paramètre  $\sigma_s U_{pr}$ , et ce à des fréquences relativement élevées de l'ordre de 0,2 Hz.

Nous avons installé ce capteur sur notre site expérimental du Col du Lac Blanc, où nous menions en parallèle des validations du modèle numérique NEMO pour lequel nous avons besoin du profil de concentration. Le Col du Lac Blanc se trouve à proximité du domaine skiable de l'Alpe d'Huez à 2 700 m et est exploité depuis vingt ans pour l'étude du transport de neige par le vent, conjointement par le Cemagref et Météo-France. Le col présente la caractéristique et l'atout de connaître des vents orientés dans plus de 80 % des cas selon un axe nord/sud : il se comporte comme une véritable soufflerie. Nous avons été sensibilisés au problème de calibration sur un capteur de technologie semblable : raison de plus pour être vigilants sur un capteur industriel qui, pour nous, n'était finalement qu'une boîte noire, puisque pour des raisons de protection industrielle, nous n'avions pas accès au schéma de la carte électronique. Des campagnes de mesures ont tout d'abord été menées *in situ*. Si l'on compare les résultats du Flowcapt avec des mesures issues des filets à papillon, il est intéressant de constater que plus on s'éloigne du sol, plus le rapport entre le flux enregistré par le Flowcapt et le flux mesuré dans les filets augmente (figure 4). Sachant que la vitesse du fluide et donc des particules augmente avec la hauteur, ceci nous a conduit à nous interroger sur l'influence de la vitesse des particules sur la réponse du capteur. Des campagnes ont été menées en soufflerie à ce sujet (Cierco *et al.*, 2007), à la suite desquelles nous avons pu proposer pour des grains fins la recalibration suivante :

$$Flux_{réel} = \frac{(Flux_{capteur})^2}{B.C.U^4} \quad 6$$

avec B coefficient de calibration propre au capteur et donné par le fournisseur (variable en fonction des segments), C coefficient de calibration correspondant au type de grains (ici les grains fins), U la vitesse des particules en m/s (considérée égale à la vitesse du fluide) au niveau du segment.

Il est à noter que le flux varie comme l'inverse de la vitesse à la puissance 4, ce qui laisse à penser que la précision du capteur sera de toute façon réduite. Sachant qu'à proximité du sol, le vent est fortement cisailé et donc que le gradient de vitesse est important, nous avons choisi, pour limiter les erreurs liées à l'estimation de la vitesse, de placer les segments de façon horizontale (photo 10). Par ailleurs la précision de mesures étant compromise, nous avons complété notre banc de mesures (figure 5) par un capteur optique de transport semblant plus performant.

#### Les capteurs optiques : des mesures de plus en plus précises Cas du SPC\* (Snow Particles Counter)

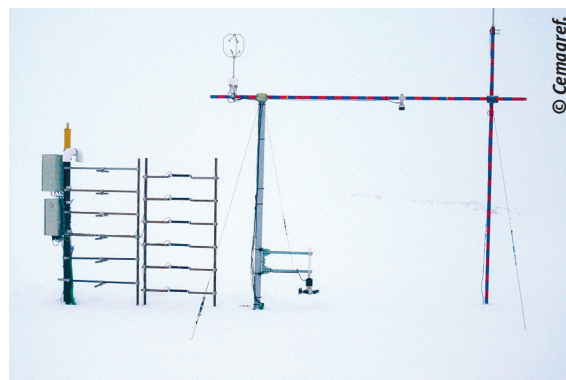
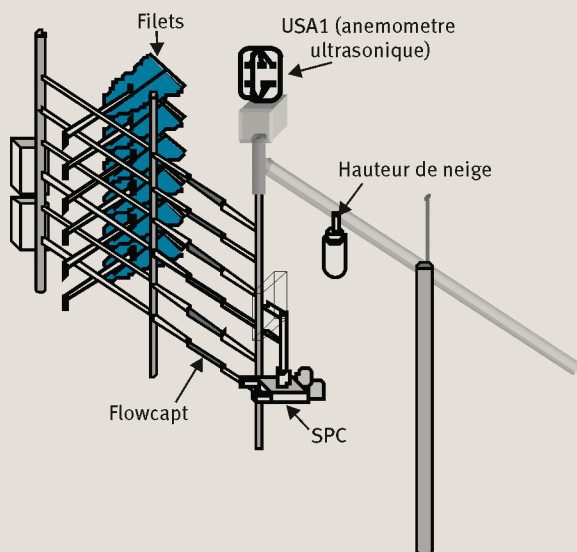
Ce capteur d'origine japonaise (SPC-S7, Niigata Electric) est constitué d'un faisceau optique qui est coupé par le passage des particules (Sato et Kimura, 1993). Le diamètre et le nombre des particules de neige transportée sont détectés par leur ombre sur des semi conducteurs photosensibles (figure 6). L'amplitude du pic d'atténuation (U) du signal est proportionnelle à la taille de la particule. Ces particules sont classées en 32 tailles discrètes de 50 à 500  $\mu\text{m}$  et le capteur retourne le nombre de particules pour chaque taille toutes les secondes. Ces particules sont considérées comme sphériques, ce qui permet d'établir la relation suivante (Sugiura *et al.*, 1998) :

$$Flux = \sum_{n=0}^{31} \frac{1}{6} x_n \cdot \pi \cdot D_n^3 \times \rho / S_f / t \quad 7$$



9 Flowcapt constitué de six segments de 30 cm superposés verticalement.

### 5 Nouveau banc de mesures du transport au Col du Lac Blanc



10 Flowcapt en position horizontale,  
Snow Particles Counter, anémomètre  
ultrasonique, capteur de hauteur de neige.

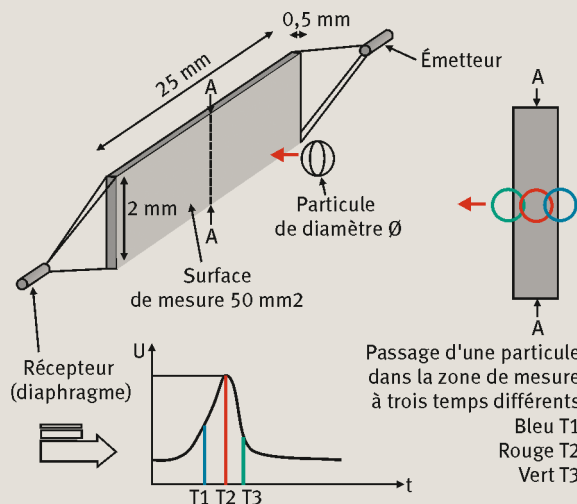
- où  $X_n$  est le nombre de particules détectées dans la classe de taille  $n$ ,  $D_n$  est le diamètre moyen des particules de la classe  $n$ ,  $\rho$  est la masse volumique des particules ( $\text{kg/m}^3$ ),  $S_f$  est la surface du faisceau ( $50 \text{ mm}^2$ ) et  $t$  est le temps (1 seconde).

Le SPC nous permet d'accéder à la granulométrie des particules transportées, mais également à une mesure plus précise du flux en un point grâce à une estimation de la masse volumique des particules.

La surface du faisceau de  $50 \text{ mm}^2$  est faible et rend les mesures particulièrement sensibles à des effets locaux.

Trois épisodes caractéristiques de l'hiver 2008-2009 sont représentés sur la figure 7.

### 6 Principe de fonctionnement du SPC



L'épisode 4 correspond à un épisode de reprise de particules de neige au sol par vent faible ( $V_{8,4 \text{ m}} = 5,8 \text{ m.s}^{-1}$ ), et seules les particules de petite taille atteignent le capteur situé à 20 cm. L'épisode 7 correspond à une chute de neige ventée ( $V_{8,6 \text{ m}} = 13 \text{ m.s}^{-1}$ ), et les particules sont plus uniformément réparties sur toute la gamme de mesure. L'épisode 5 correspond à du transport de particules de grains fins centrés sur  $100 \mu\text{m}$  à 45 cm du sol ( $V_{8,3 \text{ m}} = 10 \text{ m.s}^{-1}$ ). Il est représentatif de la majorité des épisodes observés sur le site. Il est intéressant de noter que la classe centrée sur  $45 \mu\text{m}$  est quasiment exempte de grains, ce qui n'a pas de justification physique et correspond sans doute à un seuil de détection du capteur. Par contre, la classe centrée sur  $493 \mu\text{m}$  montre au contraire une augmentation du nombre de grains car par construction, tous les grains de taille supérieure sont comptabilisés dans cette classe.

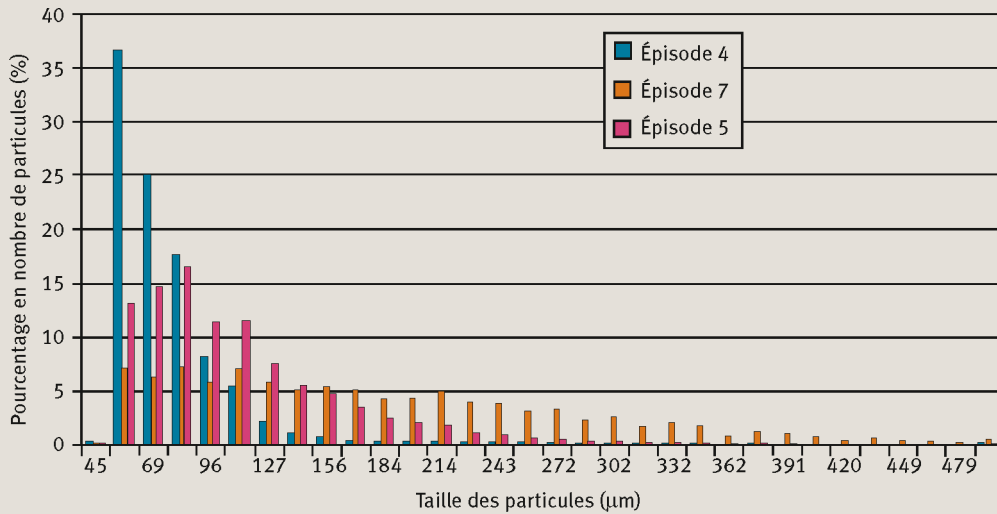
Dans l'estimation du flux, ce n'est pas uniquement le nombre de particules par classe, mais également leur volume qui est pris en compte, d'où l'intérêt de représenter pour les mêmes épisodes, la répartition du volume occupé par les particules dans chaque classe. Ceci permet de déterminer quelle classe a le plus de poids dans le calcul du flux (figure 8).

On constate ainsi que la mauvaise estimation de la classe centrée sur  $493 \mu\text{m}$  peut conduire à des sous-estimations du flux (si les particules comptabilisées sont plus grosses), et que ceci est sensible pour tous les types d'épisodes, mais plus particulièrement pour les épisodes avec chute de neige et reprise de particules par vents forts. La mauvaise détection des fines particules (centrées sur  $45 \mu\text{m}$ ) est moins problématique en termes d'estimation de flux, à l'exception des épisodes faiblement ventés où les fines particules sont présentes en nombre.

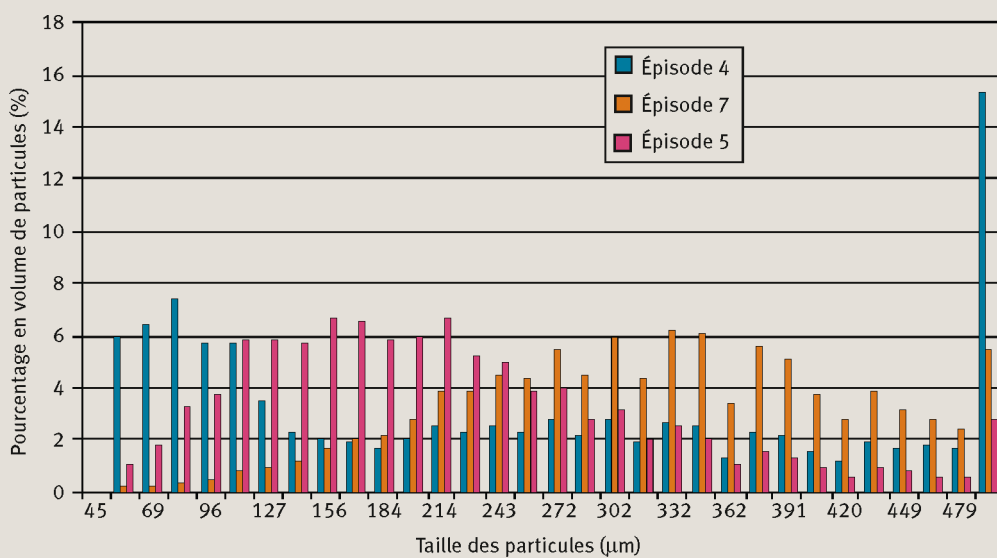
Lors de l'épisode du 27 janvier 2009 (figure 9), nous avons pu réaliser en parallèle des profils à l'aide de filets pour un épisode de reprise de particules de grains fins (répartition des grains analogues à l'épisode 5) et donc favorable au bon fonctionnement du SPC.

Malgré une certaine dispersion des résultats, l'ordre de grandeur est correct puisque la pente de la droite de régression linéaire est proche de 1.

**7 Répartition du nombre de grains dans le flux de neige transportée en fonction de leur taille**



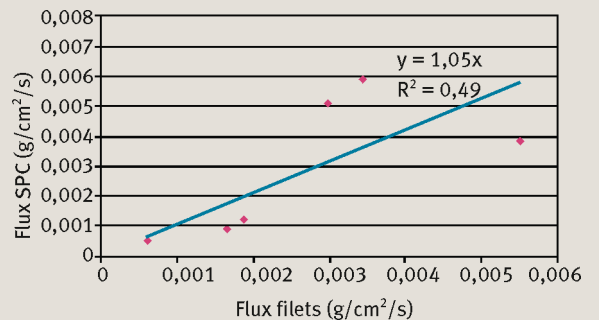
**8 Répartition du volume des grains dans le flux de neige transportée en fonction de leur taille**



**Perspective : une utilisation détournée  
des capteurs de temps présent**

Les capteurs de temps présent sont des capteurs multi-variables pour la mesure automatique de la visibilité et l'observation du temps présent. La connaissance du temps présent suppose la détection des phénomènes dus aux hydrométéores\* qui peuvent être les obscurcissements provoqués par les fumées, brumes ou brouillard (déterminés par l'évaluation de la visibilité – fonction diffusomètre\*) et les précipitations, bruine, pluie, neiges, grésil, grêle ou mélange déterminées par la taille et la vitesse des particules (fonction disdromètre). Certains de ces capteurs permettent donc d'estimer la vitesse et le flux verticaux de la neige. On peut donc supposer que, disposés à 90° par rapport à leur position traditionnelle, ils permettront d'estimer la vitesse et le flux horizontaux de la neige.

**9 Comparaison des flux mesurés par le SPC et à l'aide d'un filet pour l'épisode du 27 janvier 2009 (hauteur des capteurs : 10 cm au-dessus du sol)**

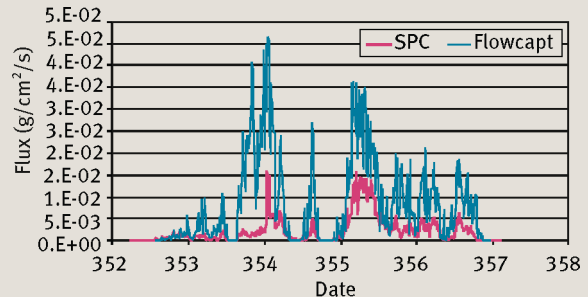




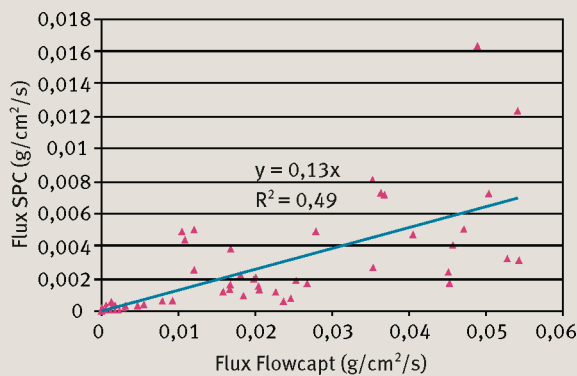
## 5 COMPARAISON ENTRE LES DONNÉES ISSUES DU FLOWCAPT, DU SPC ET L'APPROCHE THÉORIQUE (équation 2)

Si l'on compare les signaux délivrés par le SPC et le Flowcapt (figure 10), on s'aperçoit qu'ils détectent de façon identique l'occurrence du transport de neige. Par contre, en terme, d'intensité et comme précédemment observé, le Flowcapt (sans modification de l'étalonnage proposé par le constructeur) indique des flux plus importants. Ainsi, pour la journée du 27 janvier 2009, où les grains transportés sont des grains fins, on constate qu'il y a un facteur 8 entre les valeurs délivrées par le SPC et celles, bien supérieures, que fournit le Flowcapt (figure 11). Si l'on applique la correction (équation 6) précédemment proposée (figure 12), on constate une amélioration puisque ce facteur passe de 8 à 3,5 avec cependant une dispersion plus importante des résultats.

### 10 Comparaison des flux mesurés par le SPC et le segment du Flowcapt correspondant

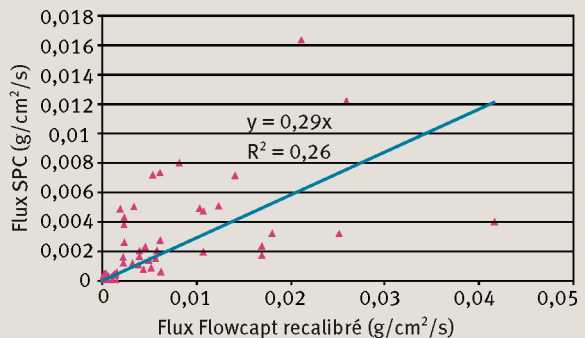


### 11 Comparaison des flux mesurés par le SPC et le segment du Flowcapt (valeur délivrée par le capteur) correspondant pour la journée du 27 janvier 2009



### 12 Comparaison des flux mesurés par le SPC et le segment du Flowcapt (après recalibration utilisant la formule 8) pour la journée du 27 janvier 2009.

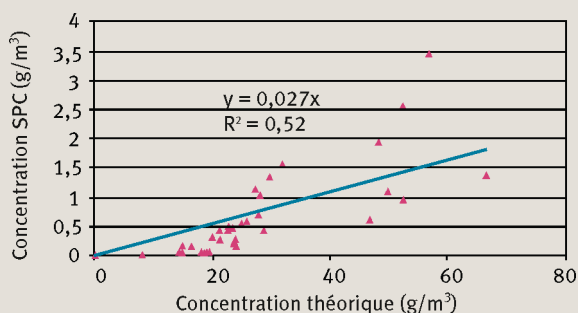
La vitesse de frottement et la rugosité sont déterminées d'après le mât de mesures muni de 6 anémomètres.



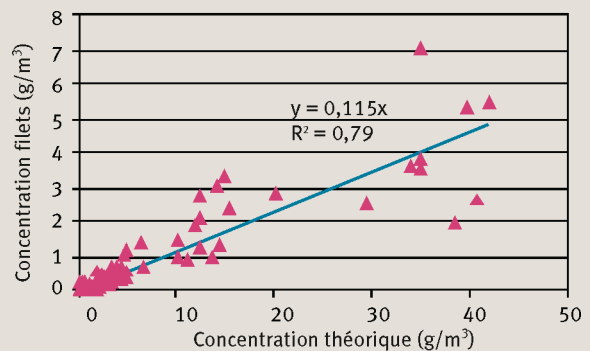
À partir de l'équation 2, les épisodes des 4-5 mars 2008 et du 27 février 2009 ont été simulés. Dans les deux cas les valeurs de  $\sigma_s U_F$  ont été déterminées à partir de la relation empirique reliant  $\sigma_s U_F$  à la vitesse de frottement (obtenue sur le site du Col du Lac Blanc à partir de mesures issues des filets à papillon), sachant que la vitesse de frottement est mesurée à partir de six anémomètres à coupelles et d'un capteur de hauteur de neige positionnés sur une tour de 10 m de haut (Naaïm-Bouvet *et al.*, 2009).

On peut ainsi constater que la formulation empirique de la couche de saltation couplée à une approche théorique pour la couche de diffusion turbulente conduit à une surestimation de la concentration en particules sur le site du Col du Lac Blanc pour les épisodes de transport de neige par le vent considérés (figures 13 et 14). Ceci n'a rien d'étonnant car les formulations ont été obtenues pour une couche saturée en particules à une vitesse de frottement donnée. Si pour le sable, la distance nécessaire à l'obtention de la saturation n'est que de quelques mètres, pour la neige où la cohésion est variable, la distance nécessaire à l'obtention de la saturation peut être de 150 à 300 m (Takeuchi, 1980). De telles conditions sont rarement rencontrées dans les Alpes et la concentration simulée doit être considérée comme une valeur maximale, d'où l'intérêt de disposer de capteurs fiables !

### 13 Concentration en particules obtenue à partir du SPC le 27 janvier 2009 en fonction de la concentration théorique déterminée pour les mêmes conditions à partir de l'équation 2



### 14 Concentration en particules obtenue à partir des filets à papillons les 4 et 5 mars 2008 en fonction de la concentration théorique déterminée pour les mêmes conditions à partir de l'équation 2



Pour tester cette configuration, nous avons choisi le PWS100 de Campbell car c'est actuellement, sur le marché, celui qui permet d'identifier les particules les plus petites, à savoir 100  $\mu\text{m}$  (avec 34 tailles de particules allant de 0 à 25  $\mu\text{m}$  avec une résolution de 0,1  $\mu\text{m}$  pour les petites tailles), et ceci pour une gamme de vitesse de 0 à 25 m/s. Ce sont les ordres de grandeur rencontrés lors d'épisodes de transport de la neige par le vent. Ce travail a été mené en association avec le Laboratoire de glaciologie et de géophysique de l'environnement de Grenoble qui désirait installer ce type d'appareil en Antarctique pour calibrer des modèles de transport de neige par le vent.

Le principe de fonctionnement est le suivant : une lumière laser est émise pour former un volume de détection de 4 feuilles lumineuses espacées : la surface de détection est de 40  $\text{cm}^2$ . La visibilité (portée optique météorologique ou POM\*) est la distance limite de la vision humaine de jour correspondant à la distance à laquelle un faisceau lumineux est atténué par l'atmosphère à 5% de son intensité d'origine. Dans le cas des diffusomètres, la mesure de la visibilité est basée sur le principe de la diffusion latérale avant. Les récepteurs situés à 20° dans les plans verticaux et horizontaux mesurent cette lumière diffusée, qui est proportionnelle à la densité des particules en suspension et inversement proportionnelle à la visibilité. Les performances des capteurs en terme de visibilité sont souvent établies par comparaison avec l'observation humaine jugée comme indiscutable. La vitesse des particules est mesurée directement en fonction du temps entre chaque dispersion de lumière lorsque la particule tombe entre chaque feuille (figure 15). La forme du signal reçu permet également de déterminer la taille des particules. L'utilisation conjointe de capteurs de température et d'humidité et d'algorithmes logiques permet de déterminer le type de particules.

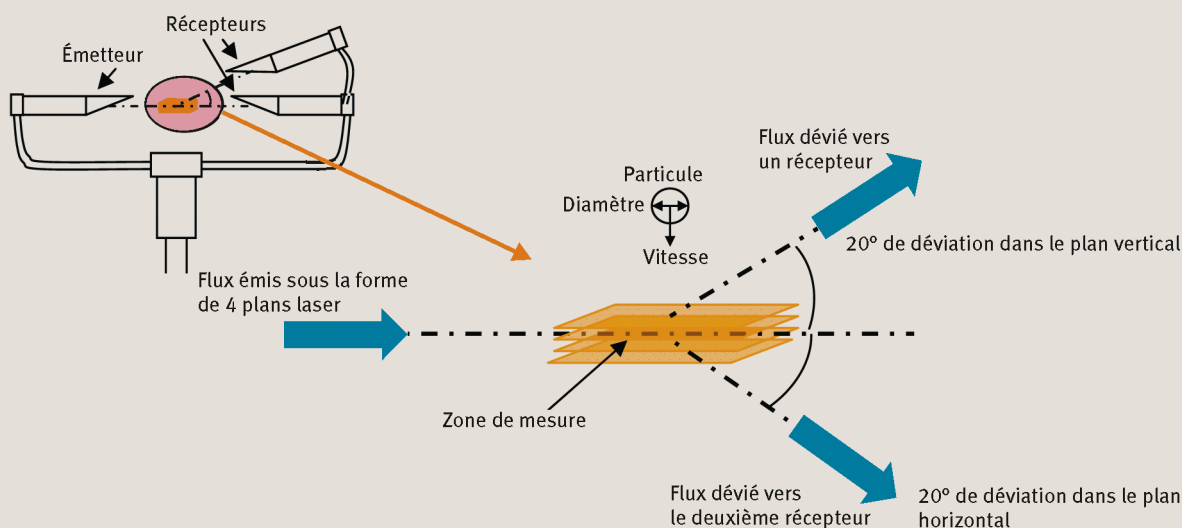


11 Capteur PWS100 de droite en position normale d'utilisation pour mesurer les flux verticaux. Capteur de gauche dédié à la mesure des flux horizontaux venant du nord.

Nous avons donc testé deux capteurs sur le site du Col du Lac Blanc, le premier dans une position conventionnelle, les plans laser parallèles au sol pour une détection des flux verticaux et le second avec les plans laser perpendiculaires au sol pour une détection des flux horizontaux (photo 11). Il n'y a pu avoir comparaison avec le SPC, ce dernier ne fonctionnant pas sur la courte période d'installation du PWS100. Les premiers résultats sont présentés sur la figure 16.

On ne note pas de différences notables de réponse entre les deux capteurs PWS100 en termes de visibilité, mais il est difficile de relier visibilité et épisode de transport pour cet épisode, car du brouillard était observé de façon concomitante (surveillance vidéo). Par ailleurs, de l'avis du constructeur, la plupart des diffusomètres ont un angle de 42° entre la source et le détecteur (à cet angle, la diffusion est peu sensible au type de particules), ce

### 15 Principe de mesures du PW 100



qui n'est pas le cas du PWS100, et des calibrations complémentaires ont été nécessaires (une pour les gouttes d'eau et une autre pour tous les autres hydrométéores). Cependant, des calibrations spécifiques devraient être faites pour la neige. Concernant la détermination des flux de neige (indiqués en équivalent eau mm/heure) les réponses entre les deux capteurs PWS100 varient de façon significative. S'agissant de périodes de transport de neige, on observe uniquement des flux horizontaux dont l'occurrence correspond à celles observées sur le Flowcapt à l'exception du troisième épisode. La limite inférieure de détection de  $100 \mu\text{m}$  semble s'avérer problématique et pourrait expliquer la différence de réponse sur le dernier épisode. Par contre, des particules supérieures à  $500 \mu\text{m}$  (ce qui correspond à la limite supérieure d'observation du SPC) ont pu être observées. Un des atouts des capteurs de temps présents est la détermination des vitesses de particules. Si la détermination de ces vitesses ne présente pas directement d'intérêt du point de vue de l'ingénierie (c'est la valeur du flux ou de la visibilité qui compte dans ce cas), elle est par contre importante du point de vue théorique car c'est une donnée d'entrée des modèles.

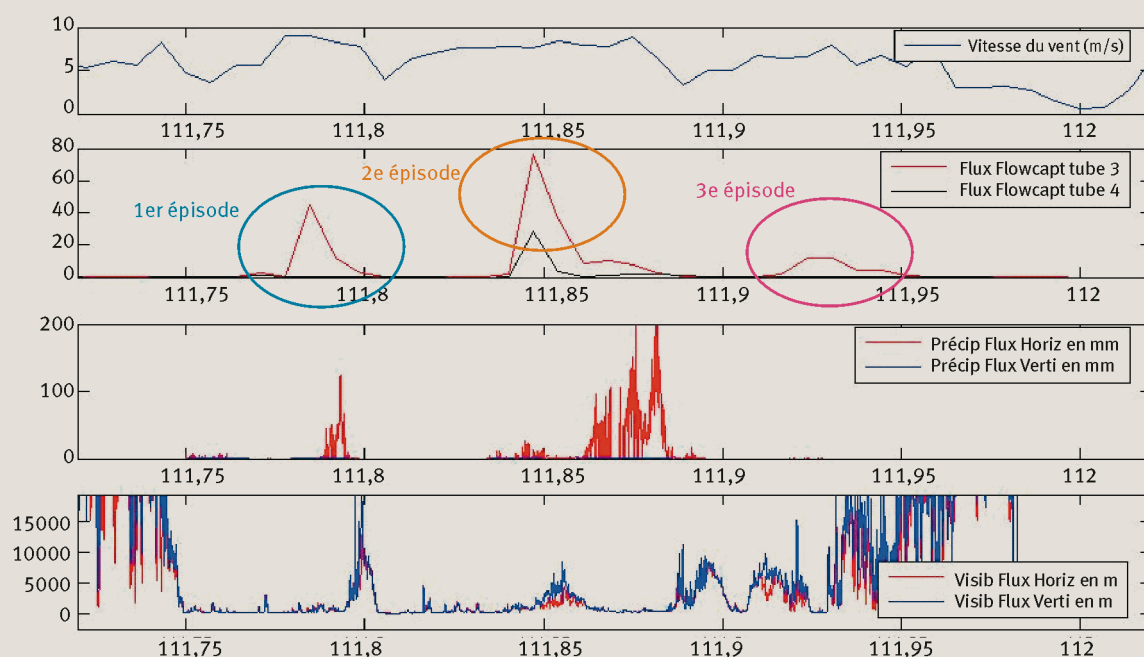
Cependant, les optiques doivent être protégées des salissures qui sont source d'erreurs de mesures, d'où les capots les recouvrant. Or, l'installation dans une configuration pour laquelle les capteurs n'ont pas été conçus peut conduire à des perturbations : dans notre cas, il s'agira des vents du sud où les particules vont avoir tendance à rentrer dans les capots. Par ailleurs, il est vraisemblable que les algorithmes logiques permettant de déterminer le type de particules n'ont pas été conçus pour reconnaître comme particules de neige des hydro-

météores avec forte vitesse, et une réflexion devra être menée pour déterminer quelles en sont les conséquences en termes de mesures.

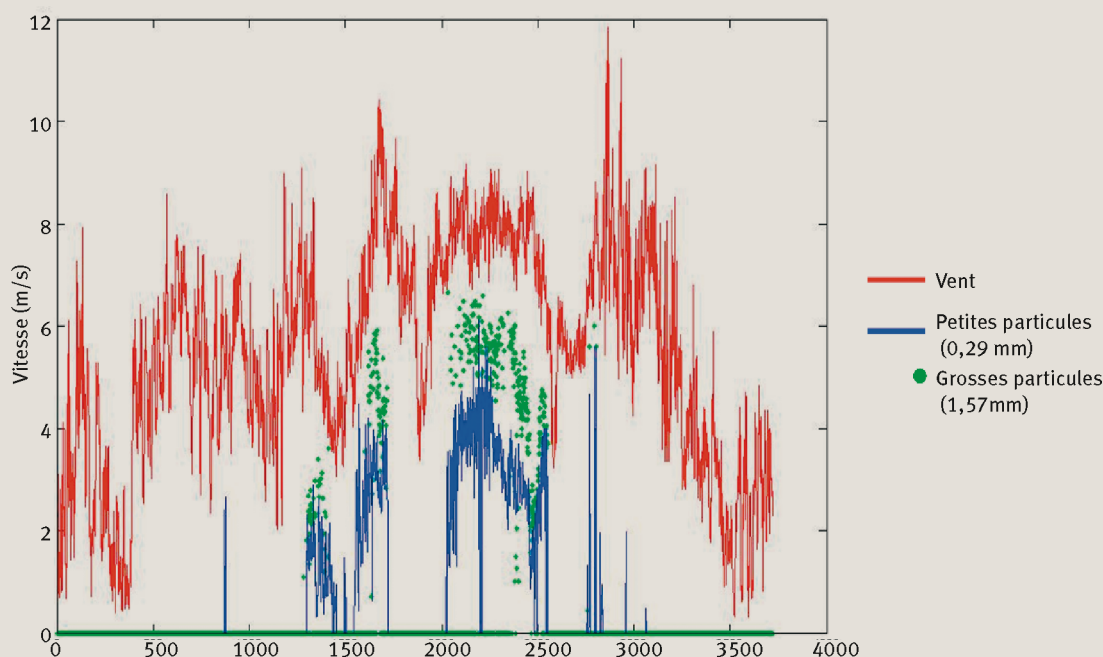
## Conclusions

Les capteurs acoustiques s'avèrent d'excellents détecteurs d'occurrence de transport indifférents à direction du vent et aux variations de hauteurs de neige à condition d'être installés dans une position verticale (pour laquelle ils ont d'ailleurs été conçus). Par contre, la détermination des flux de neige transportée, très sensible à la vitesse des particules, est encore trop imprécise malgré la courbe de calibration proposée et il serait plus judicieux de définir des index de transport (faible, moyen, fort, très fort, par exemple). Ces index peuvent être suffisants pour des opérationnels d'autant plus que les capteurs s'avèrent particulièrement robustes. Les capteurs optiques tels le SPC sont parfaitement adaptés à la détermination des quantités de neige transportée, et ce d'autant plus qu'ils s'orientent dans le sens du vent. Il est possible par contre qu'ils conduisent à des sous-estimations de flux lors d'épisodes de transport avec chute de neige, car leur gamme de mesures est limitée à  $500 \mu\text{m}$ . Comparés aux capteurs acoustiques, leur zone de mesures est faible et ces dernières peuvent être biaisées par des effets locaux. Par ailleurs, ils seront également beaucoup plus sensibles aux variations de hauteur du manteau neigeux. Les tests concernant le PWS100 ne sont pour le moment que préliminaires et les flux indiqués en mm/heure n'ont pas encore été reliés à des  $\text{g}/\text{m}^2/\text{s}$  ou comparés à des capteurs mécaniques ou au SPC. Sa surface de détection est

### 16 Enregistrement du 22 avril 2009



## 17 Vitesse du vent et des particules (l'anémomètre se trouve 2,4 m au-dessus du PWS100)



supérieure à celle du SPC, mais il n'y a pas de possibilité d'orientation dans le sens du vent. Sa gamme de mesures est complémentaire avec une zone de recouvrement située entre 100 et 500  $\mu\text{m}$ . Néanmoins, l'étendue de chaque classe (100  $\mu\text{m}$  pour le PWS100 et 15  $\mu\text{m}$  pour le SPC) rendra quoiqu'il en soit plus précises les mesures du SPC. Les mesures de visibilité issues du PWS100 pendant les périodes de transport ne doivent, pour le moment, être considérées comme correctes tant que des campagnes de mesures avec observateurs humains ne viendront les valider. Ces capteurs permettent de mesurer les vitesses des particules (figure 17), ce qui est d'un grand intérêt d'un point de vue théorique car ces paramètres interviennent et font l'objet d'hypothèses dans les différents modélisations numériques proposées. Des campagnes de mesures complémentaires s'avèrent certes nécessaires, mais il est clair qu'il n'existe donc pas de capteur de transport universel : à chacun d'orienter ses choix en fonction de ces besoins. ■

## Les auteurs

## Hervé Bellot

Cemagref, centre de Grenoble, UR ETGR,  
Érosion torrentielle, neige et avalanches,  
2 rue de la Papeterie, BP 76, 38402 Saint Martin d'Hères Cedex  
herve.bellot@cemagref.fr

## Florence Naaim-Bouvet

Cemagref, centre de Grenoble, UR ETGR,  
Érosion torrentielle, neige et avalanches,  
2 rue de la Papeterie, BP 76, 38402 Saint Martin d'Hères Cedex  
florence.naaim@cemagref.fr

## Remerciements

Les auteurs remercient Rémi Beguin, Robert Bolognesi, François-Xavier Cierco, Christophe Genthon, Eva Holzhauser, Jean-Luc Michaux, Mohamed Naaim, Frédéric Ousset, Fabien Perault, Xavier Ravanat, Martine Roussel, pour leur participation à l'élaboration et à la réalisation des différentes expérimentations et Robert Bolognesi pour sa relecture attentive.

## QUELQUES RÉFÉRENCES CLÉS...

- BOLOGNESI, R., NAAIM-BOUVET F., OUSSET F., DAULTIER J-M., 1995, Une évaluation quantitative du snowdrift pour la prévision locale des avalanches, *Neige et Avalanche*, n° 69, p. 3-7.
- CHRITIN, V., BOLOGNESI, R., GUBLER, H., 1999, Flowcapt: a new acoustic sensor to measure snowdrift and wind velocity for avalanche forecasting, *Cold Regions Science and Technology*, n° 30, p. 125-133.
- CIERCO, F.-X., NAAIM-BOUVET, F., BELLOT, H., 2007, Acoustic sensors for snowdrift measurements: How should they be used for research purposes?, *Cold Regions Science and Technology*, vol. 49, p. 74-89.
- LEHNING, M., NAAIM-BOUVET, F., NAAIM M., BRABEC, B., DOORSCHOT, J., DURAND, Y., GUYOMARC'H, G., MICHAUX, J.-L., ZIMMERLI, M., 2002, Snowdrift: acoustic sensors for avalanche warning and research, *Natural Hazards and earth System science*, n° 2, p. 121-128.
- SATO, T., KIMURA, T., 1993, Field test of a new Snow-particles-Counter (SPC) system, *Annals of Glaciology*, n° 18, p. 149-154.

► Consulter l'ensemble des références  
sur le site de la revue [www.set-revue.fr](http://www.set-revue.fr)