

**LE NRC : UNE DÉCENNIE DE MESURES
DE L'ÉQUIVALENT EN EAU DU MANTEAU NEIGEUX
DANS LES MASSIFS MONTAGNEUX FRANÇAIS
A decade of snow water equivalent monitoring
in the French Mountain ranges**

Frédéric Gottardi, Paul Carrier, Emmanuel Paquet, Marie-Thérèse Laval,
Joël Gailhard and Rémy Garçon
EDF/DTG - Département Surveillance Eau et Ouvrages

RESUME : L'estimation des stocks de neige en montagne est importante pour les gestionnaires d'ouvrages hydroélectriques puisqu'elle permet d'anticiper les ressources en eau qui seront disponibles au printemps lors de la fusion et, ainsi, d'optimiser le remplissage des réservoirs. Pour réaliser cette estimation des apports de fonte nivale, EDF exploite un parc d'une quarantaine de « Nivomètres à Rayonnement Cosmique » (NRC) dans les massifs montagneux français, appareils automatiques dédiés à la mesure de la hauteur et de l'équivalent en eau du manteau neigeux. L'équipement du parc a débuté en 1998 et s'est achevé à la fin de l'année 2004. Un NRC mesure l'atténuation du rayonnement cosmique naturel par le couvert neigeux. Une mesure « hors neige » d'un signal de référence est nécessaire pour compenser les variations naturelles du rayonnement cosmique. La calibration locale de l'appareil par des sondages in-situ s'avère également indispensable. Avec ces précautions, la fiabilité et la précision du signal « équivalent en eau » du manteau neigeux délivré par le NRC est tout à fait satisfaisante. Après plus d'une décennie d'exploitation opérationnelle de ce parc de NRC, EDF tire un bilan très positif de l'utilisation de cet appareil, qui apparaît fiable et précis.

MOTS-CLEF : Rayonnement cosmique, équivalent en eau, manteau neigeux, station de mesure automatique.

ABSTRACT: A decade of snow water equivalent monitoring in the French Mountain ranges. Snowpack estimation in mountains is important for hydroelectric power supply since it allows to anticipate the water resources available during spring snowmelt and thus to optimize filling reservoirs. To get this estimate of the snowmelt contribution, EDF operates a network of forty cosmic "ray snow gauges" (NRC) in the French mountains, automatic snow gauges dedicated to measure the snow depth and its water equivalent. The setup of this network began in 1998 and was completed at the end of 2004. The NRC measures the attenuation of cosmic ray by the snow cover. A reference "off snow" signal is necessary to compensate natural variations of the cosmic ray. The local calibration of the device by in-situ snow sampling is also essential. With these precautions, the reliability and accuracy of "snow water equivalent" signal from the NRC is quite satisfactory. After more than a decade of operational use of the NRC network, EDF makes a very positive evaluation of this device which has proven to be both reliable and accurate.

KEYWORDS: Cosmic ray, snow water equivalent, snowpack, automatic snow gauge.

INTRODUCTION

Les apports en eau issus de la fusion du manteau neigeux représentent une part importante des apports annuels stockés ou transitant dans les réservoirs hydroélectriques gérés par EDF. Le suivi du couvert neigeux sur les bassins versants équipés d'ouvrages hydroélec-

triques est ainsi très important pour EDF puisqu'il permet d'anticiper sur les apports de fusion afin d'optimiser le remplissage des retenues.

Les prévisions de ces apports sont émises dès le début de l'hiver et réactualisées régulièrement tout au long du printemps jusqu'à la fin de la fonte. Ces estimations s'appuient sur trois grands réseaux de mesure : le réseau hydrométrique (débit), le réseau climatologique (pluie, température de l'air) et le réseau nivométrique (équivalent en eau du manteau neigeux) ainsi que sur différents outils de modélisation, tant statistiques qu'hydrologiques. L'expérience montre néanmoins que la mesure directe de l'équivalent en eau du manteau neigeux reste une donnée incontournable dans la réalisation de ces prévisions d'apports.

Adresse de l'auteur correspondant :

Frédéric Gottardi; EDF/DTG, 21 Avenue de l'Europe, BP41, 38040 Grenoble Cedex, France;
tel: +33(0)476202038
email: frederic.gottardi@edf.fr

1 LE RESEAU NIVOMETRIQUE d'EDF

1.1 L'histoire

EDF s'est dotée dès sa création en 1946 d'un réseau de mesures de l'équivalent en eau du manteau neigeux, en partie hérité du Corps des Eaux et Forêts.

D'abord déployé pour la prospection hydraulique sur l'ensemble des territoires montagneux français, il a connu son apogée dans les années 1970 où l'on dénombrait plus de 600 points de mesure constitués pour une petite moitié de « nivo-pluviomètres totalisateurs » et, pour le reste, de « perches à neige ». Ce réseau s'est petit à petit réduit pour se recentrer sur les bassins versants à enjeux. Il totalise aujourd'hui un peu plus de 200 points de mesure parmi lesquels une quarantaine de stations de mesure automatiques.

1.2. L'apparition des appareils automatiques : le télénivomètre

Les difficultés d'accès aux sites de mesure nivologique ont incité au développement de capteurs automatiques capables de réaliser des mesures régulières de l'équivalent en eau du manteau neigeux et de les télétransmettre automatiquement.

Développé à partir des années 60, le télénivomètre a représenté un palier technique majeur pour ce type d'appareil (Tourasse, 1995). Son déploiement dans sa forme définitive s'est achevé dans les années 80, avec 40 sites équipés. La mesure de l'équivalent en eau de la neige était réalisée grâce à l'atténuation du rayonnement d'une source radioactive de faible activité. Un profil de densité était ainsi obtenu et, par intégration, l'équivalent en eau correspondant. Si l'alimentation en énergie le permettait, ces mesures étaient réalisées plusieurs fois par jour.

Sensible aux préoccupations environnementales bien compréhensibles vis à vis de la présence et de la manipulation de sources radioactives dans des sites naturels (bien que l'activité des sources utilisées ait été très faible), EDF s'est engagée à partir du milieu des années 90 dans la conception puis le déploiement industriel d'un nouveau capteur utilisant, cette fois, un rayonnement existant naturellement partout à la surface de la terre : le rayonnement cosmique (RC).

2 LE CAPTEUR DE RAYONNEMENT COSMIQUE : LE CAPTEUR RC

2.1 Principe de mesure

Le rayonnement cosmique est le flux de noyaux atomiques et de particules de haute énergie qui circulent dans le vide interstellaire. Sa partie chargée est essentiellement constituée de protons (entre 85 et 90 %) et de noyaux d'hélium (de 9 à 14 %). Dans la haute atmosphère, des réactions nucléaires initiées par ce rayonnement cosmique produisent un flux de neutrons libres. Ce flux neutronique est atténué par toute matière qu'il traverse. Le flux neutronique qui atteint le sol est ainsi atténué, par exemple, par l'atmosphère puis le manteau neigeux pour ce qui nous concerne ici. C'est ce phénomène d'atténuation qui a été exploité par des chercheurs japonais à la fin des années 70 pour mettre au point une mesure de la l'équivalent en eau du manteau neigeux au moyen d'un compteur de neutrons constitué d'un tube rempli de trifluorure de bore (BF₃) (Kodama et al., 1975 & 1979). La sortie de ce capteur est un nombre d'impulsions par unité de temps (l'heure par exemple).

Le capteur RC a été développé par EDF sur ce principe suivant : une mesure du flux neutronique d'origine cosmique est réalisée sous le manteau neigeux. Par comparaison avec une mesure de référence « hors neige » que nous définissons dans la suite de cet article, il est possible alors d'estimer l'atténuation du flux neutronique par le manteau neigeux, atténuation qui est directement reliée à la quantité d'eau présente au dessus du capteur. Après différents tests, le détecteur le plus approprié a été sélectionné : il s'agit d'un capteur constitué de deux tubes détecteurs de neutrons remplis d'Helium 3 (3He).

2.2 L'importance du signal de référence « hors neige »

Le rayonnement cosmique incident n'est pas constant : il peut varier de façon importante sur des périodes allant de quelques jours à plusieurs mois. Ces variations sont imputables à des événements astronomiques comme, par exemple, les éruptions solaires ou les « événements Forbush » : diminution brutale en quelques jours du rayonnement cosmique. Comme on peut le voir sur le graphique de la figure 1, ces variations peuvent être très importantes sur des périodes relativement courtes.

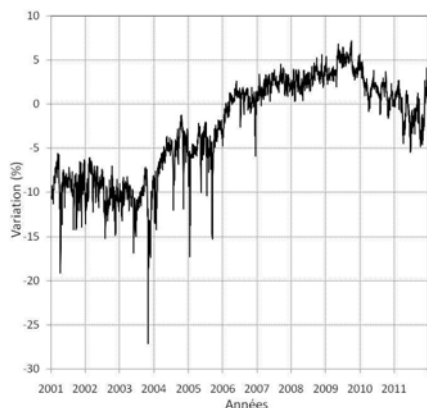


Figure 1. Variation relative du rayonnement cosmique mesuré par le moniteur de Moscou, référence prise par rapport au mois de juillet 1998, mois d'établissement de la courbe d'étalonnage.

Par ailleurs, le rayonnement cosmique est atténué par l'atmosphère. L'épaisseur et la densité de celle-ci ont donc une influence sur le rayonnement mesuré au sol. En particulier, l'altitude du site de mesure et la pression atmosphérique locale sont des variables à prendre en compte comme on peut le voir sur le graphique de la figure 2. Dans cet exemple, on note que le nombre de particules enregistré par le capteur RC est anti-corrélé avec la pression atmosphérique. Il est donc nécessaire d'établir une référence « hors neige » de manière continue pour pouvoir différencier l'atténuation du signal lié à la neige des autres formes de variation.

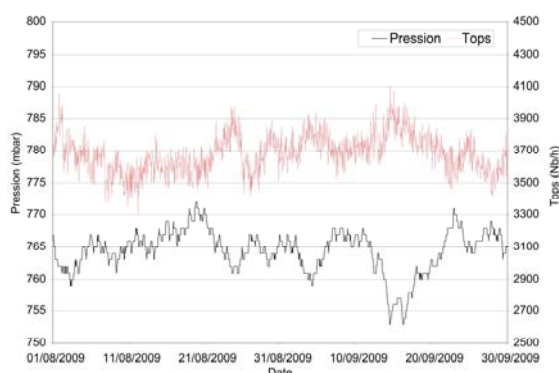


Figure 2. Pression atmosphérique (en noir) et comptage de neutrons (en rouge) mesurés au NRC de Lac Noir (sans neige) durant les mois d'août et septembre 2009.

La solution la plus simple consisterait donc à mesurer le rayonnement cosmique pour chaque site à la fois sous le manteau neigeux et juste au dessus de ce dernier. Cependant, c'est techniquement très difficile à réaliser. Après différents tests de robustesse, l'utilisation de mesures réalisées par des laboratoires d'astrophysique (Moscou en Russie, Oulu en

Finlande, Athènes en Grèce, etc...) s'est révélée comme étant la meilleure solution si elle était associée à une correction propre à chaque site instrumenté. Ces moniteurs ne sont pas forcément sensibles à la même gamme d'énergie de particules que le NRC, mais les variations de leurs signaux sont bien corrélées (Asipenka et al., 2007).

L'atténuation du rayonnement cosmique par le manteau neigeux est donc établie de la façon suivante : la mesure du capteur RC d'altitude est d'abord corrigée de la variation de pression puis de la variation relative de la référence choisie (ici celle de Moscou) et, enfin, divisée par un paramètre β qui représente l'effet de site. Ce paramètre, bien que lié essentiellement à l'altitude relative du site par rapport au signal de référence, est fixé dans la pratique grâce à la calibration réalisée sur site à l'aide de sondages manuels.

2.3 La courbe d'étalonnage atténuation-équivalent en eau

Une courbe d'étalonnage reliant l'équivalent en eau au comptage du capteur RC a été établie expérimentalement en plaçant un capteur sous différentes lame d'eau connues, tout en mesurant en parallèle le rayonnement « hors d'eau » et la pression atmosphérique (figure 3).



Figure 3. La piscine d'étalonnage du capteur RC pour l'élaboration de la relation entre l'atténuation du rayonnement cosmique et l'équivalent en eau situé au dessus du capteur.

2.4 Calibration par des sondages in situ

Comme nous l'avons vu aux paragraphes 2.2 et 2.3, l'équivalent en eau s'obtient à l'aide de trois corrections successives (pression atmosphérique, rayonnement incident, effet de site) et d'une courbe d'étalonnage. La calibration par des sondages permet d'évaluer le paramètre β , représentant l'effet de site (nature et humidité du sol environnant le capteur) et sans

doute également d'autres incertitudes et approximations.

Cette calibration consiste à évaluer deux à trois fois par an, par des sondages, l'équivalent en eau de la neige présente au dessus du capteur. Un sondage consiste à mesurer l'équivalent en eau du manteau neigeux à l'aide de plusieurs carottages (5 en pratique) puis pesées de ces carottes de neige. A l'issue de la saison, le coefficient de calibration β est ajusté de manière à minimiser l'écart entre les sondages de la saison et les mesures du NRC correspondantes (figure 4). Les mesures de la saison en cours sont établies provisoirement avec le coefficient β de la saison précédente.

Avec aujourd'hui une dizaine d'années de recul, l'expérience montre que le coefficient β évolue les deux ou trois premières années, pour ensuite se stabiliser. Le tassement des matériaux naturels autour du capteur semble être la cause principale d'évolution de ce paramètre. Passée cette période, les sondages de calibration servent simplement de contrôle.

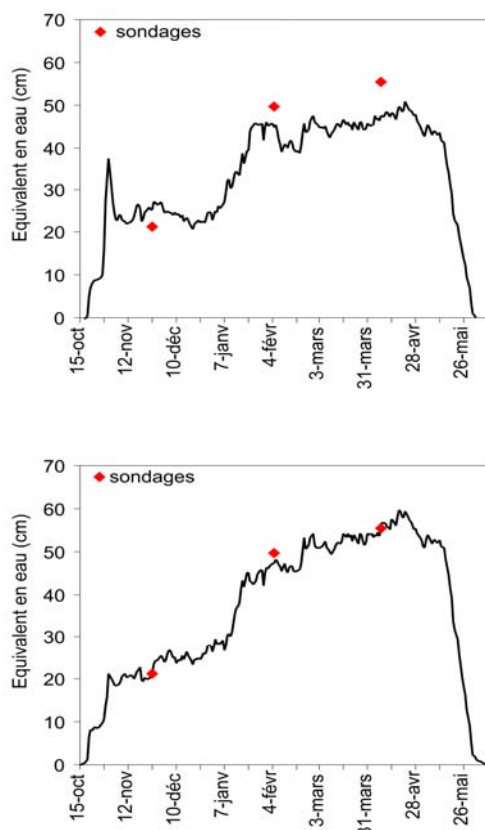


Figure 4. NRC de l'Isard, saison 2003-2004 : (en haut) chronique brut d'équivalent en eau et (en bas) après les trois corrections de pression atmosphérique, de rayonnement incident et d'effet de site.

2.5 Description de l'appareil NRC

Le NRC est une station de mesure complète, dont la pièce centrale est le capteur RC. Enterré à ras le sol (figure 5), il est situé à 3,5 m d'un mât de 6 m (4 m pour certains sites) qui supporte (figure 6) : les capteurs annexes (pression atmosphérique, température, hauteur de neige, vent, précipitation liquide), la centrale d'acquisition, la batterie et le panneau solaire ainsi que le système de transmission (radio ou GSM).



Figure 5. Le capteur RC du NRC de Spizeoles dans les Pyrénées



Figure 6. Une vue complète du NRC de Spizeoles l'été.

Aujourd'hui, EDF exploite 37 NRC en sites de montagne. Ils se répartissent sur le Jura (1), les Alpes du Nord (10), les Alpes du Sud (9), le Massif Central (5) et les Pyrénées (12).

3 INCERTITUDE DE MESURE

La question de l'incertitude du NRC sur la mesure de l'équivalent en eau est régulièrement posée et sa quantification a déjà été abordée par Paquet & Laval (2006). A la fin de l'hiver 2010, sur un total de 321 année-station, EDF disposait de 1037 sondages de calibration, présentés sur le graphique de la figure 7.

La droite de régression entre équivalents en eau déduits du signal NRC et ceux mesurés par sondage présente une ordonnée à l'origine de 2.6 mm et une pente de 0.99, pour un coefficient de corrélation r^2 égal à 0.98. L'absence de biais est due au processus de calibration qui minimise par construction le carré des écarts entre NRC et sondages. Néanmoins c'est un résultat intéressant puisque les paramètres β n'ont pas été modifiés depuis plusieurs années pour les capteurs dont l'environnement n'a pas été modifié. Ce qui confirme l'excellente stabilité de la mesure dans le temps. De plus, le coefficient de corrélation, d'un niveau particulièrement élevé, permet d'avoir une excellente confiance en ce signal. 71% des points sont compris dans un intervalle à $\pm 10\%$ et 88% des points dans un intervalle à $\pm 20\%$.

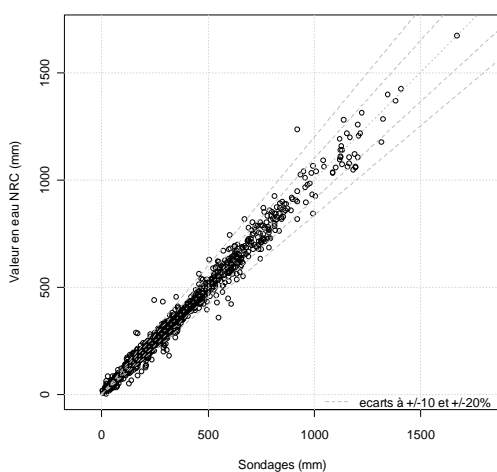


Figure 7. Comparaison des sondages de calibration et des valeurs NRC pour 37 appareils de mesures (321 année-station, 1037 sondages).

Après calibration, les mesures produites par les NRC sont donc sans biais et très bien corrélées aux sondages, cela sur une très large gamme de valeurs d'équivalent en eau : de 0 à près de 1700 mm. Les écarts au sondage les plus importants s'expliquent souvent par des conditions nivologiques particulières qui impactent aussi bien la mesure du capteur que le sondage lui-même : le transport par le vent ou un manteau gorgé d'eau évoluant très rapidement et difficile à mesurer par exemple. Pour collecter des données exploitables, il faut éviter

de sonder à des moments où la dynamique de transformation du manteau est importante et essayer d'échantillonner au mieux l'angle solide à l'aplomb du capteur RC.

CONCLUSION

Le nivomètre à rayonnement cosmique est un appareil de mesure automatique qui apparaît avec le recul particulièrement fiable et précis. Déployé par EDF à l'échelle des enjeux de son parc de production, il est aujourd'hui une pièce maîtresse dans l'élaboration des prévisions d'apport aux ouvrages hydroélectriques. Comme beaucoup de mesures environnementales, des calibrations in-situ sont nécessaires pour corriger les formulations théoriques afin de produire des données de qualité conformes aux réalités du site considéré et aux séries historiques éventuellement disponibles sur celui-ci (Morin et al., 2012). La collecte de données d'équivalent en eau en temps réel et sur des faibles pas de temps permet par ailleurs d'envisager une valorisation directe dans la modélisation hydrologique (Paquet, 2004). L'apport de ces mesures d'altitude est indéniable pour l'estimation des précipitations en montagne et dans la compréhension des mécanismes de fonte du manteau neigeux.

REFERENCES

- Asipenka A.S., Belov A.V., Eroshenko E.F., Klepach E.G., Yanke, V.G., 2007 : Interactive database on the cosmic ray anisotropy. Proceedings of the 30th International Cosmic Ray Conference, 1, 761-764.
- Kodama M., Kawasaki S., Wada M., 1975 : A cosmic ray snow gauge. International Journal of Applied Radiation and Isotopes, 26, 774-775.
- Kodama M., Nakai K., Kawasaki S., Wada M. 1979 : An application of cosmic-ray neutron measurements to the determination of the snow water equivalent. Journal of Hydrology, 41(1-2), 85-92.
- Morin S., Lejeune Y., Lesaffre B., Panel J.-M., Poncet D., David P., and Sudul M., 2012 : A 18-yr long (1993–2011) snow and meteorological dataset from a mid-altitude mountain site (Col de Porte, France, 1325 m alt.) for driving and evaluating snowpack models. Earth Syst. Sci. Data Discuss., 5, 29-45.
- Paquet E., 2004 : Évolution du modèle hydrologique MORDOR : modélisation du stock nival à différentes altitudes. La Houille Blanche, 2, 75-82.
- Paquet E., Laval M., 2006 : Retour d'expérience et perspectives d'exploitation des Nivomètres à Rayonnement Cosmique d'EDF. La Houille Blanche, 2, 113-119.
- Tourasse P., 1995 : La télénivométrie et la prévision des apports de remplissage des réservoirs EDF. La Houille Blanche, 5-6, 92-97.