

Pôle Grenoblois d'Etudes et de Recherche pour la Prévention des Risques Naturels

Programme de recherche 2006



Etude comparée de la mesure granulométrique et volumétrique des précipitations

Rapport de synthèse

Brice Boudevillain¹

Anthony Armetta¹, Alexis Berne¹, Paul Carrier², Benoit Chapon¹, Gilles Molinié¹, Emmanuel Paquet²
et Aurélien Quiquet¹

¹Laboratoire d'étude des Transferts en Hydrologie et Environnement (LTHE)

²Direction Technique Générale d'Electricité de France (DTG/EDF)

Table des matières

1. Motivations.....	3
2. Etat de l'art	4
3. Présentation des appareils étudiés	5
3.1. Disdromètres optiques (OTT Parsivel et Thies Clima).....	5
3.2. Disdromètre mécanique (Vaisala WXT510).....	7
Sonde WINDCAP	8
Sonde RAINCAP	9
3.3. Radar Doppler Lufft	10
3.4. Pluviomètre de référence : PG2000 (extrait de la note technique de la DTG/EDF)	11
4. Campagne de mesure	12
5. Analyse statistique des observations	13
5.1. Comparaison des cumuls de pluie observés par l'ensemble des instruments	13
5.2. Comparaison des intensités de précipitations mesurées par le disdromètre Parsivel, le radar Lufft et le pluviomètre de référence PG2000 sur l'ensemble des deux années	14
Choix de la résolution temporelle	14
Etude des probabilités de dépassement quelle que soit l'intensité des précipitations.....	15
Même étude restreinte aux intensités détectées par le pluviomètre de référence.....	16
Distinction entre périodes estivales et hivernales.....	17
Etude de corrélation	18
Matrice de contingence	19
5.3. Etudes de cas	19
5.4. Synthèse des résultats.....	22
6. Conclusion.....	22
7. Bibliographie	23
Annexe 1 : Caractéristiques techniques des appareils étudiés	25
Le disdromètre Parsivel.....	25
Le disdromètre Thies Clima	25
Le disdromètre mécanique : Vaisala WXT510	25
Le radar Doppler Lufft	26
Annexe 2 : Valeurs de cumul (mm), moyenne et de dispersion des intensités (mm/min) mesurées par le pluviomètre PG2000, disdromètre Parsivel et radar Lufft	27
Annexe 3 : scores des matrices de contingence entre le disdromètre Parsivel et le pluviomètre PG2000.....	27

Photo de couverture : Vue générale du site du parc instrumental au cours de l'été 2006

1. Motivations

Le département de l'Isère connaît régulièrement des épisodes de pluies intenses parfois génératrices de crues occasionnant des dégâts importants. Parmi les événements les plus récents, on pourra citer les pluies torrentielles très localisées sur le massif Belledonne qui ont provoqué la crue des ruisseaux de Vorz, de la Combe de Lancey et du Domeynon inondant les communes de Villard-Bonnot et Domène les 22-23 août 2005. Plus récemment encore, les trois épisodes pluvieux des 3, 4 et 6 septembre 2008 ont causé de nombreux dégâts en Isère Rhodanienne et les communes de la Drôme toutes proches.

De manière plus générale, l'estimation quantitative des précipitations sur les bassins versants d'intérêt est indispensable pour :

- la gestion de la ressource en eau en zone montagneuse ;
- la prévision et la gestion des situations de crise ;
- les analyses *a posteriori* des crues, dans le cadre de travaux de recherche.

Les précipitations étant des phénomènes fortement variables à la fois dans l'espace et dans le temps, il est essentiel que la résolution spatiale et temporelle des réseaux de mesures des précipitations soit adaptée aux échelles de cette variabilité. Or, il est souvent difficile de faire un bilan pluviométrique précis à cause du manque de mesures avec une résolution en cohérence avec la variabilité spatiale et temporelle de l'évènement pluvieux.

Les différents réseaux de mesure de la pluie reposent généralement sur des pluviomètres à systèmes partiellement mécaniques (type augets basculeurs) qui présentent des fragilités, qui sont relativement encombrants et parfois consommateurs d'énergie (chauffage pour faire fondre la neige tombée dans le pluviomètre). Leur mise en œuvre nécessite donc une infrastructure à proximité. Une maintenance hebdomadaire doit être effectuée pour prévenir des obturations par des feuilles ou des poussières. De plus, ces appareils mesurent des quantités d'eau recueillies avec des résolutions temporelles qui sont rarement inférieures à l'heure en mode opérationnel (la véritable limitation est liée à la section du pluviomètre et à la capacité des augets).

Le radar météorologique peut apporter une information complémentaire. Le principal avantage de cet instrument est d'offrir une mesure spatialisée de la pluie avec une résolution temporelle fine. Le principal inconvénient tient au caractère indirect de la mesure de la pluie. Le département de l'Isère, montagneux, est assez mal couvert par le réseau radar actuel.

Depuis plusieurs années, des capteurs de précipitations sont apparus, alliant petite taille, faible consommation d'énergie électrique et performances accrues quant aux nombres de paramètres mesurés. Ces appareils mesurent la granulométrie de la pluie (i.e. les tailles des gouttes) et déduisent son cumul avec une fine résolution temporelle (typiquement de l'ordre de la dizaine de secondes). Ces nouveaux instruments présentent un grand intérêt à la fois pour l'étude et pour la surveillance des précipitations. Cependant, leur relative nouveauté ne permet pas à la communauté scientifique d'avoir le recul nécessaire sur la qualité de leur mesure pour décider de leur implantation sur des sites opérationnels, ou de leur utilisation dans le contexte de campagnes scientifiques.

Dans ce contexte, nous avons entrepris de réaliser au cours de l'été 2006, une étude comparée d'appareils de mesure de la pluie. L'objectif est d'identifier, parmi les nouveaux capteurs disponibles sur le marché, ceux qui pourraient présenter une alternative au pluviomètre mécanique dans les régions montagneuses où son déploiement est difficile. La campagne de mesure mise en œuvre s'est déroulée sur le site expérimental (à 1326 m d'altitude) à proximité du col de Porte appartenant au Centre d'Etude de la Neige (Météo-France, Grenoble) co-exploité avec EDF-DTG. Les appareils mis en œuvre, six au total, sont décrits dans la partie 3 de ce rapport. Cinq ont été achetés ou redéployés par EDF-DTG et un a été redéployé par le LTHE au cours de la campagne de mesure présentée dans la partie 4. La partie 5 détaille l'analyse statistique des observations et se termine par une synthèse des résultats.

2. Etat de l'art

Le premier travail réalisé dans le cadre de ce projet était bibliographique. Les parties (« Etat de l'art » et « Présentation des appareils étudiés ») de ce rapport s'appuient sur le rapport de stage d'Anthony Armetta (Armetta, 2006) financé par ce projet.

Le principe de mesure des diamètres et vitesses à l'aide d'un capteur optique fut introduit par Picca et Trouilhet (1964). Un premier spectropluviomètre fut développé en 1969 par Donnadiou et al. (1969) qui participa aux améliorations successives de ces instruments (1974, 1978, 1980) et à de nombreuses études comparant leurs mesures brutes à celles d'autres disdromètres comme celui mécanique à impact de Joss et Waldvogel (1967), le disdromètre «paired –pulsed» (Illingworth and Steven, 1987) ou le disdromètre vidéo 2D (2DVD, Schönhuber et al., 1997 ; Kruger and Krajewski, 2002) dont les principes de fonctionnement diffèrent des disdromètres optiques.

Dans la suite de cette courte partie bibliographique, nous nous focaliserons uniquement sur les études d'intercomparaison. Le lecteur souhaitant en apprendre plus sur les appareils étudiés et les sources des erreurs de mesure se reportera au rapport d'Antony Armetta.

Des études passées ont comparé les cumuls de pluie obtenus par tel ou tel disdromètre avec ceux obtenus par des pluviomètres. Par exemple, Salles et Creutin (1998) ont montré, entre autres, que leur spectropluviomètre optique sous-estimait la pluie d'environ 16% tandis que Do-Khac et al. (2004) ont trouvé que le disdromètre Thiès Clima surestimait de 40% les cumuls de pluie et détectait parfois à tort la présence de pluie.

Plusieurs campagnes d'intercomparaison mettant en jeu plusieurs types de disdromètres et pluviomètres ont également été menées dans le passé (Tokay et al., 2004 ; Miriovsky et al., 2004 ; Krajewski et al., 2006). L'exercice est délicat : En effet, les instruments n'ont pas souvent les mêmes volumes d'échantillonnage et les mêmes gammes de mesures. Par ailleurs, la pluie peut présenter une forte variabilité spatiale et cela peut être limitant si les instruments comparés ne sont pas suffisamment proches les uns des autres (Miriovsky et al., 2004). Même en comparant plusieurs pluviomètres et disdromètres dans une surface de moins de 100 m², des différences importantes en terme de cumul de pluie sont observées, notamment lors d'événements intenses (Krajewski et al., 2006). Enfin Tokay et al. (2004) mais aussi Krajewski et al. (2006) expliquent que les produits sont en perpétuelle amélioration : Les constructeurs, attentifs aux études d'intercomparaison menées, proposent des corrections aux défauts relevés lors de ces études. Les intercomparaisons sont donc à renouveler.

L'originalité de notre étude, rappelons-le, tient particulièrement au fait qu'elle se déroule dans un contexte de moyenne montagne.

3. Présentation des appareils étudiés

Les appareils de mesure que nous avons étudiés sont les suivants (photo en couverture) :

- trois spectro-pluviomètres (ou « disdromètres », mesure de la distribution en taille des gouttes) optiques dont :
 - deux Parsivel (Particle Size velocity) de la société OTT ;
 - un de la société Thies Clima ;
- une station météo type WXT510 de la société Vaïssala;
- un radar Doppler de la société Lufft ;
- un pluviomètre type PG2000 (surface de captation 2000 cm²), conçu et utilisé comme référence pour la mesure des intensités de pluies par EDF; c'est aussi le cas pour cette étude.

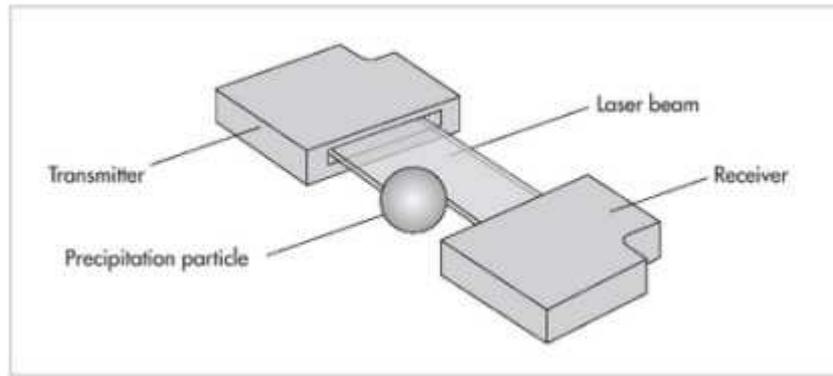
Dans la suite, nous présentons le principe de fonctionnement de chaque appareil. Nous renvoyons le lecteur à l'annexe 1 pour les caractéristiques techniques. On classera les appareils en 3 catégories selon leur principe de mesure : (1) mesure basée sur la perturbation d'une onde électromagnétique dans le domaine optique (disdromètres optiques Parsivel et Thies Clima), mesure basée sur une interaction mécanique entre la pluie et le capteur (disdromètre mécanique Vaïssala type WXT510) et enfin (3) le radar Doppler (perturbation d'une onde électromagnétique dans le domaine des hyperfréquences, radar Doppler Lufft).

3.1. Disdromètres optiques (OTT Parsivel et Thies Clima)

L'interaction entre les hydrométéores et le faisceau optique permet d'estimer leur vitesse et leur diamètre. Un traitement logiciel de ces paramètres est inclus dans les appareils pour fournir d'autres paramètres tel que le cumul, l'intensité et ou la réflectivité radar. Ces derniers paramètres dépendent de la taille et/ou de la vitesse de chute des hydrométéores intégrés sur toute la gamme de diamètre de gouttes aussi appelée spectre. On les qualifie de paramètres intégrés.

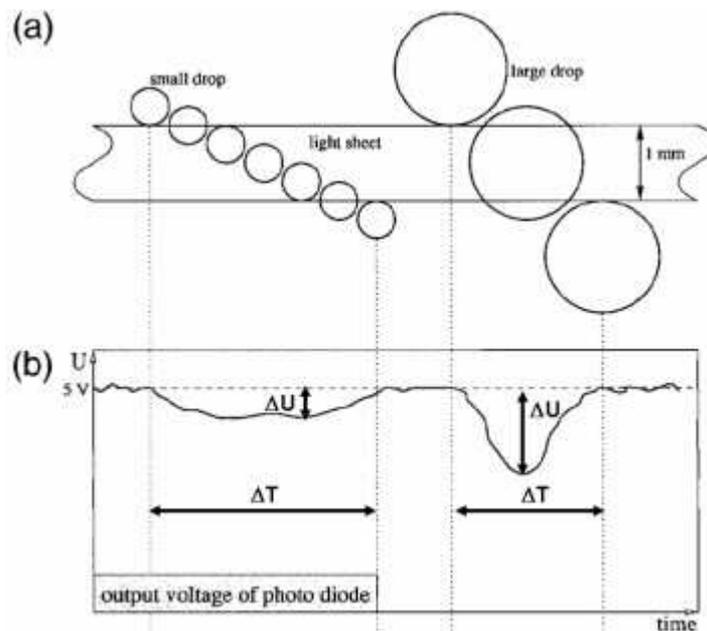


Disdromètres optiques OTT Parsivel et Thies Clima



Principe de fonctionnement des disdromètres optiques

Ces capteurs optiques de précipitation émettent un faisceau laser horizontal entre un émetteur et un récepteur (photo diode) dans le domaine proche-infrarouge (785 nm). En l'absence de particules, le récepteur reçoit un signal de 5V. Les hydrométéores interceptant le laser, atténuent la tension du signal reçu par le récepteur de ΔU pendant un temps ΔT . L'atténuation ΔU dépend de la fraction du faisceau lumineux intercepté, et la durée d'interception, de la vitesse de chute des hydrométéores (Löffler-Mang and Joss, 2000)

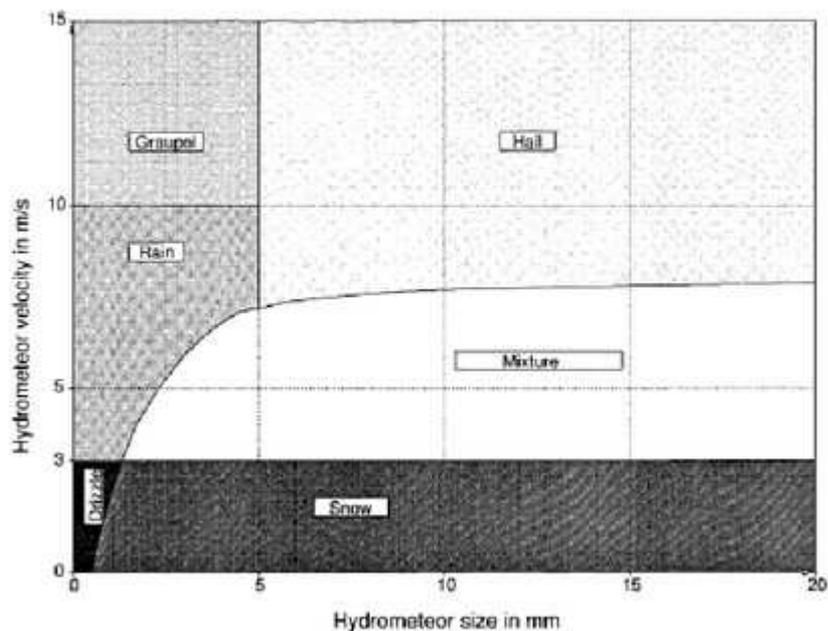


Atténuation du signal électrique lors de la traversée du faisceau laser par les gouttes. a : particules traversant le faisceau laser ; b : signal détecté par le récepteur. ΔU représente l'atténuation maximum de la tension, et ΔT le temps de traversée de la goutte.

Des logiciels de traitement du signal sont mis en œuvre de manière à attribuer des valeurs de ΔU et ΔT aux signaux mesurés. L'étalonnage permet d'obtenir des relations empiriques entre les paramètres mesurés (ΔU et ΔT) et les paramètres caractéristiques des hydrométéores (diamètre équivalent et vitesse de chute). La vitesse de chute des hydrométéores est une fonction complexe qui dépend entre autres de leur taille et de leur masse volumique. Dans le cas des gouttes d'eau liquide, la masse volumique est connue (1000 kg/m^3) et constante. On

peut modéliser de manière satisfaisante la relation vitesse de chute-taille des gouttes par une fonction analytique de type loi puissance ($v=aD^b$ où v est le module de la vitesse de chute, D , le diamètre et a et b des paramètres). Mais, pour les autres types de particules (neige, neige roulée, grésil, ...), cette relation est très dépendante des processus microphysiques qui aboutissent à leur formation. Par exemple, la neige résulte de l'agrégation de petits cristaux de glace. Suivant les conditions de température et de pression dans lesquelles se sont constitués les flocons de neige, leur masse volumique peut varier de 10 à 80 % de celle de l'eau liquide. C'est donc bien la masse volumique qui est le paramètre clé des relations taille-vitesse des hydrométéores. Des gammes de couples taille-vitesse d'hydrométéores ont été constituées par l'OMM (Organisation Mondiale de la Météorologie) auxquelles l'on a attribué des noms de types d'hydrométéores (code SYNOP des hydrométéores). Chaque type d'hydrométéore rend ainsi compte d'une variété de processus microphysiques.

Suivant le type de matériel d'acquisition des données connecté au disdromètre optique (PC ou station d'acquisition) et/ou le paramétrage de l'instrument en usine, il est possible d'accéder aux spectres de tailles et de vitesses de chutes des hydrométéores. Sinon par défaut dans les versions commerciales, c'est souvent un type prédéfini d'hydrométéores qui est donné (type moyen sur le pas de temps d'acquisition).



Classification des types d'hydrométéore suivant leur taille et vitesse de chute (Löffler-Mang, 2000)

3.2. Disdromètre mécanique (Vaisala WXT510)

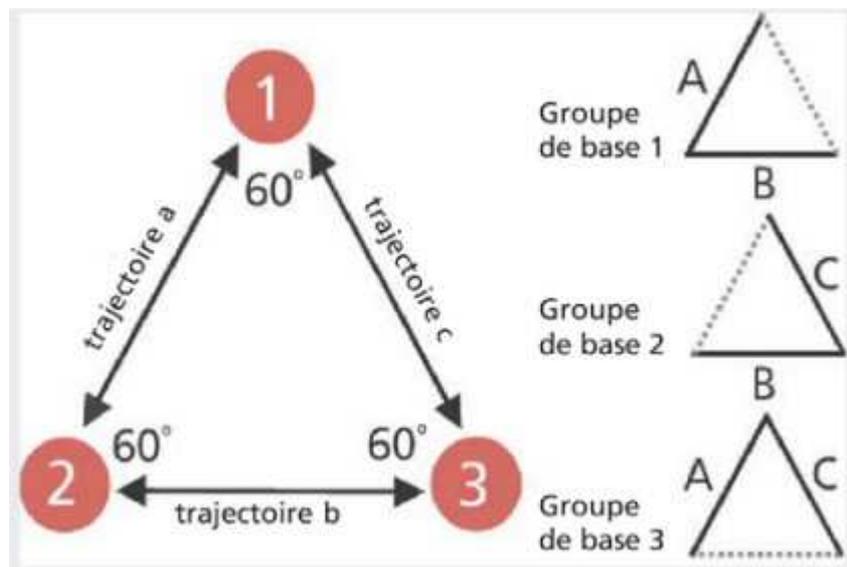
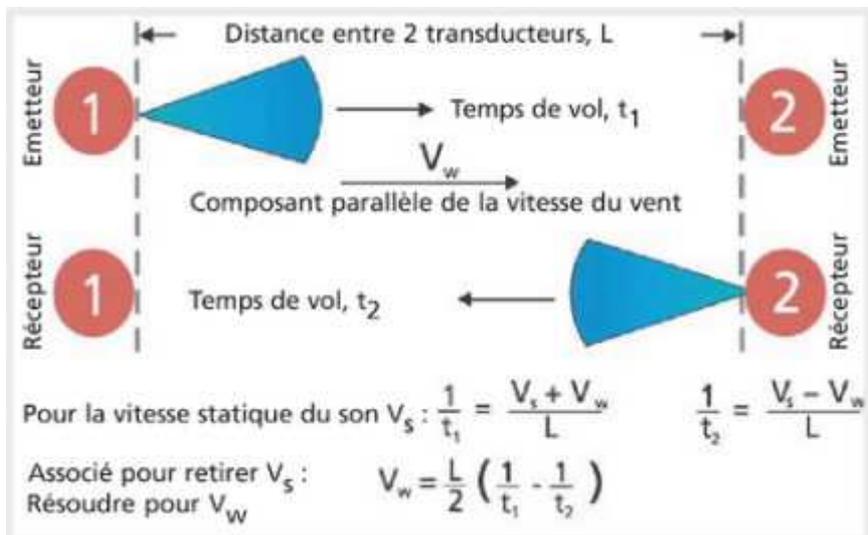
Le disdromètre mécanique fait partie intégrante d'une station de mesure météorologique (Vaisala WXT510). Cette station météorologique inclue trois capteurs : un capteur de pression, température et humidité (PTU), un disdromètre mécanique (RAINCAP) et un capteur de vent (WINDCAP) (voir photo ci-dessous).



Sonde Vaisala WXT510 incluant le disdromètre mécanique RAINCAP

Sonde WINDCAP

Elle est composée de 3 capteurs soniques à la fois émetteurs et récepteurs formant un triangle équilatéral. Le principe de fonctionnement de cette sonde est schématisé sur la figure ci-dessous.

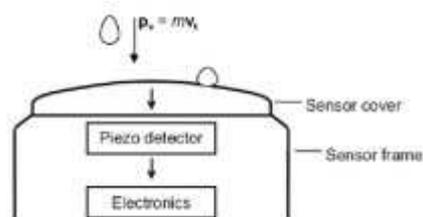


Principe de fonctionnement de la sonde WINDCAP

La vitesse du son résulte d'une part de la vitesse de déplacement de proche en proche des particules d'air par interaction mécanique (vitesse statique) et d'autre part d'une composante liée à la vitesse de l'air. Les mesures des temps de propagation aller-retour entre tous les couples de capteurs permettent de calculer les composantes horizontales du vent.

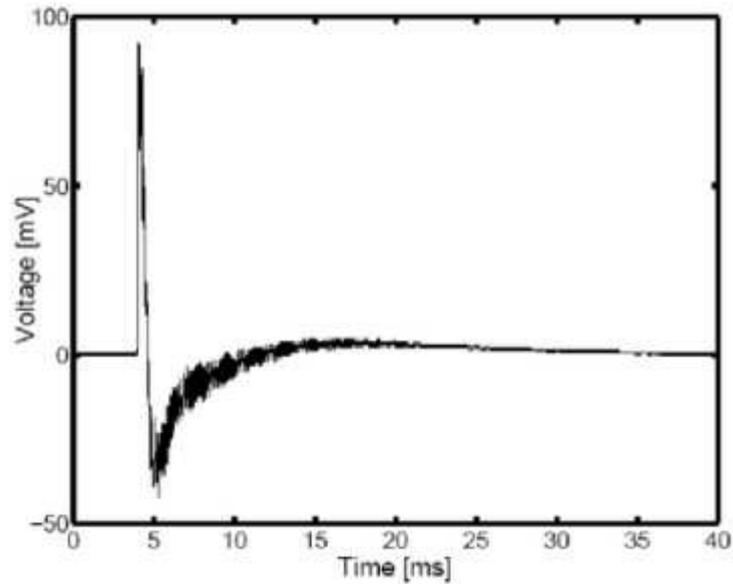
Sonde RAINCAP

Son fonctionnement repose sur la détection de l'énergie de l'impact des gouttes (ou quantité de mouvement) sur une membrane métallique. La figure ci-dessous tirée de Salmi (2005) illustre le principe de fonctionnement de la sonde RAINCAP. La goutte tombe sur la membrane avec une quantité de mouvement $p = mv$ où m est la masse de la goutte et v sa vitesse. La quantité de mouvement des gouttes a une composante horizontale et verticale. Pour obtenir la vitesse de chute des gouttes d'après la mesure de leur quantité de mouvement, il faut faire l'hypothèse que la composante horizontale de la quantité de mouvement (principalement due à la vitesse des gouttes induite par le vent) est négligeable par rapport à sa composante verticale (la forme convexe de la membrane permet une meilleure vérification de cette hypothèse). La vitesse verticale des gouttes résulte de la vitesse propre de chute des gouttes et de la vitesse de l'air. L'estimation de la vitesse de chute des gouttes nécessite une autre hypothèse qui consiste à négliger la vitesse de l'air par rapport à la vitesse propre des gouttes. Dans ce cas la quantité de mouvement transférée par les gouttes de pluies à la membrane du capteur peut être reliée à leur vitesse de chute propre et donc à leur taille. Cependant, comme on ne peut pas mesurer à la fois ces 2 paramètres (contrairement aux disdromètres optiques), on ne peut exploiter les mesures que dans le cas où les hydrométéores sont des gouttes de pluie, pour lesquelles on connaît la relation taille-vitesse.

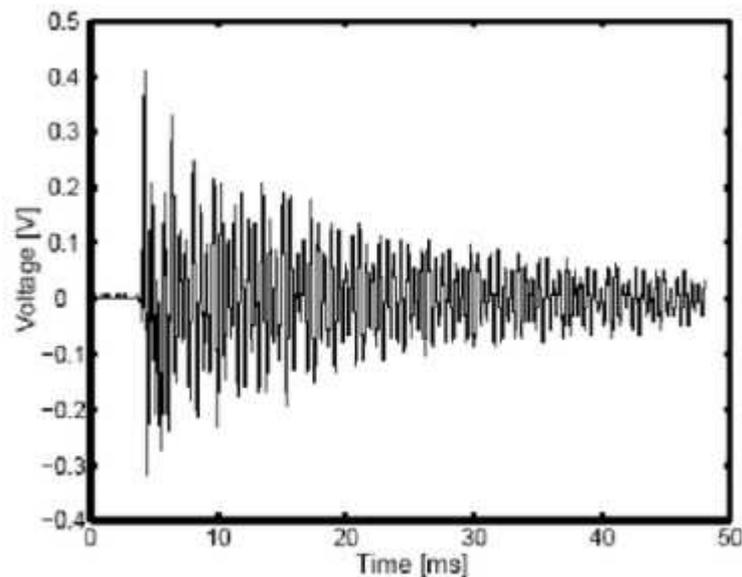


Principe de fonctionnement de la sonde RAINCAP

Le couvercle du RAINCAP est lié à un élément piézoélectrique. Ainsi, l'énergie mécanique de l'impact des gouttes est convertie en énergie électrique. L'énergie mécanique de la goutte influe à la fois sur l'intensité de l'impulsion électrique produite par l'élément piézoélectrique mais aussi sur sa durée (durée d'amortissement de l'oscillation de la membrane) (voir figure ci-dessus). L'information relative à l'impact de chaque goutte est traitée par un logiciel embarqué dans le RAINCAP de manière à ce que les paramètres de sortie de ce capteur ne concernent pas chaque impact mais l'ensemble des impacts sur une période donnée. Les paramètres de sortie sont donc des paramètres intégrés. Toutefois, l'un d'entre eux permet de distinguer la pluie des grêlons grâce à la différence notable entre les signaux produits par l'impact d'un grêlon et d'une goutte (voir figures ci-dessus).



Signal typique de l'impact d'une goutte de pluie sur le RAINCAP (Salmi, 2005)



Signal typique de l'impact d'un grêlon sur le RAINCAP (Salmi, 2005)

3.3. Radar Doppler Lufft

Ce radar fonctionne à la fréquence de 24 GHz. Dans la première phase de la mesure, le radar est en mode émetteur. Il émet une onde électromagnétique qui va interagir avec les hydrométéores. Dans la deuxième phase de la mesure, le radar est en mode récepteur. Durant cette phase, il détecte la partie du signal émis qui a été rétrodiffusée par les hydrométéores en mouvement contenus dans le volume sondé. Ce radar étant Doppler, il permet, en plus de la détection des gouttes, de mesurer leur vitesse dans l'axe de visée (ici verticale). La taille des

gouttes est déduite de la vitesse de chute. L'appareil fournit en sortie uniquement une estimation de la quantité de précipitation.



Radar Doppler Lufft

3.4. Pluviomètre de référence : PG2000 (extrait de la note technique de la DTG/EDF)

Le PG 2000 Inox se compose d'un entonnoir de surface de captation 2000 cm² situé en partie haute de l'appareil. Cet entonnoir est chauffé par l'intermédiaire de résistances souples et adhésives collées, ce qui permet la fusion de la neige. L'eau ainsi récoltée est recueillie par un appareil de mesure qui quantifie le volume d'eau capté. L'eau est ensuite évacuée vers le sol par un orifice situé dans la partie basse du pluviomètre.

L'accès aux équipements intérieurs (résistances chauffantes, sondes de température, transducteur, boîte de raccordement, ...) se fait par l'intermédiaire d'une porte coulissante. L'ensemble du pluviomètre est posé sur un pied support.

Pluviomètre fermé :



Pluviomètre ouvert :



Pluviomètre PG2000

4. Campagne de mesure

La campagne de mesure s'est déroulée sur le site expérimental du Centre d'Etude la Neige (voir la photo de couverture) co-exploité par Météo-France et EDF-DTG. Il présente plusieurs avantages pour le type de campagne que nous souhaitions mener :

- il est situé à une altitude supérieure à 1000 m. Les appareils sont donc testés dans des conditions climatiques plutôt rudes ;
- une infrastructure matérielle est en place : électricité, parc fermé, connexion téléphonique pour la télétransmission de données ;
- le site est dégagé et donc la mesure de la pluie n'est pas perturbée par des obstacles extérieurs autres que les appareils eux-mêmes ;
- il est à proximité de Grenoble et facile d'accès pour la maintenance des appareils.

La campagne a débuté par l'installation des premiers appareils mi-juin 2006. L'installation s'est poursuivie jusqu'à la mi-juillet au fur et à mesure de la disponibilité des capteurs. Une fois tous les disdromètres optiques installés, les premiers événements pluvieux ont malheureusement révélés des problèmes dans leurs fonctionnements. Un événement particulièrement violent a ensuite eu lieu le 14 juillet 2006 qui semble avoir entraîné une panne de longue durée sur le Parsivel d'EDF. A la fin du mois d'août, l'équipe du LTHE devait procéder au démontage du disdromètre optique Parsivel pour sa réinstallation à Alès, où il est déployé les automnes dans le cadre de l'Observatoire Hydro-météorologique Méditerranéen Cévennes-Vivarais.

A la suite de cette campagne estivale difficile, l'équipe de la DTG d'EDF a heureusement pu maintenir les autres appareils pendant deux ans. Le tableau ci-dessous retrace les périodes de fonctionnement au cours de ces deux années.

Suite à une fuite constatée au cours de l'été 2008 sur le PG2000 d'EDF, le pluviomètre du même type de Météo-France situé à quelques mètres du premier a été utilisé (période indiquée en vert clair). La cohérence des données des deux pluviomètres a été vérifiée sur plusieurs mois précédant la fuite.

	juil-06	août-06	sept-06	oct-06	nov-06	déc-06	janv-07	févr-07	mars-07	avr-07	mai-07	juin-07	juil-07	août-07	sept-07	oct-07	nov-07	déc-07	janv-08	févr-08	mars-08	avr-08	mai-08	juin-08	juil-08	
PG2000	orange	orange	orange	orange	orange	orange	orange	orange	orange	orange	orange	orange	orange	orange	orange	orange	orange	orange	orange	orange	orange	orange	orange	orange	orange	orange
OTT Parsivel LTHE	orange	orange	orange	orange	orange	orange	orange	orange	orange	orange	orange	orange	orange	orange	orange	orange	orange	orange	orange	orange	orange	orange	orange	orange	orange	orange
OTT Parsivel EDF	orange	orange	orange	orange	orange	orange	orange	orange	orange	orange	orange	orange	orange	orange	orange	orange	orange	orange	orange	orange	orange	orange	orange	orange	orange	orange
Thies Clima	orange	orange	orange	orange	orange	orange	orange	orange	orange	orange	orange	orange	orange	orange	orange	orange	orange	orange	orange	orange	orange	orange	orange	orange	orange	orange
radar Lufft	orange	orange	orange	orange	orange	orange	orange	orange	orange	orange	orange	orange	orange	orange	orange	orange	orange	orange	orange	orange	orange	orange	orange	orange	orange	orange
Vaisala	orange	orange	orange	orange	orange	orange	orange	orange	orange	orange	orange	orange	orange	orange	orange	orange	orange	orange	orange	orange	orange	orange	orange	orange	orange	orange

Tableau de fonctionnement des instruments étudiés. En vert : mesures disponibles tout le mois ; en orange : mesure partiellement disponibles ; en rouge : données indisponibles.

Ce tableau montre que les périodes de fonctionnements simultanés des appareils sont rares. Il a donc été choisi dans cette étude de :

- comparer l'ensemble des instruments mais seulement sur les quelques courtes périodes où quasiment toutes les données sont disponibles de manière à faire ressortir des tendances sur les cumuls pluviométriques observés, détecter de gros dysfonctionnements et éventuellement exclure certains instruments dans la suite de l'étude ; cette analyse est présentée dans la partie 5.1. ;
- comparer les intensités des précipitations mesurées par un nombre limité d'instruments mais sur l'ensemble des deux années à chaque fois que cela est possible ; cette analyse est détaillée dans la partie 5.2. ;
- illustrer et confirmer les analyses réalisées sur des études de cas ; c'est l'objet de la partie 5.3.

5. Analyse statistique des observations

Nous présentons dans cette partie une analyse statistique des mesures de précipitations effectuées par le pluviomètre PG2000 (noté dans la suite « PG2000 »), le spectro-pluviomètre Parsivel (« Parsivel »), le radar Lufft (« Lufft »), les disdromètres Vaisala et Thies (respectivement « Vaisala» et « Thies »).

5.1. Comparaison des cumuls de pluie observés par l'ensemble des instruments

Une première approche consiste à travailler sur des périodes où il est possible d'intercomparer le plus grand nombre d'instruments. Ces périodes, indiquées ci-dessous, ont volontairement été choisies en été et hiver de manière à dissocier différents types de précipitations :

- du 29 juin au 20 juillet 2006 (période notée dans la suite « été 2006 ») ;
- du 30 janvier au 13 février 2007 (« hiver 2006/2007 ») ;
- du 6 juin au 30 septembre 2007 (« été 2007 ») ;
- du 1 décembre 2007 au 29 février 2008 (« hiver 2007/2008 ») ;
- du 1 juin au 15 juillet 2008 (« été 2008 »).

Le tableau 1 indique les cumuls de précipitation mesurés ou estimés par les différents capteurs. Les valeurs de moyenne et de dispersion pour les 3 premiers instruments sont fournies en annexe 2.

cumul (mm)	PG2000	Parsivel	Lufft	Thiès	Vaisala
Été 2006	85,5	*	55,2	15	180
Hiver 06/07	121,4	191,8	34,4	117	**
Été 2007	324	308,9	233,4	1090	**
Hiver 07/08	506,5	739,8	384,9	606	197
Été 2008	216,4	243	243,6	**	333

* Le Parsivel d'EDF a fortement surestimé les précipitations avant de tomber en panne au cours du mois de juillet 2006. L'instrument, retourné chez le constructeur pour réparation et étalonnage, a été réinstallé en décembre 2006.

** Données non disponibles.

Tableau 1 : Cumuls de précipitation mesurés par les différents capteurs

Le Parsivel du LTHE (non présenté dans le tableau) a été présent uniquement l'été 2006. Il n'a été opérationnel qu'à partir de fin juillet (difficultés de connexion avec le PC d'acquisition) et a dû être démonté fin août (fin du prêt pour ce projet - remise en place pour les campagnes automnales cévenoles à Alès). Le seul événement significatif a été enregistré au cours des événements des 3 au 6 août 2006 où les cumuls pluviométriques estimés par le Parsivel du LTHE (99 mm) sont très proches des cumuls mesurés par PG2000 (101 mm).

Le disdromètre Parsivel d'EDF semble aussi donner, en période d'été, les cumuls les plus proches de ceux enregistrés par le pluviomètre PG2000. Pendant les mois d'hiver le Parsivel surestime toutefois assez fortement les cumuls pluviométriques. La surestimation peut être liée à une mauvaise conversion des précipitations neigeuses en quantité d'eau liquide. En effet l'interprétation des informations disdrométriques en terme de cumul pluviométrique n'est pas triviale lorsque la densité des particules est mal connue. C'est le cas pour les précipitations en phase glace où la densité des particules peut être faible (neige sèche) à forte (neige fondante, grésil). L'interprétation délicate du fait de l'existence de différents types de neige est souligné par Löffler-Mang et Blahak (2001) tandis que Yuter et al. (2006) montrent que la mesure des vitesses et tailles des particules reste un difficile lorsque de la neige fondue coexiste avec de la pluie.

Le radar Lufft semble sous-estimer la pluie l'hiver et un peu moins l'été (légère surestimation en début d'été 2008).

Le disdromètre Thiès a présenté un nombre important de valeurs d'intensité aberrantes (supérieures à 400 mm/min). La suppression pure et simple de ces valeurs irréalistes a permis de trouver des cumuls vraisemblables en hiver. Il est fort probable toutefois que ce filtrage puisse être une source de sous-estimation. Par ailleurs, on note en été soit une très forte sous-estimation soit une très forte surestimation. Les données du Thiès n'ont donc pas fait l'objet d'études plus approfondies.

Enfin les cumuls de pluie enregistrés (au pas de temps horaire) par la station Vaisala ne paraissent pas cohérents avec les séries pluviométriques de référence.

Dans la suite de ce travail, nous avons donc uniquement analysé les données du PG2000, Parsivel et du radar Lufft.

5.2. Comparaison des intensités de précipitations mesurées par le disdromètre Parsivel, le radar Lufft et le pluviomètre de référence PG2000 sur l'ensemble des deux années

Choix de la résolution temporelle

La plus petite résolution temporelle (ou période d'accumulation) commune à ces trois appareils est de 6 minutes. Cette période d'accumulation de la pluie est bien adaptée pour la description des précipitations dans des études météorologiques à l'échelle aérologique. En effet, la durée des cellules nuageuses convectives donnant de la précipitation est au moins de quelques dizaines de minutes. Toutefois, les cellules pluvieuses sont souvent organisées en systèmes de plus grande échelle (mésos-échelle) tels que les systèmes nuageux formés de nuages peu épais (convection peu profonde) ou de cellules convectives (convection profonde) qui ont des durées de vie de plusieurs heures. Dans ce cas, les intensités de précipitation

calculées sur des périodes d'accumulation typiquement de 1 heure sont utilisés. Enfin, pour le suivi de la ressource en eau, le pas de temps journalier est suffisant. Dans cette étude où les applications sous-jacentes concernent une large gamme d'échelles (de l'étude des systèmes précipitants à fine échelle ... au suivi de la ressource en eau), nous avons choisi de comparer les mesures des 3 appareils pour des périodes d'accumulation fines de 6 minutes et 1 heure.

Etude des probabilités de dépassement quelle que soit l'intensité des précipitations

Cet outil statistique a été utilisé pour caractériser les gammes d'intensité mesurées par les différents capteurs.

La figure 1 montre les probabilités de dépassement (fréquence des excès) de l'intensité des précipitations pour les trois appareils et pour les deux durées de cumul (6 min. et 1h.). Ces probabilités sont calculées en considérant tous les échantillons (les intensités nulles sont incluses). Le nombre d'échantillons disponibles (supérieur à 80000 pour chaque appareil) est suffisant pour assurer la robustesse des calculs statistiques. Pour la période d'accumulation de 6 minutes (figure 1a), la gamme des intensités mesurées par le PG2000 s'étend de 1 à un peu plus de 60 mm/h. La fréquence des excès diminue d'abord lentement pour des intensités de précipitations inférieures à quelques dizaines de millimètres par heure. Au-delà d'environ 45 mm/h, la décroissance se poursuit de manière comparable à celle d'une loi puissance. Pour les intensités les plus fortes, le comportement est plus chaotique. Le nombre d'échantillons disponibles pour les fréquences inférieures à 0.2% étant inférieur à 20, la détermination des fréquences empiriques n'est plus robuste.

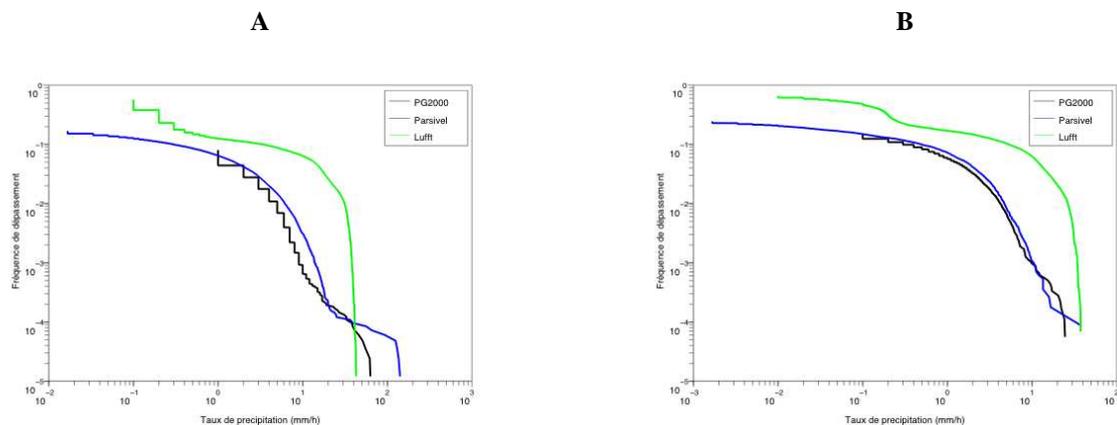


Figure 1 : Fréquence des excès de l'intensité des précipitations (mm/h) mesurée par le pluviomètre PG2000, le spectro-pluviomètre Parsivel et le radar Lufft. A: pas de temps d'intégration de 6 min ; B : 1 heure. Toutes les mesures sont utilisées pour calculer ces fréquences (intensités nulles incluses)

La forme de la courbe de fréquence des excès du Parsivel (figure 1a) est proche de celle du PG2000. Toutefois, la fréquence des intensités mesurées par le Parsivel est quasiment toujours supérieure à celle du PG2000. Cela est certainement dû aux plus fortes valeurs mesurées par le Parsivel. On note par ailleurs que la valeur maximale mesurée par le Parsivel est d'environ 150 mm/h alors qu'elle n'est que de 60 mm/h environ pour le PG2000. Une autre différence entre les mesures des deux appareils concerne les faibles intensités. Pour la période d'accumulation de 6 minutes, l'intensité minimale mesurée par le PG2000 est de 1 mm/h (résolution de l'appareil 0,1 mm) alors que le Parsivel est capable de mesurer des valeurs aussi basses que 0,02 mm/h. A titre d'illustration, une intensité de pluie de 0,02 mm/h pourrait être provoquée par le passage dans le faisceau laser du Parsivel (section de 18 cm par

3 cm) de 20 gouttes de pluie de 1mm de diamètre dans un intervalle de temps de 6 minutes tandis que la mesure minimale effectuée par le PG2000 (1 mm/h) correspondrait à la collection de plus 1000 gouttes de 1mm de diamètre en 6 minutes.

Quelle que soit la gamme des intensités considérée, le comportement de la fréquence des excès des mesures du Lufft est très différents de celles du Parsivel et du PG2000. Pour les intensités inférieures à 40 mm/h, la fréquence de dépassement est supérieure à celle des autres appareils. Toutefois, le Lufft n'est pas capable de mesurer des intensités supérieures à 40 mm/h. Comme le Parsivel, le radar Lufft mesure des intensités plus faibles que celles du PG2000 mais pas aussi faibles que celles mesurées par le Parsivel. On peut supposer que la mesure volumique facilite la détection des faibles intensités associées à de faibles concentrations de gouttes dans l'air. Toutefois, comme nous ne connaissons pas le volume de résolution du radar, il n'est pas possible d'estimer le nombre de gouttes qui a induit cette mesure.

Lorsque la période d'accumulation est augmentée de 6 à 60 minutes (figure 1-A et B), les fluctuations dans les queues des distributions concernant le PG2000 et le Parsivel sont atténuées et les deux distributions sont de plus en plus proches. Les fréquences des intensités moyennes sont légèrement surestimées par le Parsivel et les intensités les plus fortes sont sous-estimées (excepté pour la plus forte valeur). Enfin, la forme de la courbe de la fréquence des excès du Lufft reste très différente de celle du PG2000.

Même étude restreinte aux intensités détectées par le pluviomètre de référence

La forme des courbes peut être très influencée par la prise en compte des intensités de précipitations nulles et très faibles. C'est pourquoi l'analyse a été réitérée (figure 2) pour des cumuls supérieurs à 0,1 mm (seuil de basculement de l'auge du PG2000). Cela permet de focaliser l'évaluation sur les pas de temps où le pluviomètre de référence a détecté des précipitations.

La figure 2 montre que les fréquences du PG2000 et Parsivel sont très similaires, surtout pour les intensités inférieures à 10 mm/h et la période d'accumulation d'une heure. Le Lufft sous-estime encore les fréquences des intensités les plus faibles et surestime les plus fortes. La forme des courbes associées aux valeurs du Lufft est très différente de celles des autres appareils ; ce qui laisse supposer que l'étalonnage du Lufft serait le plus incertain.

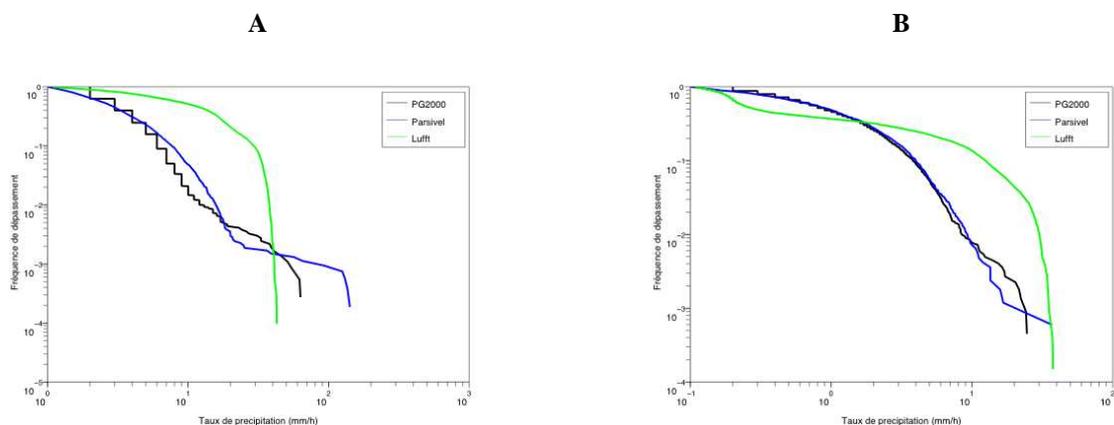


Figure 2 : Même représentation que la figure 1 mais seuls les cumuls supérieurs à 0,1 mm sont pris en compte

Distinction entre périodes estivales et hivernales

Les précipitations dont l'intensité a été analysé jusqu'ici peuvent être de natures différentes : plutôt solides en hiver et plutôt liquides l'été. Les mesures d'intensité en hiver sont plus difficiles : pour estimer des équivalents « liquide », le PG2000 doit faire fondre les hydrométéores solides tandis que le Parsivel et le Lufft utilisent des relations d'étalonnage reposant sur une classification (fondée sur la taille et/ou la vitesse de chute des particules) pas forcément robuste.

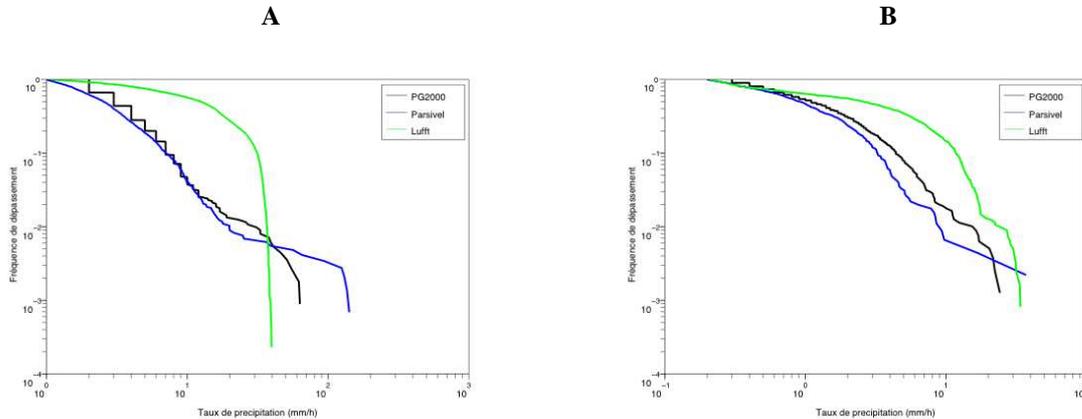


Figure 2 : Fréquence des excès de l'intensité des précipitations mesurée par le PG2000, le Parsivel et le Lufft. Seules les mesures durant les mois de juin à août et correspondant à des cumuls supérieurs à 0,1mm sont considérées. A : période d'accumulation de 6 minutes ; B : 60 minutes.

La figure 3 montre les fréquences des excès de l'intensité des précipitations pour les mois de juin à août et pour les périodes d'accumulation de 6 et 60 minutes, et cela pour des cumuls de précipitations excédant 0,1mm. On observe toujours une bonne cohérence entre les valeurs du PG2000 et celles du Parsivel bien qu'elle semble se dégrader avec l'augmentation de la période d'accumulation pour les plus fortes valeurs d'intensité. Le PG2000 mesure plus souvent de fortes intensités que le Parsivel. Les mesures du Lufft surestiment les fréquences des intensités de 1 à 30 mm/h. Au delà de 30mm/h, la mesure semble écrêtée pour la durée d'accumulation de 6 minutes alors que pour la période d'accumulation de 60 minutes le Lufft mesure les plus fortes intensités de précipitations.

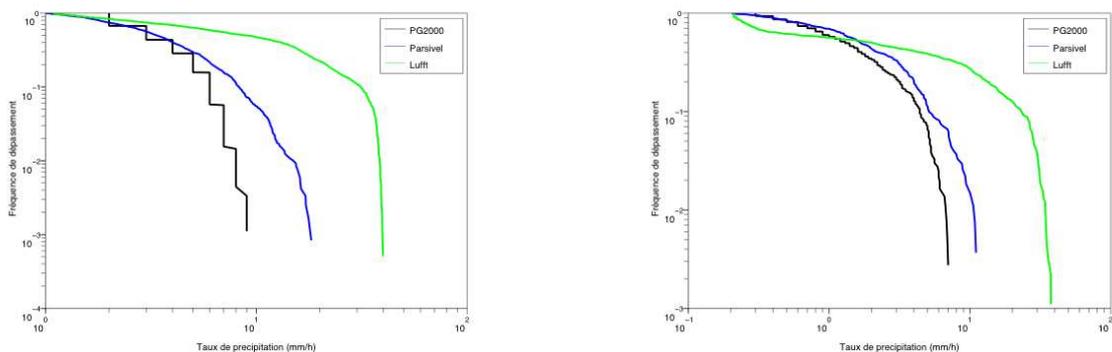


Figure 3 : Même représentation que la Figure 2 mais pour les mois de janvier et février

La figure 4 représente les mêmes éléments mais pour les mois de janvier et février 2007 et 2008 où la majorité des précipitations au col de Porte sont solides. Les intensités mesurées par le PG2000 sont plus faibles que celles mesurées pendant les mois d'été. On voit que contrairement aux mois d'été, le Parsivel surestime les fréquences des intensités les plus fortes quelle que soit la période d'accumulation. Les fréquences déduites des mesures du Lufft ont le même comportement qu'en été.

Etude de corrélation

Il s'agit ici simplement d'analyser les coïncidences entre les intensités mesurées par le PG2000 et le Parsivel d'une part et entre le PG2000 et le Lufft d'autre part. La figure 5 présente le nuage de points des cumuls de précipitations mesurés par les différents appareils durant les périodes d'accumulation de 6 minutes. Des fortes dispersions entre les différents types de mesures sont observées. Comme l'indiquait les fréquences des excès (figures 1 à 4) c'est le Lufft qui montre les plus fortes disparités avec le PG2000. Les coefficients de détermination relatifs aux graphiques de la figure 5 sont reportés dans le tableau 2. Les meilleurs scores sont obtenus pour le Parsivel. Toutefois, pour ce pas de temps très fin, ces scores restent faibles quelle que soit la saison considérée.

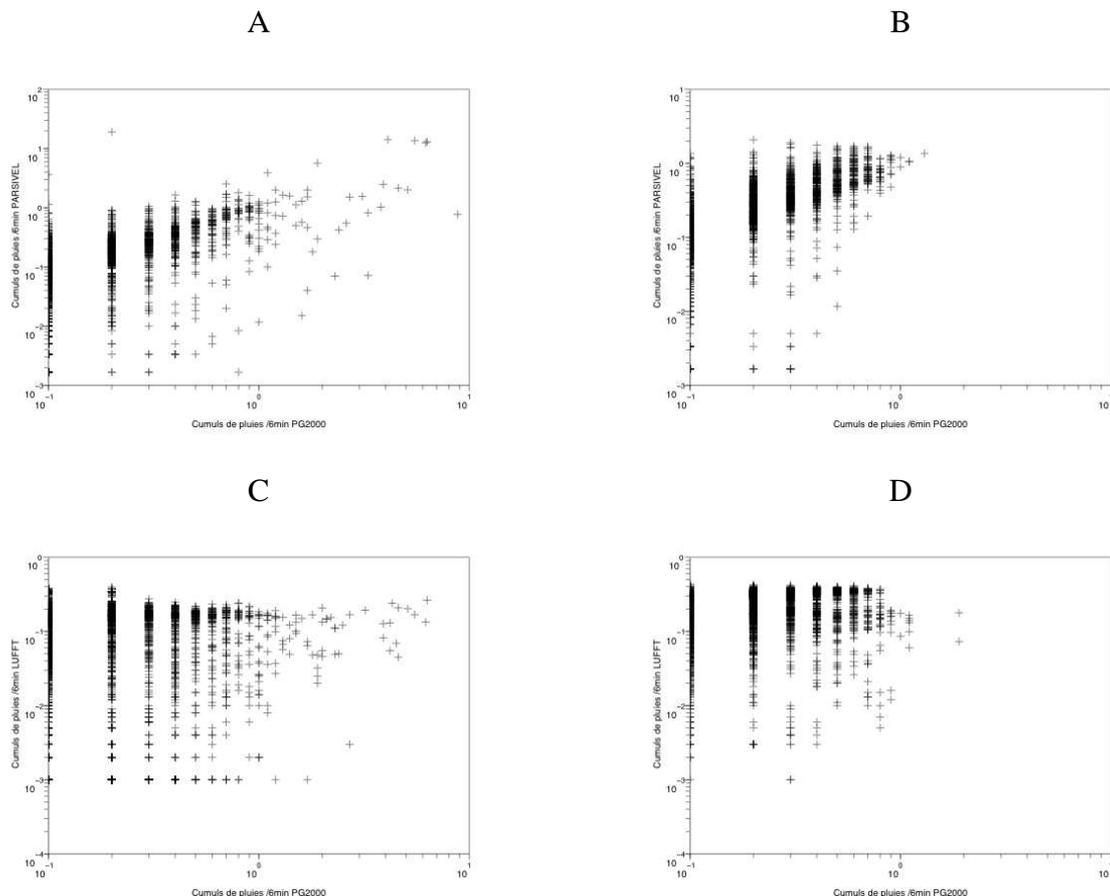


Figure 4 : Comparaison entre les cumuls de précipitations en 6 minutes mesurés par le PG2000 et le Parsivel (A et B) et entre le PG2000 et le Lufft (C et D). Les diagrammes A et C sont relatifs aux mois d'été (juin, juillet et août) et les diagrammes B et D aux mois d'hiver (janvier et février).

r^2	Parsivel	Lufft
Été 2006	*	18%
Hiver 06/07	65%	39%
Été 2007	38%	5%
Hiver 07/08	72%	44%
Été 2008	91%	24%

Tableau 2 : Coefficient de détermination entre les mesures du PG2000 et celles du Parsivel d'une part et entre les mesures du PG2000 et celles du Lufft d'autre part.

Il s'agit ici simplement d'analyser les coïncidences entre les intensités mesurées par le PG2000 et le Parsivel d'une part et entre le PG2000 et le Lufft d'autre part. La figure 5 présente le nuage de points des cumuls de précipitations mesurés par les différents appareils durant les périodes d'accumulations de 6 minutes. Les fortes dispersions entre les différents types de mesures sont observées. Comme l'indiquait les fréquences des excès (figures 1 à 4) c'est le Lufft qui montre les plus fortes disparités avec le PG2000. Les coefficients de détermination relatifs aux graphiques de la figure 5 sont reportés dans le tableau 2. La meilleure corrélation est trouvée pour le Parsivel. Toutefois, les figures et les coefficients indiquent que, pour ce pas de temps très fin, la qualité des correspondances est faible et qu'elle ne dépend pas de la saison considérée.

Matrice de contingence

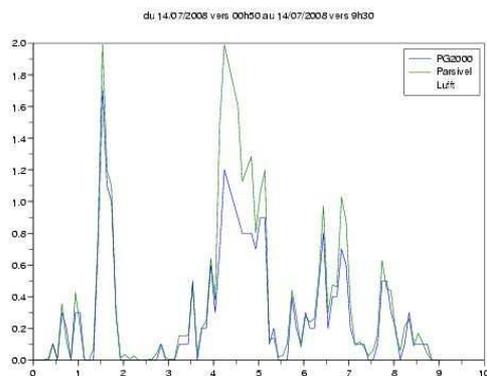
Cette approche a été utilisée pour identifier les capacités du Parsivel à détecter ou non des pluies dépassant un certain seuil d'intensité lorsque le pluviomètre de référence les détectait ou non. Le principe et l'ensemble des scores obtenus sont présentés en annexe 3. On retiendra en particulier que le Parsivel :

- détecte bien la pluie ; les résultats sont moins bons pour la période de l'hiver 2006 où le nombre de jours étudié était limité et où les températures étaient faibles ;
- a un taux de fausses alertes (i.e. détection alors que le pluviomètre de référence ne détecte rien) plus important pour les cas hivernaux et les forts cumuls ;
- a un biais fréquentiel très faible pour des valeurs d'intensité faibles à modérées puis fort pour les grandes intensités et ceci, surtout en hiver.

Ces éléments semblent confirmer une mauvaise interprétation des précipitation en phase glace en terme d'équivalent de pluie.

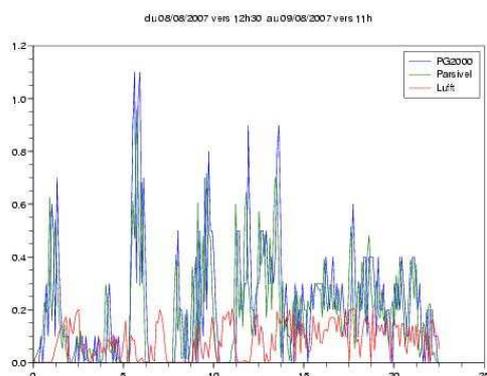
5.3. Etudes de cas

Afin d'illustrer les analyses précédentes, quatre événements ont été sélectionnés : deux en été et deux en hiver.



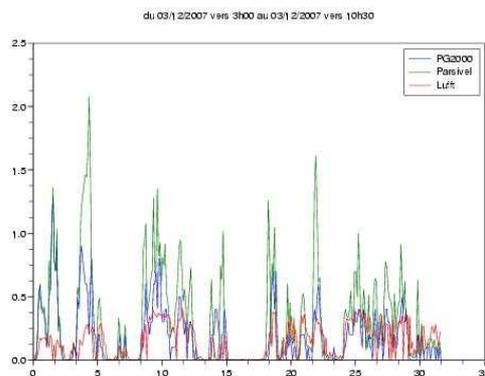
Hyétoqramme du PG2000 et du Parsivel (en mm/min) pour l'événement du 14 juillet 2008. L'axe des abscisses représente les heures depuis le début de la période considérée.

Sur le premier hyétoqramme ci-dessus, on note une bonne cohérence entre le Parsivel (courbe verte) et le pluviomètre de référence (courbe bleue). La surestimation observée pour le Parsivel aux fortes intensités est peut-être due à la présence de grêle dont l'équivalent en eau liquide pourrait être mal estimé. Les données du radar Lufft ne sont pas disponibles.



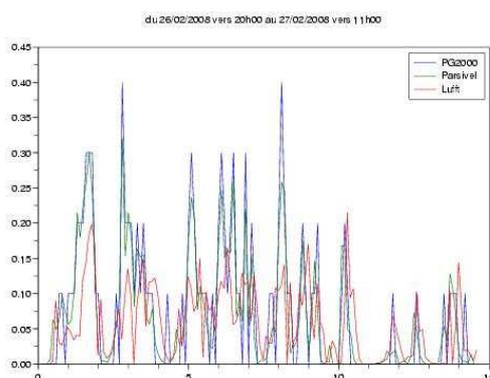
Hyétoqramme du PG2000, du Parsivel et radar Lufft (en mm/min) pour l'événement du 8 août 2007

Sur ce second hyétoqramme, on retrouve la bonne cohérence entre le disdromètre Parsivel et le pluviomètre PG2000. Les données du Lufft (courbe rouge) semblent moins bien suivre la dynamique (signaux en période de non pluie) et les intensités sont fortement sous-estimées.



Hyétoqramme du PG2000, du Parsivel et radar Lufft (en mm/min) pour l'événement du 3 décembre 2007

Sur ce hyétoqramme d'une journée hivernale froide (température variant entre 0 et 2°C au cours de cet événement), on constate une surestimation importante du Parsivel (certainement liée à la présence de neige). Le Lufft représente un peu mieux la dynamique et le volume de la série de référence.



Hyétoqramme du PG2000, du Parsivel et radar Lufft (en mm/min) pour l'événement du 3 décembre 2007

Sur ce dernier hyétoqramme d'une autre journée hivernale un peu plus douce (température variant entre 4 et 5 °C), le Parsivel ne surestime plus la pluie de référence (alors que c'est souvent le cas en hiver) et le radar Lufft semble bien suivre la dynamique de l'événement pluvieux bien qu'ayant tendance à sous-estimer un peu les intensités.

Ces études de cas font ressortir les conclusions suivantes :

- Le disdromètre Parsivel représente bien la dynamique des événements pluvieux mais a tendance à surestimer la pluie en présence de précipitations solides ;
- Le radar Lufft suit moins bien la dynamique des événements pluvieux et cela surtout en été ; les intensités mesurées sont sous-estimées.

5.4. Synthèse des résultats

	Disdromètre OTT Parsivel		Radar Lufft		Pluviomètre PG2000
	été	hiver	été	hiver	
Cumuls	OK	Sur-estimation	Sous-estimation	Forte sous-estimation	référence
Gammes d'intensité mesurées (sur 6 min.)	0,2 → 150 mm/h		→ 40 mm/h		0,1 → 60 mm/h
Adéquation de la courbe de fréquence des excès	Très bonne, surtout pour des cumuls ≥ 1h	Assez bonne, surtout pour des cumuls ≥ 1h	Sous-estimation des faibles intensités		référence
	Un peu moins bonne pour les très fortes intensités		Sur-estimation des fortes intensités		
Corrélation	Très variable	Assez bonne	Très faible	Faible	référence
Conclusion	++	+	-	-	référence

Disdromètre Thiès Clima : valeurs aberrantes ; cumuls risquant d'être sous-estimés après correction - **étude non poursuivie**

Station Vaïsula : cumuls incohérents ; pas de temps horaire - **étude non poursuivie**

6. Conclusion

Cette étude concernait la comparaison d'appareils de mesure des taux de précipitation. Il s'agissait d'évaluer, parmi les différents appareils commercialisés, ceux qui pourraient être déployés en complément ou en substitution des pluviomètres classiques pour répondre aux exigences de la pluviométrie en basse et moyenne montagne pour la gestion des risques naturels. L'étude a été réalisée grâce à la collaboration d'un organisme de recherche et d'un organisme à vocation opérationnelle. Elle a permis de mettre en place un dispositif d'inter-comparaison dans un environnement pertinent pour les applications envisagées et de constituer une base de donnée rare avec 5 appareils mesurant la même pluie avec des approches différentes.

Le premier travail du projet a été principalement bibliographique. La deuxième partie consistait à mettre en œuvre différents appareils de mesure de la pluie sur le site du Centre d'Etude de la Neige (Météo-France/EDF) au Col de Porte. La dernière visait à inter-comparer les mesures obtenues.

A l'issue d'une campagne de mesure de deux ans, il ressort que le disdromètre Parsivel approche le mieux les intensités de pluie et les cumuls que les autres appareils testés. Cet instrument présente cependant des limites pour les cas d'hiver. Il semble que la neige soit bien détectée mais peut-être mal interprétée en terme de cumul pluviométrique. Le radar Lufft suit moins bien la dynamique des événements et sous-estime assez fortement les cumuls

pluviométriques. Les données du disdromètre Thiès et station Vaisala mis en oeuvre dans cette expérience n'ont pu être validées à cause de nombreuses valeurs aberrantes.

Les partenaires du projet ont rencontré des difficultés pour collecter de manière automatique les données et les interpréter mais ont acquis une expérience utile à leurs applications. Il s'agit d'une étape. L'équipe de la DTG/EDF devrait poursuivre l'expérience au col de Porte au moins jusqu'au prochain été. Puis une implantation de certains instruments sur un site de haute montagne est envisagée. L'objectif reste d'évaluer de manière quantitative une alternative au PG2000 là où son déploiement est difficile. L'équipe du LTHE, pour les activités de l'Observatoire Hydrométéorologique Méditerranéen Cévennes-Vivarais, implante actuellement un second disdromètre optique Parsivel en Ardèche en plus celui en place sur site de l'École des Mines d'Alès depuis 2004. Les objectifs seront de caractériser la variabilité à fine échelle des précipitations, de caractériser la microphysique des systèmes précipitants méditerranéens et de leurs impacts sur l'érosion.

7. Bibliographie

Armetta, A., 2006 : Etude bibliographique des appareils de mesures de précipitations installés au Col de Porte, rapport de stage d'été au LTHE sous la direction d'Alexis Berne et Gilles Molinié.

Do Khac K., F. Zanghi, P. Tabary, 2004: Radar-Disdrometer Comparison. Proceedings of ERAD 2004, 272-277, *Copernicus GmbH*.

Donnadieu, G., G. Dubosclard, and S. Godard, 1969: Un pluviomètre photoélectrique pour la détermination simultanée des spectres dimensionnel et de vitesse de chute des gouttes de pluie. *J. Rech. Atmos.*, **4**, 37–46.

Donnadieu, G., 1974: Etude des caractéristiques physiques et radioélectriques de la pluie à l'aide d'un spectropluviomètre photoélectrique. *J. Rech. Atmos.*, **8**, 253–266.

Donnadieu, G., 1978: Mesure de la vitesse terminale des gouttes de pluie au sol à l'aide du spectromètre VIDIAZ. *J. Rech. Atmos.*, **12**, 245–249.

Donnadieu, G., 1980: Comparison of results obtained with the VIDIAZ Spectro-Pluviometer and the Joss–Waldvogel rainfall disdrometer in a “rain of a thundery type”. *J. Appl. Meteor.*, **19**, 593–597.

Illingworth, A. J., and C. J. Stevens, 1987: An optical disdrometer for the measurement of raindrop size spectra in windy conditions. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, **4**, 411–421.

Joss, J., and A. Waldvogel, 1967: Ein spektrograph für Niederschlagstropfen mit automatischer auswertung (A spectrograph for automatic measurement of raindrops). *Geofis. Pura Appl.*, **68**, 240–246.

Krajewski W. F., A. Kruger, C. Caracciolo, P. Gola, L. Barthes, J.D. Creutin, J.Y. Delahaye,

- I.E. Nikolopoulos, F. Ogden and J.P. Vinson, 2006: DEVEX-disdrometer evaluation experiment: Basic results and implications for hydrologic studies. *Adv. Water Res.*, **29**, 2, 311-325.
- Kruger, A., and W. F. Krajewski, 2002: Two-dimensional video disdrometer: A description. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, **19**, 602–617.
- Löffler-Mang, M., and J. Joss, 2000: An Optical Disdrometer for Measuring Size and Velocity of Hydrometeors. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, **17**, 130–139.
- Löffler-Mang M., U. Blahak, 2001: Estimation of the Equivalent Radar Reflectivity Factor from Measured Snow Size Spectra. *J. Appl. Meteor.*, **40**, 4, 843-849.
- Miriovsky, B.J., A.A. Bradley, W.E. Eichinger, W.F. Krajewski, A. Kruger, B.R. Nelson, J.D. Creutin, J.M. Lapetite, G.W. Lee, I. Zawadzki, and F.L. Ogden, 2004: An Experimental Study of Small-Scale Variability of Radar Reflectivity Using Disdrometer Observations. *J. Appl. Meteor.*, **43**, 106–118.
- Picca, B., and G. Trouilhet, 1964: Un pluviogranulomètre photoélectrique (A photoelectric raindrop-size spectrometer). *J. Rech. Atmos.*, **7**, 184–188.
- Salles, C., J.D. Creutin, and D. Sempere-Torres, 1998: The Optical Spectropluviometer Revisited. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, **15**, 1215–1222.
- Salmi A., J. Ikonen, 2005: Piezoelectric Precipitation Sensor from Väisälä. *WMO Technical Conference on Meteorological and Environmental Instruments and Methods of Observation (TECO-2005), Bucharest, Romania.*
- Schönhuber, M., H. E. Urban, P. P. V. Poiaraes Baptista, W. L. Randeu, and W. Riedler, 1997: Weather radar versus 2D-video-disdrometer data. Weather Radar Technology for Water Resources Management, B. Bragg Jr. and O. Massambani, Eds., *Unesco Press*, 159–171.
- Tokay A., K.R. Wolff, P. Bashor, O.K. Dursun, 2004: On the Measurement Errors of the Joss-Waldvogel Disdrometer. *31 th International conference on Radar Meteorology*, P3A.2.
- Yuter, S.E., D.E. Kingsmill, L.B. Nance, and M. Löffler-Mang, 2006: Observations of Precipitation Size and Fall Speed Characteristics within Coexisting Rain and Wet Snow. *J. Appl. Meteor. Climatol.*, **45**, 1450–1464.

Annexe 1 : Caractéristiques techniques des appareils étudiés

Le disdromètre Parsivel

Dimension du laser : 180 mm de long, 30 mm de large, 1 mm d'épaisseur ;

=> Section : 54 cm²;

Lumière pulsée, fréquence de 173 GHz ;

Gamme de mesure :

- diamètre équivalent des gouttes : 0,2 à 5 mm ;
- diamètre équivalent des hydrométéores solides : 0,2 à 25 mm ;
- intensité: 0,2 à 1200 mm/h ;

Précision pour la mesure de la pluie : 10% pour le Parsivel du LTHE et 7.5% pour le Parsivel d'EDF puis 5% après maintenance ;

Mesures effectuées : cumul de pluie, intensité de pluie, réflectivité radar, types de précipitations (code SYNOP et METAR), visibilité et énergie cinétique, taille et vitesse des hydrométéores (uniquement LTHE).

Le disdromètre Thies Clima

Dimension du laser : 230 mm de long, 20 mm de large, 0,75 mm d'épaisseur ;

=> Section : 46 cm² ;

Gamme de mesure :

- diamètre équivalent des gouttes 0.16 à 7 mm ;
- intensité : 0 à 250 mm/h ;

Précision :

- pluies : 15% ;
- neige : 30% ;

Mesures effectuées : cumul pluie, intensité pluie, type de précipitation (différenciées en grêle, neige/grésil et pluie) et nombre des particules.

Le disdromètre mécanique : Vaïsula WXT510

WINDCAP :

Mesure du vent de 0 à 60 m/s ;

Précision intensité : ± 3 m/s ;

Précision direction : ± 2°.

RAINCAP :

Section capteur pluie : 60 cm² ;

Gamme de tailles mesurées : non précisée ;

Intensité : 0 à 200 mm/h ;

Mesures effectuées : quantité pluie, durée pluie, intensités min et max ;

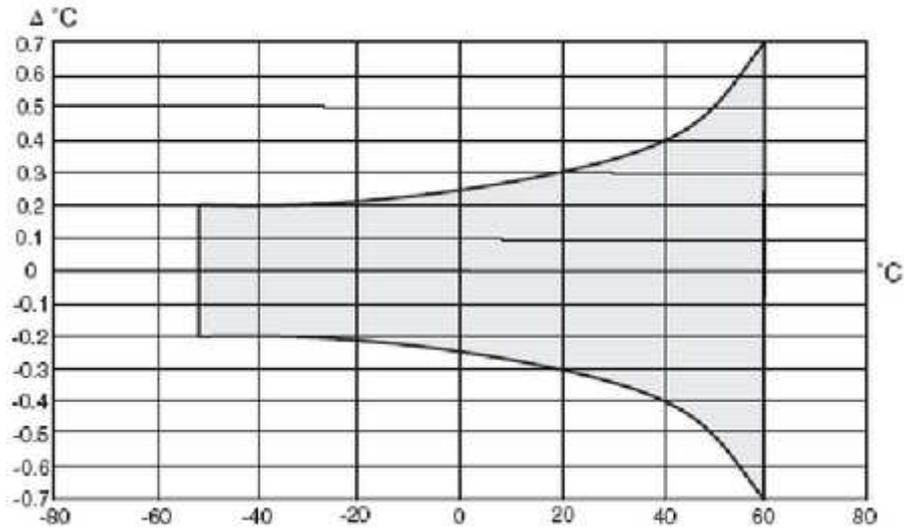
Précision : 5% (sans tenir compte de l'effet du vent).

Sonde PTU :

Pression barométrique : ± 0,5 hPa pour 0 à +30°C ; ± 1 hPa de -52 à 0°C et de 30 à 60°C ;

Humidité : ± 3% entre 0 et 90°C et ± 5 % de 90 à 100°C ;

Température : la précision sur la mesure de la température est indiquée sur la figure suivante :



Précision de la mesure de la température par la sonde PTU de la station Vaisala WXT510.

Le radar Doppler Lufft

Fréquence : 24 GHz ;

Gamme de mesure : diamètres 0,3 à 5 mm ;

Mesures effectuées : cumul pluie et type précipitations ;

Peu d'informations données par le constructeur.

Annexe 2 : Valeurs de cumul (mm), moyenne et de dispersion des intensités (mm/min) mesurées par le pluviomètre PG2000, disdromètre Parsivel et radar Lufft

sans seuil									
	PG2000			Parsivel			Lufft		
	cum	μ	σ	cum	μ	σ	cum	μ	σ
Été 2006	85,5	0,016	0,238	154,8	0,029	0,498	55,2	0,01	0,038
Hiver 06/07	121,4	0,037	0,113	191,8	0,058	0,139	34,4	0,01	0,035
Été 2007	324	0,018	0,103	308,9	0,017	0,081	233,4	0,013	0,042
Hiver 07/08	506,5	0,023	0,092	739,8	0,034	0,139	384,9	0,018	0,06
Été 2008	216,4	0,02	0,093	243	0,022	0,108	243,6	0,022	0,067
seuil à 0,1 mm/h									
	PG2000			Parsivel			Lufft		
	cum	μ	σ	cum	μ	σ	cum	μ	σ
Été 2006	85,5	0,643	1,358	151,3	1,401	3,197	44,5	0,168	0,036
Hiver 06/07	121,4	0,273	0,175	184,2	0,429	0,308	24,5	0,154	0,029
Été 2007	324	0,256	0,297	271,5	0,286	0,206	148,9	0,181	0,068
Hiver 07/08	506,5	0,264	0,184	691,9	0,41	0,308	306,4	0,227	0,09
Été 2008	216,4	0,247	0,227	206,9	0,378	0,309	207,8	0,229	0,078
seuil à 0,5 mm/h									
	PG2000			Parsivel					
	cum	μ	σ	cum	μ	σ			
Été 2006	67,8	2,18	2,185	133	3,5	4,714			
Hiver 06/07	44,8	0,574	0,102	106,1	0,726	0,293			
Été 2007	122,5	0,833	0,555	76,3	0,764	0,259			
Hiver 07/08	187,4	0,605	0,121	381,8	0,809	0,293			
Été 2008	92,7	0,692	0,219	111	0,828	0,293			

Annexe 3 : scores des matrices de contingence entre le disdromètre Parsivel et le pluviomètre PG2000

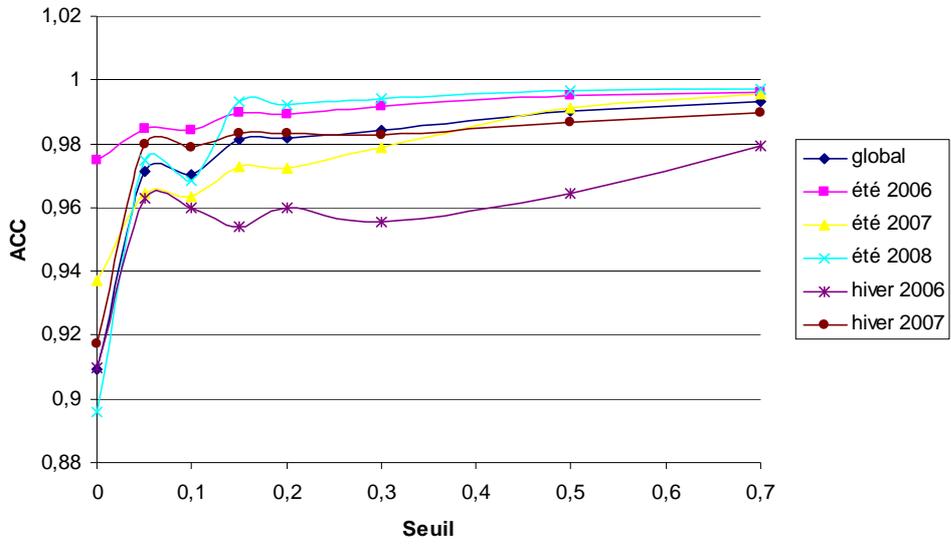
Pour un seuil d'intensité et une sous-période donnés, le nombre de pas de temps où le seuil est atteint est compté pour chacun des instruments. Soient :

- a, le nombre de fois où le seuil n'a été atteint par aucun des deux appareils ;
- b, le nombre de fois où le seuil n'a été atteint que par l'instrument évalué ;
- c, le nombre de fois où le seuil n'a été atteint que par l'instrument de référence ;
- d, le nombre de fois où le seuil a été atteint par les deux instruments.

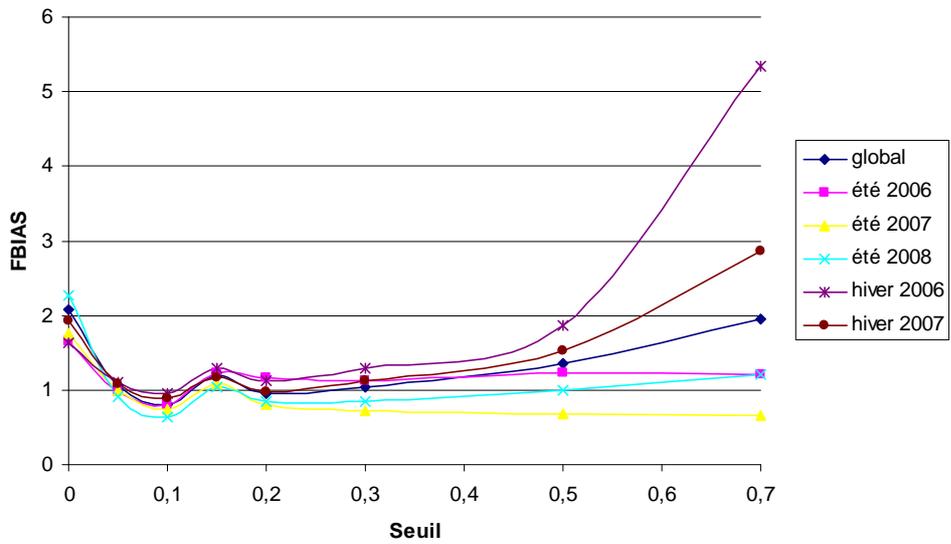
Il est alors possible de définir des scores tels que :

- l'adéquation entre les deux instruments (ACC) est assurée quand $(a+d)/(a+b+c+d)$ est proche de 1 ;
- le taux de fausse détection (FAR) : $b/(b+d)$;
- la probabilité de détection (POD) : $d/(c+d)$;
- le biais fréquentiel (FBIAS) : $(b+d)/(c+d)$.

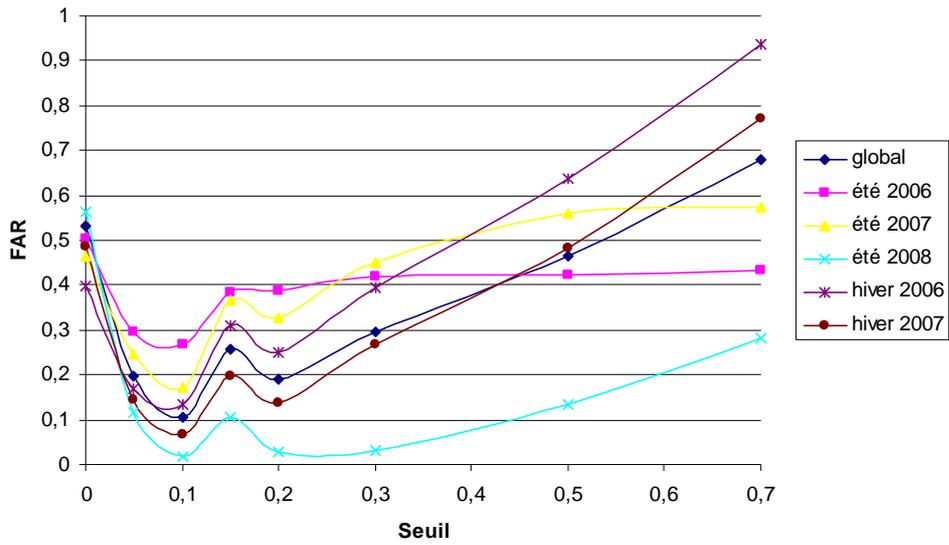
PG2000 - Parsivel



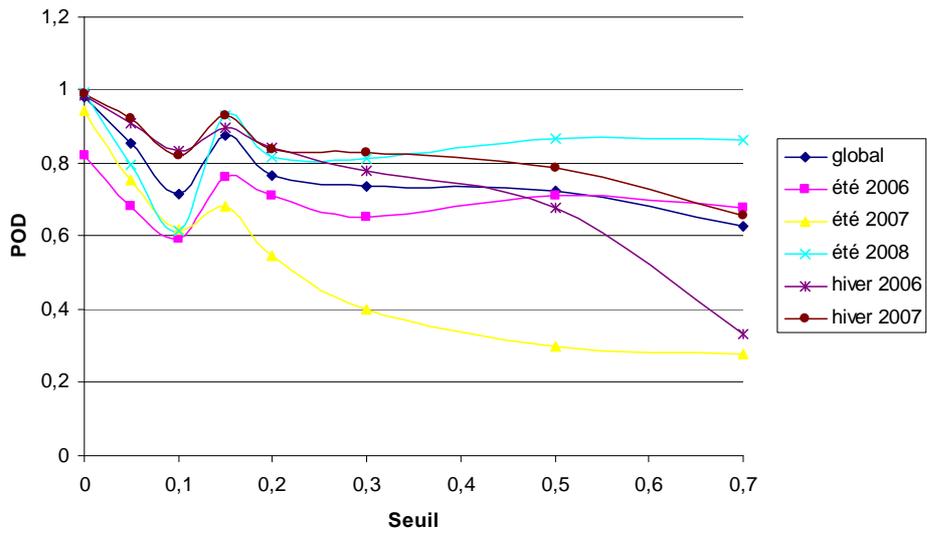
PG2000 - Parsivel



PG2000 - Parsivel



PG2000 - Parsivel



ACC	seuil		
	seuil 0	0,1	0,5
Global	0,909	0,970	0,990
été 2006	0,974	0,984	0,995
été 2007	0,937	0,963	0,990
été 2008	0,895	0,968	0,996
hiver 2006	0,909	0,960	0,964
hiver 2007	0,917	0,978	0,986

FBIAS	seuil		seuil
	seuil 0	0,1	0,5
global	2,086	0,802	1,350
été			
2006	1,646	0,812	1,225
été			
2007	1,761	0,749	0,680
été			
2008	2,276	0,626	1,000
hiver			
2006	1,638	0,964	1,871
hiver			
2007	1,921	0,880	1,522

FAR	seuil		seuil
	seuil 0	0,1	0,5
global	0,530	0,105	0,465
été			
2006	0,502	0,268	0,421
été			
2007	0,464	0,172	0,560
été			
2008	0,563	0,016	0,134
hiver			
2006	0,399	0,135	0,636
hiver			
2007	0,484	0,068	0,483

POD	seuil		seuil
	seuil 0	0,1	0,5
global	0,979	0,717	0,722
été			
2006	0,819	0,593	0,709
été			
2007	0,943	0,619	0,299
été			
2008	0,993	0,616	0,865
hiver			
2006	0,984	0,833	0,679
hiver			
2007	0,990	0,820	0,787