

Développement d'un générateur d'air humide à dilution

Eric GeorGIN^{1,a}, Bruno Bondoux¹, Nicolas Bernard¹, Marzougui Salem¹

CETIAT, 25 Avenue des Arts, BP 52042, 69603 Villeurbanne Cedex, France

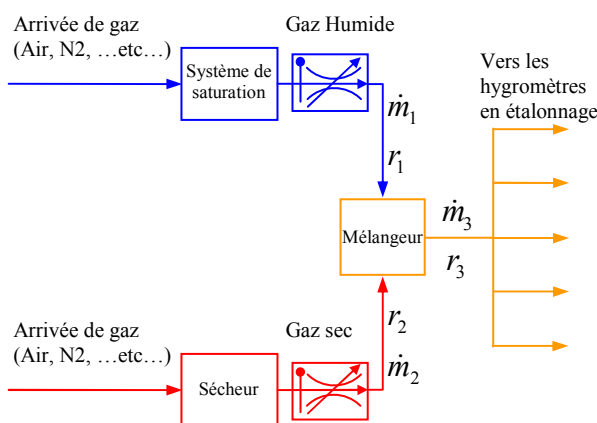
Abstract. Since more than 20 years the hygrometry laboratory at LNE-CETIAT developed its own calibration facility in order to improve the French national reference in humidity. Facilities are mainly based on humid generator providing, to hygrometers to be calibrated, humid gas, metrologically controlled. These calibration benches worked with air at atmospheric pressure according to a closed loop circulation. This may lead to some limitation in terms of calibration conditions such as type of gas, working pressure, pressure drop, or time duration for reaching equilibrium state prior to calibration. The LNE-CETIAT started the development of a humid air generator based on dilution principle generation. The aim is to realize a mixture of dry gas and a humid gas by controlling the flow of each type of gas. Thus the final moist air generated is function of each flow, the amount of moisture of the humid gas and the working pressure. This work present the characterization with the very first results obtained with this generator obtained in these working conditions.

1 Introduction

1.1 Présentation (rappel)

Cette installation a fait l'objet d'une présentation détaillée dans la référence [1]. Toutefois afin de faciliter la compréhension et les descriptions ultérieures, le schéma de principe est rappelé ci-dessous.

Figure 1. Schéma de principe



\dot{m}_x correspond au débit massique, de gaz humide – indice 1, de gaz sec – indice 2 et du mélange obtenu – indice 3.

r_x correspond rapport de mélange, du gaz humide – indice 1, du gaz sec – indice 2 et du mélange obtenu – indice 3.

La relation permettant de déterminer la teneur en humidité délivrée est la suivante :

$$r_3 = \frac{r_1 \cdot \dot{m}_1 + r_2 \cdot \dot{m}_2}{\dot{m}_3} \quad (1)$$

La référence [2] permettra au lecteur de relier le rapport de mélange à la température de rosée qui est utilisé dans ce travail pour mesurer la teneur en humidité du gaz étudié.

Figure 2. Système de génération



Trois possibilités sont offertes pour ajuster l'humidité du banc à dilution :

^a Corresponding author: eric.georGIN@cetiat.fr

- Modification de la température du système de saturation, ce qui entraîne un changement de la teneur en humidité du gaz humide

- Modification de la pression de travail, ce qui entraîne un changement du rapport de pression entre la zone de génération et la zone de mesure

- Modification des débits de gaz sec et de gaz humide ce qui entraîne le changement du rapport de dilution

Du fait du nombre de combinaisons possibles pour la génération, les paramètres suivants, au niveau du système de saturation, ont été conservés constants : la température, la pression interne et le débit.

1.2 Évolutions

L'ensemble de l'instrumentation employée pour le contrôle de l'installation est présentée dans la référence [1]. Néanmoins une modification notable a été apportée au régulateur de débit de la ligne de gaz humide. En effet pour pallier quelques instabilités, constatées principalement en bas de la gamme d'utilisation, la vanne de régulation associée au débitmètre a été remplacée par deux vannes.

Figure 3. Régulateurs de débit : avec une vanne de régulation (en bas) et avec deux vannes de régulation (en haut)



En situation d'étalonnage, la diminution des fluctuations observées, sur l'étendue de la plage étalonnée (typiquement $2,3 \cdot 10^{-5}$ kg/s à $1,3 \cdot 10^{-3}$ kg/s), va d'un facteur 3 à un facteur 6. Le gain le plus important étant au bas de la gamme. Une modification analogue sera prochainement apportée au régulateur de débit de la ligne de gaz sec.

Le système de saturation était initialement constitué de deux saturateurs placés en série et en amont du régulateur de débit. Le premier servait à réaliser une « pré-saturation », le deuxième, quant à lui, servait à assurer la saturation complète et finale du gaz à la valeur de la température de rosée ou de gelée désirée. Ces deux saturateurs étaient immergés dans un bain thermostaté. Afin de rendre cette installation compacte, robuste et plus facile à transporter, le système de saturation a été simplifié. Il est maintenant constitué d'un saturateur unique à l'intérieur duquel le gaz à saturer transite. L'évaluation de l'efficacité de la saturation obtenue, telle que présentée dans [3], fera l'objet d'une étude plus poussée. Ce saturateur est équipé de deux sondes de température de type Pt 100, il est thermalisé à une température voisine de la température ambiante.

2 RÉSULTATS D'ESSAIS DE CARACTÉRISATION

Pour évaluer les performances de cette installation un hygromètre de transfert est connecté sur la ligne de distribution. L'hygromètre est un MBW modèle DP30, il est étalonné au laboratoire d'hygrométrie du LNE-CETIAT.

L'ensemble de l'instrumentation est étalonnée auprès de laboratoires du CETIAT accrédités COFRAC.

Tableau 1. Tableau de synthèse des résultats obtenus.

Instrument	Plage	$U_{k=2}$
Chaîne de température	de -30°C à $+215^{\circ}\text{C}$	$0,03^{\circ}\text{C}$
Capteur MKS 5000 torr	de 80000 Pa à 660000 Pa	de 16 Pa à 35 Pa
Capteur MKS 1000 torr	de 80000 Pa à 130000 Pa	13 Pa
Hygromètre MBW DP30	de -80°C à $+10^{\circ}\text{C}$	de $0,3^{\circ}\text{C}$ à $0,06^{\circ}\text{C}$
ALICAT MC-100SLPM (gaz sec)	de $1 \text{ dm}^3/\text{min}$ à $100 \text{ dm}^3/\text{min}$	de $0,038 \text{ dm}^3/\text{min}$ à $0,35 \text{ dm}^3/\text{min}$
ALICAT MC-100SLPM (gaz humide)	de $1 \text{ dm}^3/\text{min}$ à $100 \text{ dm}^3/\text{min}$	de $0,027 \text{ dm}^3/\text{min}$ à $0,25 \text{ dm}^3/\text{min}$

Les résultats présentés ci-après ont été réalisés avec de l'air provenant du réseau d'air comprimé « ultra-sec » du CETIAT.

2.1 La ligne de gaz humide

2.1.1 Stabilité de la génération

Afin d'illustrer la stabilité du gaz humide généré, un essai a été conduit en ne faisant débiter que la ligne de gaz humide dans l'installation. Les enregistrements ont été réalisés sur une période d'une heure environ avec une période d'acquisition de 1 point toutes les 15 secondes. Ceux-ci sont reportés ci-dessous :

Figure 4. Moyenne des températures mesurées dans le saturateur

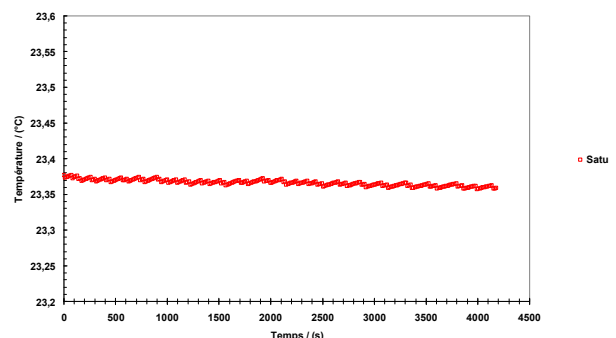


Figure 5. Pression mesurée dans le saturateur

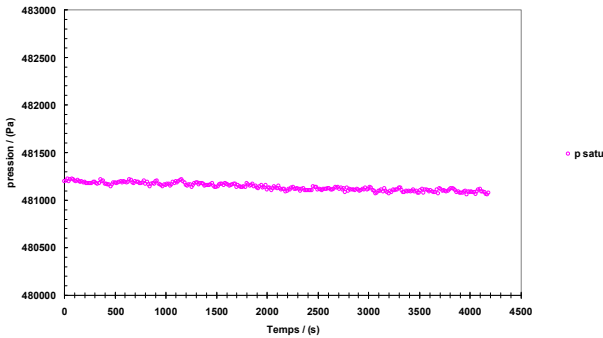


Figure 6. Débit dans la ligne de gaz humide

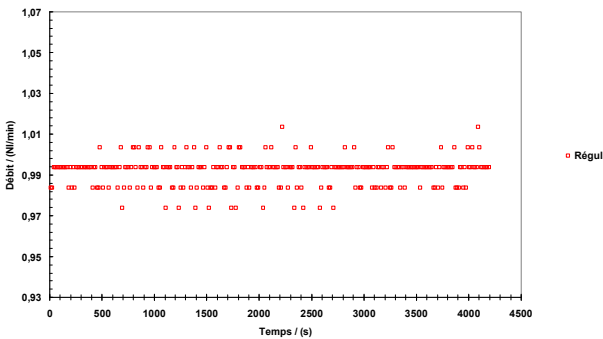
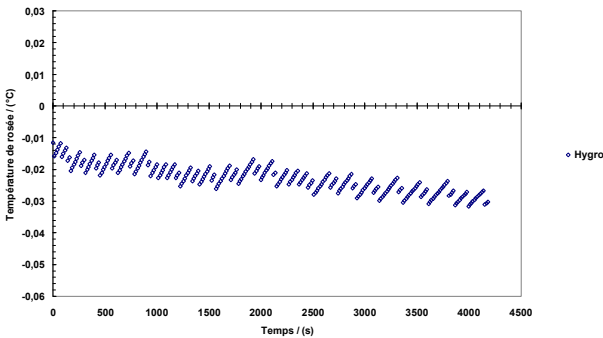


Figure 7. Température de rosée mesurée par l'hygromètre



Les résultats numériques des essais sont résumés dans le tableau 2 ci-dessous. Les résultats sont présentés au travers d'une valeur moyenne de la grandeur mesurée, la valeur maximale, la valeur minimale et l'écart type associé.

Tableau 2. Tableau de synthèse des résultats obtenus.

	Temp. Satu. (°C)	Press. Satu. (Pa)	Régul. Hum. (NI/min)	Hygro. (°C)
Valeur moy.	23,37	481139	0,99	-0,02
Valeur max.	23,38	481229	1,01	-0,012
Valeur min.	23,36	481056	0,97	-0,032
σ	≈ 7.10 ⁻³	≈ 40	≈ 5.10 ⁻³	≈ 6.10 ⁻³

La température mesurée au sein du système de saturation présente une légère dérive. Ceci a pour conséquence directe une diminution de la température de rosée mesurée par l'hygromètre de l'ordre de 0,02°C sur une période de 1h30.

2.1.2 Sensibilité aux variations de pression et de débit

Afin de juger de l'impact des variations de débit et de pression sur la génération de gaz humide, des variations maîtrisées de ces grandeurs ont été appliquées successivement à ces grandeurs.

2.1.2.1 Variation de débit

L'installation étant en régime établi, deux variations successives du débit (0,5 NI/min) sont appliquées sur le régulateur de débit de la ligne de gaz humide (figure 10). Entre les deux variations un retour au débit nominal est opéré.

Figure 8. Moyenne des températures mesurées dans le saturateur

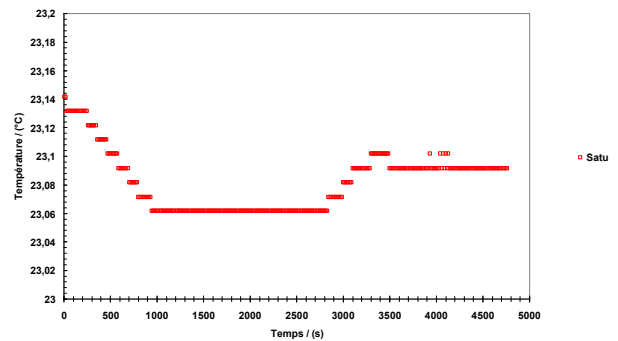


Figure 9. Pression mesurée dans le saturateur

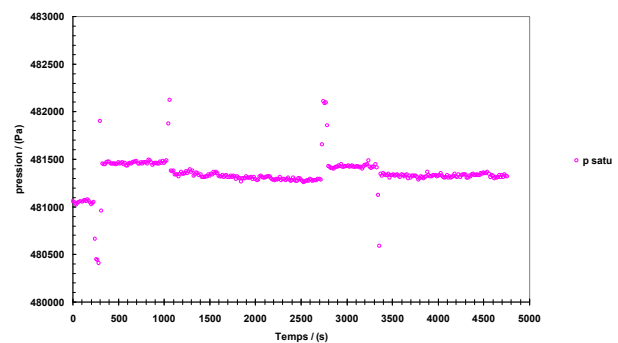


Figure 10. Débit dans la ligne de gaz humide

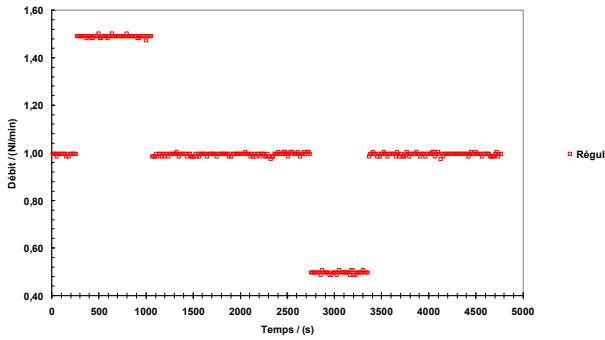


Figure 12. Moyenne des températures mesurées dans le saturateur

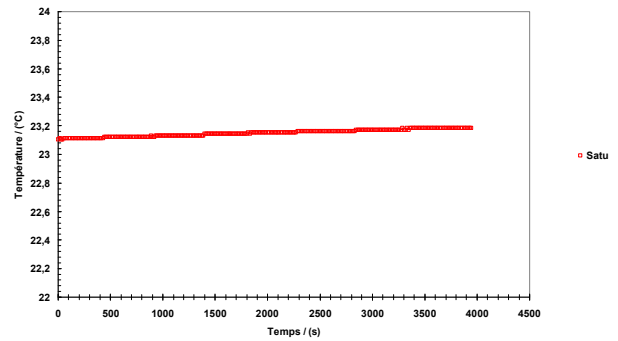


Figure 11. Température de rosée mesurée par l'hygromètre

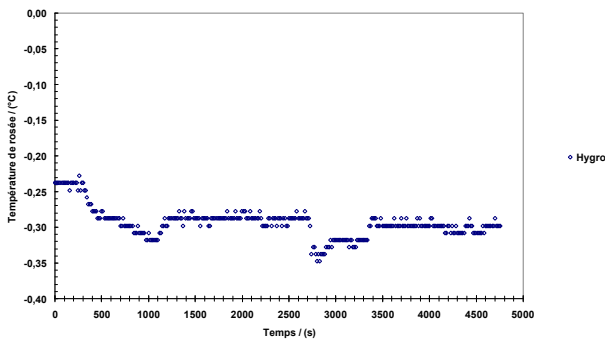
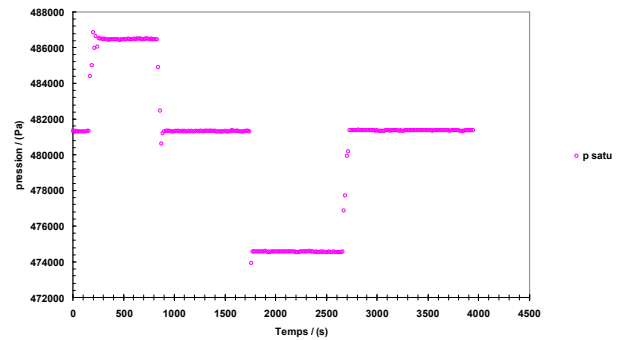


Figure 13. Pression mesurée dans le saturateur



Les variations de débit occasionnées engendrent, sur la pression au sein du saturateur, une variation au plus de 400 Pa (figure 9).

L'augmentation du débit entraîne un abaissement de la température du saturateur ; la diminution de celui-ci conduit à une élévation (figure 8).

La réponse de l'hygromètre suit rigoureusement l'évolution de la température du saturateur (figure 11).

Les résultats obtenus ici montrent qu'il est délicat de discerner l'effet de variation de débit sur l'efficacité de la saturation du système et l'effet thermique résultant de cette même variation de débit. Afin de mieux dissocier ces deux effets, une modification du protocole est à l'étude de sorte à compenser les effets thermiques mis en jeu par la variation de débit.

Figure 14. Débit dans la ligne de gaz humide

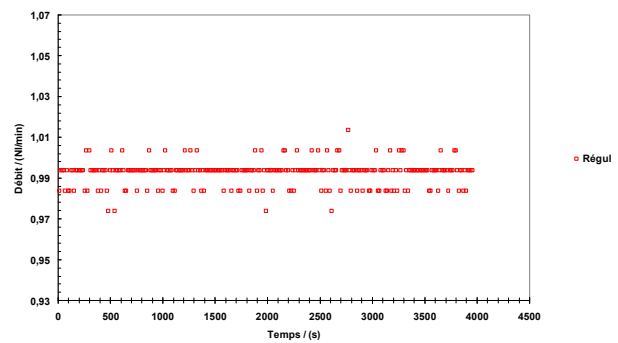
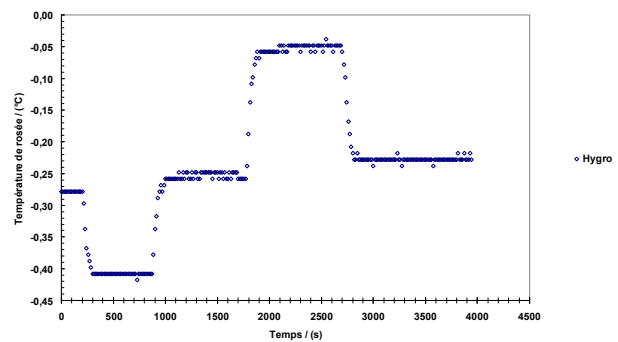


Figure 15. Température de rosée mesurée par l'hygromètre



2.1.2.2 Variation de pression

L'installation étant en régime établi, deux variations successives de pression ($\approx +5000$ Pa et ≈ -6500 Pa) sont appliquées au sein du système de saturation (figure 13). Entre les deux variations un retour à la pression nominal est opéré.

Les variations de pression appliquées n'ont pas occasionnées de variation du débit de gaz humide (figure 14).

Une légère dérive de la température est constatée (figure 12). Celle-ci ne semble pas être liée aux variations de pressions appliquées. Des investigations sont en cours pour expliquer ce phénomène.

Conformément à ce que prévoit la théorie [2] et [4], ces variations de pression dans la zone de saturation influencent directement la teneur en humidité du gaz véhiculé. L'augmentation de la pression de l'ordre de +5000 Pa se traduit ainsi par un abaissement de la température de rosée au niveau de l'hygromètre de l'ordre de 0,15°C. La diminution de la pression de l'ordre de -6500 Pa se traduit ainsi par un abaissement de la température de rosée au niveau de l'hygromètre de l'ordre de 0,20°C. La légère dérive de la température du saturateur entraîne également une dérive de la température de rosée mesurée par l'hygromètre lorsque la pression revient à sa valeur nominale. L'étude plus approfondie sur l'efficacité de la saturation de l'installation, ainsi que la validation de la mesure de la température interne du système de saturation comme mesure de référence, permettront de confirmer l'adéquation des ordres de grandeurs constatés sur ces derniers essais.

2.2 Mélange de gaz humide et de gaz sec

Les derniers essais présentés dans ce travail portent sur la réalisation de mélanges de gaz humide et de gaz sec. Les cycles de mélange de gaz sec au sein du gaz humide sont observables sur la figure 16.

Figure 16. Débits dans la ligne de gaz humide et de gaz sec

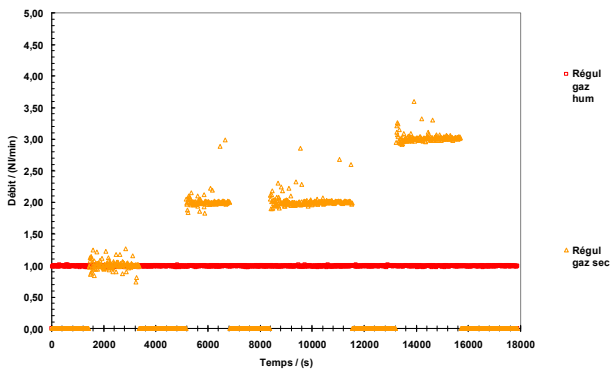
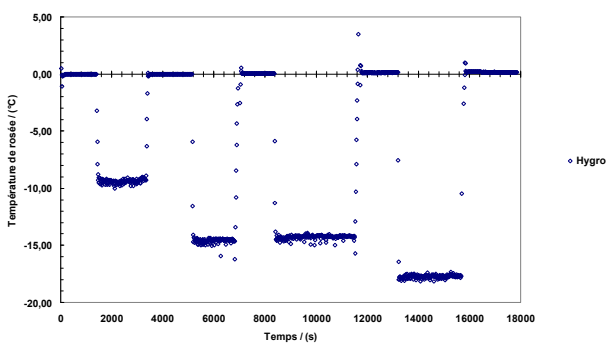


Figure 17. Température de rosée mesurée par l'hygromètre



Les résultats numériques des essais sont résumés dans le tableau 3 ci-dessous. Les résultats sont présentés sous la forme d'une valeur moyenne de la grandeur mesurée et de l'écart type associé. Les grandeurs ainsi traitées sont : la température de rosée mesurée par l'hygromètre MBW, la moyenne des températures mesurées dans le saturateur avec les deux Pt 100, la pression mesurée dans le saturateur par un manomètre capacitif absolu MKS690A, le débit de gaz humide mesuré par le régulateur ALICAT MC-100SLPM et le débit de gaz sec mesuré par le régulateur ALICAT MC-100SLPM

Tableau 3. Tableau de synthèse des résultats obtenus.

Essai	Val. Moy. Hygro. (°C)	σ Hygro. (°C)	Val. Moy. Temp. Satu. (°C)	σ Temp. Satu. (°C)	Val. Moy. Press. Satu. (Pa)	σ Press. Satu. (Pa)
1	-0,03	0,01	23,37	0,01	481368	53
2	-9,44	0,17	23,34	0,00	481230	51
3	-0,02	0,00	23,35	0,01	481121	21
4	-14,60	0,21	23,37	0,01	481076	49
5	0,03	0,01	23,40	0,01	481278	15
6	-14,25	0,16	23,46	0,02	481196	26
7	0,12	0,01	23,53	0,01	481153	21
8	-17,71	0,14	23,57	0,01	481101	18
9	0,17	0,00	23,61	0,00	481076	17

Essai	Val. Moy. Régul. Hum. (Nl/min)	σ Régul. Hum. (Nl/min)	Val. Moy. Régul. Sec. (Nl/min)	σ Régul. Sec. (Nl/min)
1	0,99	0,01	NC	NC
2	0,99	0,01	0,93	0,06
3	0,99	0,01	NC	NC
4	0,99	0,00	1,94	0,15
5	0,99	0,01	NC	NC
6	0,99	0,01	1,93	0,09
7	0,99	0,01	NC	NC
8	0,99	0,01	2,94	0,07
9	0,99	0,01	NC	NC

Sur la durée totale de l'essai, 5h environ, la température du saturateur présente une dérive de l'ordre de 0,24°C. Ceci entraîne une dérive sur la mesure de la température de rosée de l'ordre de 0,2°C entre l'essai 1 et l'essai 9.

L'hypothèse la plus probable, pour expliquer les phénomènes de dérive thermique du système de saturation, reposerait sur les échanges occasionnés par l'advection du gaz au sein du système de saturation. Une amélioration de la mise en température du gaz avant son introduction dans le saturateur devrait permettre de réduire ce phénomène.

L'amplitude de la dispersion entre les mesures de pression mesurées dans le saturateur est inférieure à 300 Pa.

Les résultats des essais du tableau 3, associés à la relation (1), mettent en évidence la sensibilité de cette génération par dilution vis-à-vis de la stabilité de la régulation des débits. En effet, tel que cela a été mentionné plus haut, le régulateur du débit d'air sec présente une stabilité moindre par rapport à celle du régulateur du débit d'air humide. Lorsque le régulateur du débit d'air sec est utilisé (essais 2, 4, 6 et 8) l'écart type expérimental obtenu sur les mesures de température de rosée s'en trouve affecté.

En dépit de ce phénomène de dérive et de la contribution propre de l'hygromètre, les comparaisons successives des essais 1 et 3, puis 3 et 5, puis 5 et 7, puis 7 et 9, tendent à montrer une répétabilité comprise entre 0,01°C et 0,09°C.

La comparaison des essais 4 et 6 fait ressortir une répétabilité de 0,35°C. La qualité de la régulation du débit d'air sec pourrait en être la cause.

3 Conclusion

Le système de génération de gaz humide selon un principe de dilution permet d'envisager de proposer des étalonnages au moyen de gaz autres que l'air, sous pression et avec des temps de mise en régime plus faibles que les systèmes à recirculation complète. Ce système de génération est sensible aux fluctuations des débits, aux variations de pression et de température au sein du saturateur.

Des axes d'amélioration tels que le remplacement de la vanne de régulation du régulateur du débit d'air sec ou la thermalisation plus fine du gaz vecteur dans le système de génération sont actuellement en cours.

Les développements conduits sur ce dispositif s'inscrivent également dans le cadre d'un projet européen de recherche en métrologie JRP ENV07 METEOMET [5].

4 Remerciements

Le LNE-CETIAT remercie la Direction de la Recherche Scientifique et Technologique (DRST) du LNE pour le support financier qu'il a apporté à ce projet.

Références

1. Georgin E. *et al.*, « Vers un principe de dilution pour la génération d'air humide au LNE-CETIAT », CIM 2011, Paris
2. B. Blanquart *et al.*, La mesure d'humidité dans les gaz, Collège Français de Métrologie, 2010
3. Gonin F., Blanquart B., "Improvement of CETIAT humid air generator in low-range", 5th international symposium on humidity and moisture – ISHM, 2006
4. Sonntag D., "Important new values of the physical constants of 1986, vapor pressure formulations based on ITS-90 and psychrometer formulae," Zeitschrift für Meteorologie, vol. 70, pp. 340–344, 1990
5. Merlone A. *et al.*, "A new challenge for meteorological measurements: the "Meteomet" project – metrology for meteorology", 9th International Temperature Symposium , 2012 (www.meteomet.org)