

Analyse de données d'étalonnage sur un parc d'anémomètres

Sullivan Lechêne^{1*}, Bertrand Blanquart², et Jean-Raymond Fontaine¹

¹Institut National de Recherche et de Sécurité, 54500 Vandoeuvre-Lès-Nancy, France

²[mƏzyR], 54600 Villers-Lès-Nancy, France

Résumé. De 2008 à 2014, l'INRS a disposé d'une soufflerie d'étalonnage accréditée, principalement utilisée pour le compte des CARSAT. Au cours de ces années de fonctionnement, l'INRS a accumulé une importante base de données, représentant environ 3700 points de mesure de vitesses. Suite à l'arrêt de l'accréditation de cette soufflerie, l'INRS a décidé d'exploiter cette base de données en vue d'optimiser le suivi et le contrôle des anémomètres des CARSAT. L'analyse de ces données d'étalonnage s'est attachée à évaluer les principales tendances sur le comportement des anémomètres, en vue de répondre aux questions suivantes : quels sont les niveaux moyens des erreurs de justesse des anémomètres et les spécifications fournies par les constructeurs sont-elles un indicateur fiable de ces erreurs ? Quelle est la dérive de ces appareils au cours du temps et peut-on définir une périodicité d'étalonnage optimale ? Il ressort de l'analyse que les erreurs de justesse et les dérives moyennes des anémomètres sont généralement conformes aux besoins spécifiés. Toutefois, il s'avère tout de même indispensable de vérifier périodiquement la performance des appareils à cause de dérives accidentelles non prévisibles, observées sur environ 10 % du parc. La périodicité d'étalonnage devra par ailleurs être fixée « arbitrairement » puisqu'aucune périodicité optimale n'a pu être dégagée.

1 Introduction

De 2008 à 2014, l'INRS (Institut National de Recherche et de Sécurité pour la prévention des accidents du travail et des maladies professionnelles) a disposé d'une soufflerie d'étalonnage [1] accréditée COFRAC [2], principalement utilisée pour l'étalonnage des anémomètres des Centres de Mesures Physiques des CARSAT (Caisses d'Assurance Retraite et de Santé au Travail).

Les Centres de Mesures Physiques interviennent en entreprise pour identifier, mesurer et analyser les différents risques auxquels les salariés sont exposés et proposent les solutions de prévention les plus adaptées à la situation de travail. Durant leurs campagnes de mesures sur site, les contrôleurs de sécurité sont amenés à utiliser divers instruments de mesure et notamment des anémomètres. Ces centres doivent par conséquent mettre en place une surveillance métrologique de leurs équipements, afin de garantir la confiance dans les valeurs mesurées.

Suite à l'arrêt de l'accréditation de sa soufflerie, l'INRS a décidé d'accompagner les CARSAT dans la gestion de leur parc d'anémomètres, en vue d'optimiser le coût global des étalonnages, en cherchant à limiter le nombre de points de contrôle et leur fréquence. Pour ce faire, l'INRS a décidé dans un premier temps d'analyser les résultats d'étalonnage accumulés pendant la période de

fonctionnement de la soufflerie. Les objectifs sont de dégager des tendances sur le comportement du parc d'anémomètres et, si possible, d'en ressortir une périodicité d'étalonnage optimale. Les conclusions tirées de cette analyse serviront ensuite de base pour définir une stratégie de contrôle des anémomètres à proposer aux Centres de Mesures Physiques.

Les équipements de mesure concernés sont des anémomètres à fil chaud pour lesquels il n'existe pas d'exigence réglementaire sur la périodicité d'étalonnage. Par ailleurs, les Centres de Mesures Physiques ne sont pas eux-mêmes soumis aux exigences d'accréditation, et les seules exigences externes sont celles de la norme NF EN ISO 9001 [3] : « lorsqu'il est nécessaire d'assurer des résultats valables, les équipements de mesure doivent être étalonnés et/ou vérifiés à intervalles spécifiés ou avant leur utilisation, par rapport à des étalons de mesure reliés à des étalons de mesure internationaux ou nationaux ». La norme NF EN ISO 10012 [4] évoque le concept d'intervalles de confirmation métrologique en précisant, là encore, qu'ils ne sont pas obligatoirement fixes et qu'ils peuvent être ajustés si nécessaire.

Le présent document présentera tout d'abord une description de la soufflerie d'étalonnage de l'INRS et les incertitudes d'étalonnage associées. Des données générales sur les étalonnages menés pendant la période de fonctionnement de la soufflerie seront ensuite

fournies avant de rentrer dans l'analyse plus fine des résultats, en se basant sur les lignes directrices suivantes : examen des erreurs de justesse et des dérives, périodicité optimale d'étalonnage, spécifications des constructeurs.

2 Soufflerie d'étalonnage

La méthode d'étalonnage est basée sur le mesurage simultané de deux vitesses d'air dans la veine de mesure de la soufflerie : la vitesse de référence fournie par anémométrie laser et la vitesse fournie par l'anémomètre soumis à étalonnage. L'erreur de justesse de l'anémomètre est la différence entre la vitesse relevée sur l'anémomètre à étalonner et la vitesse de référence.

La soufflerie d'étalonnage (Figure 1) est composée de deux circuits aérauliques distincts. Le premier circuit (Figure 2) est utilisé pour des vitesses d'étalonnage faibles, comprises entre $0,2 \text{ m.s}^{-1}$ et $1,5 \text{ m.s}^{-1}$. La deuxième boucle (Figure 3) est dédiée aux étalonnages à des vitesses plus élevées, comprises entre $1,5 \text{ m.s}^{-1}$ et 30 m.s^{-1} . Le système complet est régulé en température afin de maintenir l'écoulement d'air dans des conditions identiques pour tous les points de mesure de vitesse réalisés. Cette consigne de température est fixée à $21^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$ et la soufflerie est elle-même placée dans une pièce climatisée.

L'anémomètre à étalonner est placé dans la veine de mesure, de section carrée de 250 mm par 250 mm et d'une longueur de 400 mm .



Fig. 1. Soufflerie d'étalonnage de l'INRS.

La vitesse de référence est mesurée par anémométrie laser. Cette technique optique permet de mesurer localement la vitesse du fluide grâce à de fines particules utilisées comme traceur de l'écoulement. Le principe consiste à interférer deux faisceaux laser à la position de mesure souhaitée, ce qui crée un volume de contrôle. Les particules traversant ce volume de contrôle diffusent un signal lumineux. La fréquence de ce signal permet de connaître la vitesse des particules et ainsi la vitesse locale du fluide. Dans le cas de la soufflerie d'étalonnage, la veine de mesure estensemencée par des gouttelettes d'huile.

La vitesse de référence est établie en apportant trois corrections aux mesures fournies par l'anémomètre laser. La première est la correction d'étalonnage de l'anémomètre laser (étalonnage réalisé au CETIAT, référence nationale sur cette grandeur). La deuxième correction est destinée à compenser l'augmentation de vitesse engendrée par la mise en place de l'anémomètre à étalonner, qui va réduire la surface de passage de l'écoulement dans la veine. La dernière correction permet de compenser la différence entre la vitesse mesurée par le laser au point de référence et la vitesse mesurée à l'endroit où est placé l'anémomètre à étalonner, c'est-à-dire au centre du volume de mesure. Dans notre étude, il s'avère que les premiers étalonnages n'ont pas subi l'ensemble de ces corrections. Ces corrections étant négligeables, ou constantes au cours du temps pour un anémomètre donné, nous avons décidé de travailler avec la vitesse de référence brute mesurée par laser sans application de ces corrections, afin de rendre l'ensemble des résultats plus homogènes et comparables.

La réponse de l'anémomètre thermique à étalonner est influencée par la masse volumique de l'air, donc par la température, l'humidité et la pression. Les étalonnages sont tous réalisés à la température standard (21°C) et une étude expérimentale menée dans la soufflerie a montré que l'humidité a une influence négligeable. En conséquence, seule la pression est prise en compte dans la correction de la masse volumique.

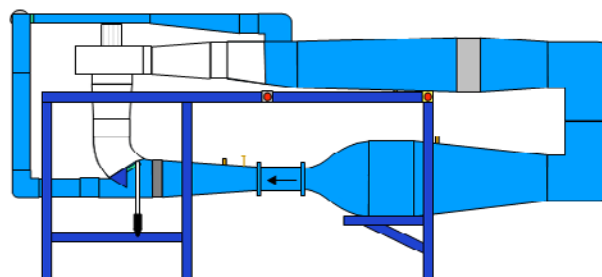


Fig. 2. Boucle petite vitesse : circuit aéraulique.

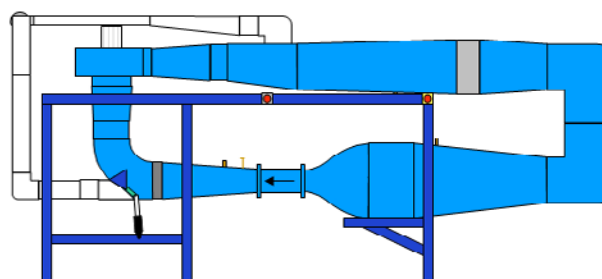


Fig. 3. Boucle grande vitesse : circuit aéraulique.

Les incertitudes d'étalonnage ont été estimées en tenant compte des différentes composantes d'incertitudes sur l'ensemble du processus de mesure [5] : anémomètre de référence (étalonnage, dérive, résolution), soufflerie (stabilité et homogénéité de la vitesse dans la veine de mesure, alignement de l'écoulement dans la veine), mesure de la pression dans la veine (étalonnage, dérive, résolution, dispersion), anémomètre client (fidélité, résolution), méthode de mesure (alignement du système

d'axe de l'anémomètre laser avec l'écoulement dans la veine, différence des lieux de mesure entre le laser et l'anémomètre à étalonner).

Les incertitudes d'étalonnage établies pour un anémomètre standard sont fournies dans la Table 1, pour quatre vitesses. Les valeurs des incertitudes démontrent le niveau de métrologie de la soufflerie et permettent d'avoir confiance dans les résultats d'étalonnage.

Table 1. Incertitudes d'étalonnage de la soufflerie.

Vitesse (m/s)	Incertitude (m/s) (95 %)	Incertitude (%)
0,2	0,011	5,7
1	0,033	3,3
5	0,14	2,8
30	0,82	2,7

3 Données générales

Au total, 323 étalonnages ont été réalisés durant la période de fonctionnement de la soufflerie (2008-2014), sur 110 anémomètres différents, ce qui représente environ 3700 points de mesure de vitesse répartis sur une gamme allant de 0,2 m.s⁻¹ à 30 m.s⁻¹.

Le nombre d'étalonnages a augmenté progressivement d'année en année (Fig. 4) avec un facteur quasiment de 2,5 entre la première et la dernière année d'étalonnage. Cette évolution indique tout d'abord une meilleure prise en considération du besoin de vérification des appareils de mesure utilisés. Par ailleurs, cette croissance signifie que les anémomètres étudiés n'ont pas tous été étalonnés périodiquement de manière systématique. En effet, une périodicité d'étalonnage a été observée sur environ 55 % des anémomètres (un étalonnage par an pour environ 25 % des appareils et un étalonnage tous les 2 ans sur environ 30 % des appareils). A noter que le nombre élevé d'étalonnages de la dernière année est probablement impacté en partie par l'annonce de l'arrêt de la soufflerie d'étalonnage.

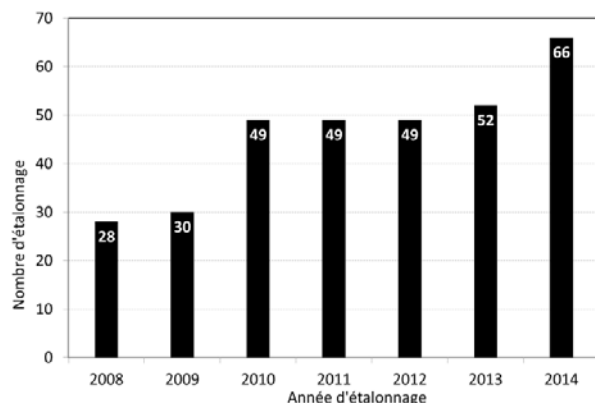


Fig. 4. Nombre d'étalonnages par année.

Sur ce parc d'anémomètres, 10 constructeurs différents ont été identifiés. La répartition du nombre

d'anémomètres par constructeur est très inhomogène avec un constructeur largement surreprésenté : 53 % des appareils sont issus de cette marque (58 % des points d'étalonnage). A titre d'information, la deuxième marque la plus représentée ne concerne que 12 % des anémomètres (12 % des points d'étalonnage). De ce fait, il a été décidé qu'une analyse par constructeur n'était pas opportune, les nombres d'anémomètres de chaque constructeur étant trop différents les uns des autres pour fournir des conclusions représentatives.

4 Analyse

4.1 Justesse et dérive

4.1.1 Calcul des erreurs de justesse et de la dérive

Les certificats d'étalonnage nous fournissent directement les erreurs de justesse en m.s⁻¹, écarts entre la vitesse mesurée par l'anémomètre client V_i et la vitesse de référence mesurée par laser V_r , tels que :

$$\Delta V_n = V_i - V_r \quad (1)$$

Dans le cadre de notre étude, la dérive peut être évaluée par rapport à un état de référence ou par l'écart entre deux étalonnages successifs. Nous avons privilégié l'écart par rapport à un état de référence, qui est le premier étalonnage de l'appareil à l'INRS. Ce choix a été fait pour éviter qu'un écart important lors d'un étalonnage impacte directement deux dérives successives, et pour s'affranchir de la courbure liée à l'allure de la réponse nominale de l'anémomètre. La dérive se calcule alors comme suit :

$$D_n = \Delta V_n - \Delta V_{ref} \quad (2)$$

Où ΔV_{ref} représente l'erreur de justesse de référence pour un anémomètre donné à une vitesse donnée, lors du premier étalonnage réalisé dans la soufflerie ;

Et ΔV_n représente l'erreur de justesse mesurée pendant un étalonnage ultérieur de ce même anémomètre, pour la même vitesse.

4.1.2 Réponses type et familles de réponse

Les figures 5 et 6 fournissent un exemple de réponse type d'un anémomètre lors de son étalonnage (évolution des erreurs de justesse sur la figure 5 et évolution des dérives sur la figure 6).

Sur cet exemple type, l'allure de la courbe d'évolution des erreurs de justesse présente un profil incurvé avec un point d'inflexion aux alentours de 5 m.s⁻¹. Même si les erreurs de justesse restent dans l'ensemble relativement faibles (toujours inférieures à 5 %), les niveaux atteints sont plus élevés et inhomogènes dans la gamme des faibles vitesses (inférieures à 1,5 m.s⁻¹), en raison pour partie des incertitudes d'étalonnage et pour partie des performances intrinsèques des anémomètres. Au-delà de cette vitesse, les erreurs de justesse se stabilisent et restent faibles.

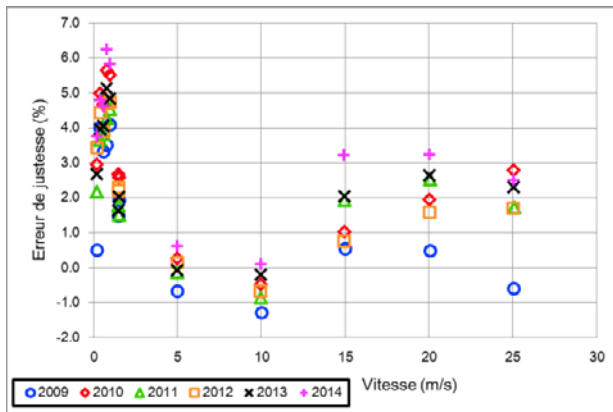


Fig. 5. Réponse type d'un anémomètre (erreur de justesse).

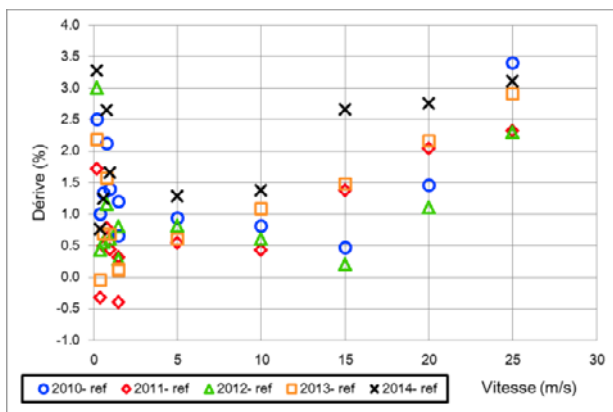


Fig. 6. Réponse type d'un anémomètre (dérive).

Ces évolutions se ressentent également sur les dérives, où une allure similaire de courbe est observée. Là encore, les niveaux de dérives restent relativement faibles, en étant toujours inférieurs à 5 %. Une zone dans les faibles vitesses où les dérives sont plus disparates est de nouveau observée. En revanche, le comportement est différent dans la gamme des grandes vitesses avec une augmentation progressive de la dérive. Cela s'explique principalement par le calcul de la dérive, qui considère la première année d'étalonnage comme référence. De ce fait, comme la valeur de l'erreur de justesse de référence (en 2009, marqueurs de type cercle) est légèrement différente par rapport aux autres étalonnages, la dérive augmente obligatoirement. Toutefois, les niveaux restent très proches d'année en année, signe que l'appareil dérive peu dans cette plage de vitesse.

Cet exemple illustre les difficultés d'interprétation rencontrées au cours de l'analyse de chaque anémomètre.

Un travail de synthèse a été mené pour distinguer des familles de réponses, pour les erreurs de justesse d'une part (Fig. 8) et pour les dérives d'autre part (Fig. 9), en fonction de la vitesse.

En ce qui concerne les erreurs de justesse, l'analyse des courbes d'évolution nous permet de dégager trois familles de réponses, dont l'une d'entre elles est largement représentée. En effet, près de 80 % des anémomètres ont une réponse similaire à l'exemple type

présenté précédemment et correspondant à l'allure 1 sur la figure 8. Cette famille de réponse se caractérise par des erreurs de justesse plus importantes pour les faibles vitesses, suivis d'une inflexion plus ou moins marquée, généralement comprise entre 1 m.s^{-1} et 2 m.s^{-1} (55 % des cas). Les deux autres familles de réponse sont minoritaires. Environ 12 % des anémomètres ont une réponse quasiment inverse de la réponse majoritaire avec cette fois-ci un point maximum, là encore généralement compris entre 1 m.s^{-1} et 2 m.s^{-1} . Le reste des anémomètres présente une réponse croissante plus ou moins incurvée.

Du point de vue des dérives (Fig. 9), les résultats sont moins tranchés, avec une répartition en trois familles distinctes : 45 % des anémomètres ont une réponse incurvée avec un point maximum, 35 % ont une réponse incurvée avec un point d'inflexion et 20 % ont une réponse relativement rectiligne, qu'elle soit croissante ou décroissante.

Pour les vitesses moyennes et fortes, une évolution globale de l'anémomètre est visible entre deux étalonnages. Par contre, pour les faibles vitesses, les dérives observées sont généralement très disparates, ce qui est imputable en partie aux incertitudes d'étalonnage, plus élevées pour les faibles vitesses.

Si une dérive globale de l'anémomètre est visible d'un étalonnage au suivant, il n'y a pas de tendance claire au cours des années et l'évolution générale au cours du temps présente un caractère « aléatoire ». En effet, comme illustré sur la figure 7 pour plusieurs anémomètres, les dérives des appareils ne sont pas progressives d'année en année. Ce comportement se retrouve sur l'ensemble des anémomètres, avec une dérive qui augmente ou diminue au cours des étalonnages, sans qu'il ne se dégage une évolution précise. De ce fait, il n'est pas possible de prédire l'évolution future de l'anémomètre, ce qui ne permet pas de définir une périodicité d'étalonnage optimale sur la base d'un calcul statistique [6].

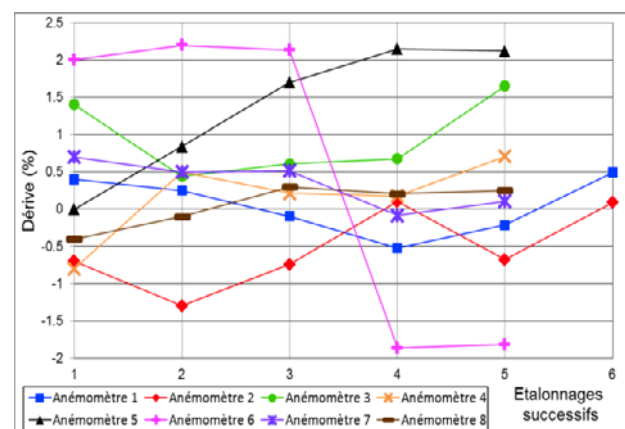


Fig. 7. Evolution de la dérive suivant plusieurs étalonnages successifs pour une vitesse de mesure de 1 m.s^{-1} .

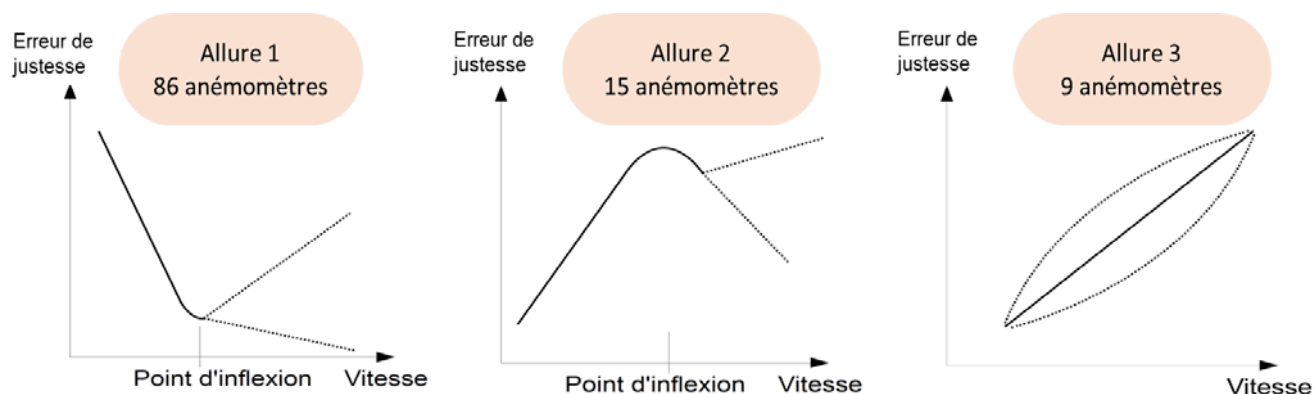


Fig. 8. Familles de réponse sur l'évolution des erreurs de justesse.

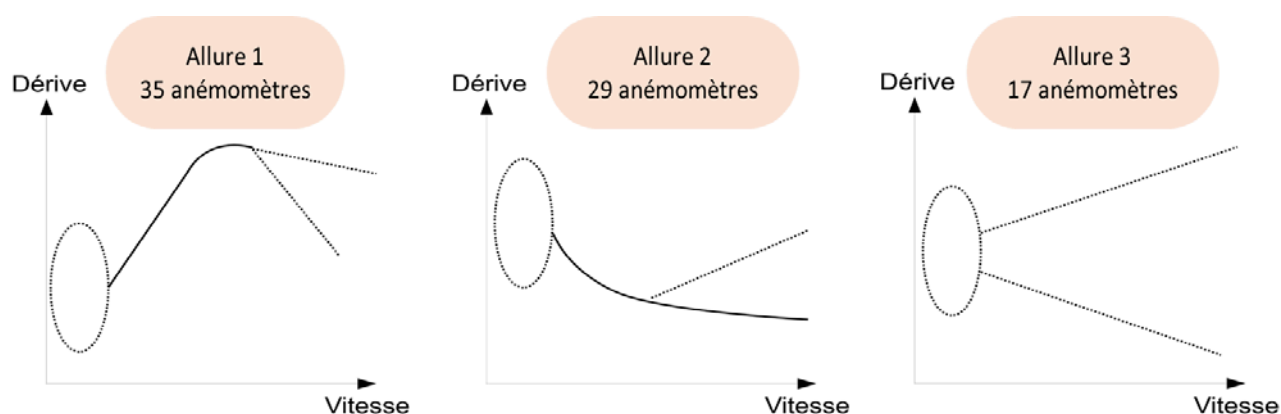


Fig. 9. Familles de réponse sur l'évolution des dérives.

4.1.3 Niveaux des erreurs de justesse et des dérives

Les valeurs moyennes des erreurs de justesse et des dérives obtenues sont répertoriées respectivement dans les tables 2 et 3 pour plusieurs plages de vitesse, en relatif (% de la vitesse de référence).

Pour les vitesses supérieures à 1 m/s, les erreurs sont relativement stables, avec des niveaux moyens autour de 4 %, et des dérives autour de 2 %. Cette tendance vient confirmer les allures de courbes d'évolutions présentées dans la section précédente. Toutefois, ces valeurs sont très dispersées puisque les écarts-types sont respectivement de 6 % et 3 % environ.

Pour les vitesses inférieures à 0,5 m.s⁻¹, les erreurs de justesse sont les plus élevées, avec un niveau moyen de quasiment 8 % alors qu'il est deux fois plus faible pour les autres vitesses. Dans cette gamme de vitesse, seulement 46 % des points de mesure présentent une erreur de justesse inférieure à 5 % alors qu'il est de l'ordre de 80 % pour les vitesses au-delà de 0,5 m.s⁻¹. Si nous observons le pourcentage de points de mesure dont l'erreur de justesse est inférieure à 10 %, la tendance est similaire même si la différence est plus réduite. En effet, environ 80 % de ces points ont une erreur inférieure à 10 % alors qu'on dépasse les 90 % dans les autres gammes de vitesses.

Du côté des dérives, les évolutions sont comparables, bien que moins marquées. Comme attendu, les dérives les plus élevées se situent là encore dans les basses vitesses (inférieures 0,5 m.s⁻¹). La donnée importante à retenir est que les dérives sont généralement inférieures à 5 % quelle que soit la gamme de vitesse, sauf pour les dérives accidentelles (présentées en 4.2).

4.1.4 Premières conclusions

L'analyse des erreurs de justesse et des dérives du parc d'anémomètres considéré a mis en évidence des particularités essentielles sur leur comportement au cours du temps.

La gamme des basses vitesses, inférieures à 0,5 m.s⁻¹, présente les erreurs de justesse et les dérives les plus élevées. Il conviendra donc d'être particulièrement vigilant pour une utilisation des appareils dans cette gamme de mesure. Il sera également essentiel qu'un point de vérification métrologique se situe dans cette plage de vitesse.

Au-delà de cette vitesse, les erreurs de justesse et les dérives sont plus réduites avec respectivement des niveaux généralement inférieurs à 10 % et 5 %, ce qui représente des niveaux compatibles avec les besoins des utilisateurs pour leurs campagnes de mesure en entreprise.

Par ailleurs, le comportement « aléatoire » de la dérive au cours du temps ne permet pas de définir une périodicité optimale d'étalonnage. L'existence de ces dérives aléatoires, non détectables en l'absence d'un étalonnage, confirme cependant la nécessité d'un suivi métrologique des anémomètres.

4.2 Accidents

L'exploitation des données a mis en évidence plusieurs « accidents », se caractérisant par une forte sous-estimation ou surestimation de la vitesse par l'anémomètre.

Un exemple-type d'accident est fourni sur la figure 9. L'évolution « classique » des erreurs de justesse est retrouvée pour les courbes qui ne concernent pas l'accident : erreurs plus élevées sur les faibles vitesses (mais toujours inférieur à 10 %), erreurs homogènes et faibles (environ 2 %) sur les plus fortes vitesses. Les dérives restent faibles sur l'ensemble de la gamme de vitesse avec un niveau largement inférieur à 2 %. Les niveaux atteints sont par conséquent très satisfaisants sur cet anémomètre qui ne présente pas a priori de dysfonctionnement particulier.

Toutefois, sur un étalonnage (courbe de l'année 2013 sur la Fig.9), les écarts vis-à-vis de la vitesse de référence ont soudainement augmentés pour atteindre au maximum 20 % sur les vitesses les plus élevées.

Sur l'ensemble du parc d'anémomètres, ce type d'accident a été identifié pour environ 10 % des appareils. Vu sous un autre angle, cette statistique peut s'interpréter de la manière suivante : en l'absence d'étalonnages périodiques permettant de détecter ces dérives accidentelles, le risque de mesures fortement erronées lors d'une campagne s'élèverait à 1 chance sur 10, ce qui est évidemment non négligeable. Il est également important de préciser que ces accidents ne sont pas tributaires d'un constructeur en particulier.

Cette statistique renforce la nécessité d'effectuer des vérifications régulières des anémomètres.

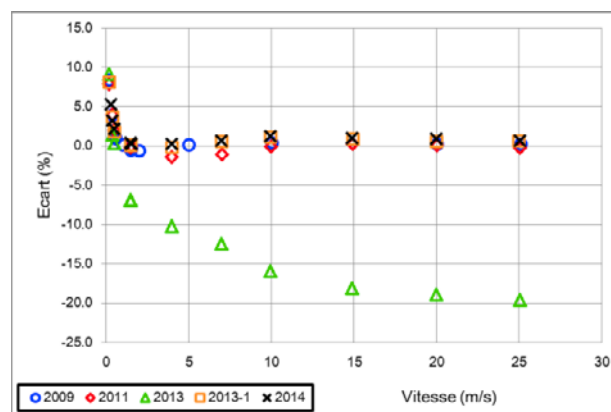


Fig. 9. Réponse type d'un anémomètre présentant un accident.

Table 2. Niveaux des erreurs de justesse pour plusieurs plages de vitesse

Plage de vitesse (m/s)	Nombre de points de mesure (%)	Erreur de justesse moyenne (%)	Écart-type (%)	Nombre de points avec une erreur < 1 % (%)	Nombre de points avec une erreur < 5 % (%)	Nombre de points avec une erreur < 10 % (%)
$V \leq 0,5$	27	7,6	7,9	8	46	79
$0,5 < V \leq 1$	15	3,9	4,4	21	78	92
$1 < V \leq 2$	22	3,3	4,6	30	83	93
$2 < V \leq 10$	17	2,8	3,6	33	86	95
$V > 10$	19	2,9	3,1	26	84	94

Table 3. Niveaux de dérive atteints pour plusieurs plages de vitesse

Plage de vitesse (m/s)	Nombre de points de mesure (%)	Dérive moyenne (%)	Écart-type (%)	Nombre de points avec dérive < 1 % (%)	Nombre de points avec dérive < 5 % (%)	Nombre de points avec dérive < 10 % (%)
$V \leq 0,5$	26	2,8	4,3	41	86	96
$0,5 < V \leq 1$	16	1,6	3,0	62	95	98
$1 < V \leq 2$	22	2,0	3,4	59	91	96
$2 < V \leq 10$	17	1,9	2,6	53	90	97
$V > 10$	19	1,8	2,0	48	89	99

Table 4. Impact des dérives accidentelles

	Plage de vitesse (m/s)	Nombre de points de mesure (%)	Nombre de points avec dérive < 5 % (%)	Nombre de points avec dérive < 10 % (%)
Avec anomalies	$V \leq 1$	42	89	96
	$V > 1$	58	81	88
Sans anomalie	$V \leq 1$	42	89	96
	$V > 1$	58	90	97

La Table 4 indique quelles gammes de vitesses sont majoritairement impactées par ces dérives accidentelles. Alors que les erreurs de justesse et dérives sont généralement plus élevées dans les basses vitesses, les accidents influent plus particulièrement sur les vitesses plus élevées, avec une erreur qui augmente quasi-proportionnellement à la vitesse. En effet, en prenant en considération ces accidents dans l'analyse de données, il y a une baisse de quasiment 10 % sur le nombre de points de mesure dont la dérive est inférieure à 5 % (ce taux est de 90 % sans prendre en compte les accidents alors qu'il n'est que de 81 % en les considérant).

Cette information est essentielle puisque ce sont ces gammes de vitesse qui sont majoritairement utilisées lors des campagnes sur site industriel. Il conviendra donc, lors d'un étalonnage d'un anémomètre, de réaliser des points de contrôle dans les vitesses élevées pour garantir la détection de ces situations.

L'origine de ces accidents est complexe à identifier puisque peu de données ont été recensées sur ce point lors des étalonnages. Sur les quelques cas où l'information est disponible, l'origine est souvent un encrassement de la sonde de mesure. Une opération de nettoyage de la sonde, si celle-ci n'a pas été endommagée, permet de retrouver des performances proches des performances initiales (étalonnages 2013-1 et 2014 sur la figure 9).

Bien que ces accidents ne soient pas prévisibles, ils peuvent tout de même être grandement limités. En effet, l'encrassement de la sonde de mesure ne peut être consécutif qu'à une utilisation de l'appareil dans des conditions critiques. Pour réduire ces éventuels dysfonctionnements, il peut être envisagé de contrôler systématiquement les anémomètres après une utilisation pouvant amener à un encrassement de la sonde ou d'éviter une utilisation de ce type d'appareil dans des conditions sévères.

4.3 Spécifications des constructeurs

Une mise en parallèle entre les valeurs de vitesse mesurées dans la soufflerie et les spécifications fournies par les constructeurs a été menée. Pour ce faire, les spécifications des constructeurs de chaque sonde de mesure ont été répertoriées et transcrites en un intervalle d'« erreur maximale garantie ». Cet intervalle a été

appliqué à la valeur de vitesse fournie par l'anémomètre client, pour chaque point de mesure. Puis, l'analyse a consisté à observer si la vitesse de référence était bien comprise dans cet intervalle.

Au total, 70 % des points de mesure sont conformes à la spécification indiquée par les constructeurs. Les faibles vitesses (inférieures à 1 m.s^{-1}) sont les plus impactées avec uniquement 59 % de points de mesure compris dans l'intervalle spécifié (Table 5). Pour des vitesses supérieures, quasiment 75 % des points de mesure sont conformes. Cette statistique par plage de vitesse coïncide de manière logique avec les résultats obtenus précédemment et qui montraient des niveaux d'écart bien supérieurs dans la gamme des faibles vitesses.

Cette information est rassurante sur les performances moyennes du parc d'anémomètre étudié puisqu'une majorité des points de mesure sont conformes. En revanche, la statistique complémentaire - c'est-à-dire que 30 % des points de mesure sont non conformes, et quasiment 40 % dans la gamme des faibles vitesses - nous invite à la prudence et renforce de nouveau la nécessité d'opérations métrologiques pour s'assurer de la performance individuelle de chaque instrument.

Table 5. Conformité vis-à-vis des spécifications des constructeurs

Plage de vitesse (m/s)	Nombre de points de mesure (%)	Nombre de points conformes (%)
$V \leq 1$	42	59
$V > 1$	58	73

5 Conclusion générale

L'INRS a accumulé un grand nombre de données d'étalonnage d'anémomètres durant la période de fonctionnement de sa soufflerie. Les incertitudes très basses de la soufflerie permettent d'avoir confiance dans les résultats d'étalonnage et dans les diverses conclusions issues de l'étude. L'objectif initial de cette étude consistait à appréhender le comportement des anémomètres au cours du temps afin d'améliorer la gestion de ce parc d'appareils.

Dans l'ensemble, les performances obtenues sur ces anémomètres confirment leur adéquation avec les

besoins des utilisateurs dans leurs missions en entreprise. Dans le détail, les erreurs de justesse et les dérives sont plus élevées dans la gamme des vitesses faibles (inférieures à $0,5 \text{ m.s}^{-1}$), en raison des performances intrinsèques des anémomètres mais également en raison de la plus forte influence des incertitudes d'étalonnage dans cette zone, avec des différences beaucoup moins marquées pour la dérive.

Par ailleurs, le caractère aléatoire de la dérive ne permet pas de prévoir son évolution et par conséquent de définir une périodicité optimale d'étalonnage.

Bien que les dérives soient relativement faibles en moyenne, plusieurs anémomètres ont connu des accidents synonymes d'une forte modification de la courbe de réponse de l'anémomètre. Au total, 10 % des appareils étudiés ont subi ce type de désagrément. L'origine provient principalement d'un encrassement de la sonde. Il est important de souligner que ces accidents impactent plus particulièrement les vitesses élevées. Rappelons que, dans le contexte particulier des missions en entreprise, l'utilisation de plusieurs anémomètres afin de détecter une dérive accidentelle de l'un d'entre eux n'est pas envisageable.

Côté spécifications des constructeurs, les intervalles d'erreur maximale indiqués sont plutôt cohérents puisque 70 % des points de mesure sont conformes. Là encore, ce sont les points de mesures dans les vitesses faibles qui sont les plus impactés.

Toutes ces statistiques amènent au même constat : il est nécessaire de vérifier périodiquement les anémomètres pour s'assurer de leur performance et limiter les risques de réaliser des mesurages avec de fortes erreurs de mesure, liées à des dérives accidentelles. Par contre, la définition d'une période « optimale » se heurte d'une part au fait que ces dérives accidentelles ne sont pas ou peu prévisibles et d'autre part que les dérives « normales » ont un caractère aléatoire en direction et en amplitude.

En vue de développer une méthode de vérification, plusieurs éléments essentiels à considérer sont issus de l'analyse des données d'étalonnage. En premier lieu, il sera nécessaire de définir une périodicité fixe puisqu'il

n'est pas possible de se baser sur la dérive des appareils et l'ajuster en fonction des besoins. Si les faibles niveaux de dérive permettent d'envisager des périodicités plus larges, il faudra tout de même être vigilant à d'éventuelles dérives accidentelles. A ce sujet, il pourrait être opportun de réaliser des contrôles en-dehors de la périodicité définie, suivant l'utilisation faite ou prévue de l'anémomètre : par exemple après une campagne de mesure dans des conditions sévères pour vérifier le bon fonctionnement de l'appareil ou avant une campagne de mesures sensible. Par ailleurs, les erreurs de justesse et dérives n'étant pas homogènes sur toute la gamme de vitesses, il sera nécessaire de contrôler l'anémomètre à plusieurs points de vitesse. Cet aspect est renforcé d'une part, par des erreurs de justesse plus fortes sur les vitesses faibles et d'autre part, par un impact des accidents plus important dans les vitesses élevées. Le choix de ces points pourra évidemment être ajusté en fonction de l'utilisation des anémomètres.

Références

1. INRS, Manuel Qualité de la soufflerie d'étalonnage, Référence Q-730-08S-M-01, Version 12, Avril 2013.
2. COFRAC, Rapport d'évaluation NLABO-13-0035, référentiel : document Cofrac LAB REF 02 (NF EN ISO/CEI 17025), Juin 2013.
3. AFNOR, Système de management de la qualité – Exigences, Norme NF EN ISO 9001, Indice de classement : X 50-131 (Novembre 2008).
4. AFNOR, Systèmes de management de la mesure – Exigences pour les processus et les équipements de mesure, Norme NF EN ISO 10012, Indice de classement : X07-009 (septembre 2003).
5. INRS, Détermination des incertitudes d'étalonnage des anémomètres, Référence Q-730-08S-PR-21, Version 8, Février 2012.
6. AFNOR, Métrologie - Optimisation des intervalles de confirmation métrologique des équipements de mesure, Fascicule de Documentation FD X 07-014, Indice de classement : X07-014 (novembre 2006).