

Méthode d'étalonnage de mini capteurs enregistreurs de température et d'humidité relative pour utilisation *in situ*

Laurent Burnel¹, Audrey Alignier¹, Pierre Perrin²

Résumé : Une procédure simple d'étalonnage d'un type de mini-capteurs enregistreurs HOBO, utilisés en milieu extérieur pour des durées longues (1 an), a été mise au point au laboratoire d'écologie de l'Inra de Toulouse. Les capteurs ont été testés dans une gamme de valeurs proche de leur condition d'utilisation *in situ* : par palier de 5°C entre 0°C et +40°C pour la température et par palier de 10 % entre 60 % et 90 % pour l'humidité relative. L'étalonnage des capteurs est validé par comparaison à une sonde étalon placée dans le même milieu et à l'aide de seuils d'erreur maximale tolérée (EMT) préalablement définis pour nos besoins sur le terrain. Les résultats de cette étude montrent la nécessité de corriger les valeurs enregistrées par les capteurs. Après correction, l'ensemble des capteurs présente des valeurs de température et d'humidité relative fidèles et justes. L'étalonnage des capteurs HOBO est donc une étape nécessaire avant de les mettre en service sur une expérimentation.

Mots clés : métrologie, étalonnage, vérification, correction, mini-capteurs enregistreurs, température, humidité relative

Introduction

L'écologie peut se définir comme une science des relations des êtres vivants avec leur environnement physique, chimique et biologique. Parmi ces facteurs abiotiques, les conditions climatiques sont connues pour être importantes : en effet, des espèces exploitent les variations de température, d'ensoleillement ou d'humidité qui s'observent dans les habitats. En écologie des paysages où l'on étudie les écosystèmes à des échelles d'espace large (jusqu'à 100 km), il était difficile jusqu'à présent de mesurer les variations microclimatiques à un coût raisonnable.

La miniaturisation électronique a permis le développement et la commercialisation de mini-capteurs enregistreurs, autonomes, de faible coût et suffisamment précis, pour suivre les variations des conditions micro-environnementales sur des périodes longues d'un an (Daly et Flye, 2000; Whiteman *et al.*, 2000).

Ce progrès technique ouvre aux écologues des perspectives dans l'étude des paysages et leur suggère également de nouvelles approches méthodologiques auxquelles ils sont peu habitués. C'est le cas de notre unité qui s'est doté récemment de 35 mini-capteurs enregistreurs de type HOBO.

Dans notre démarche qualité, il était logique d'établir une procédure d'étalonnage et de vérification des mesures réalisées par ces matériels. Le dispositif retenu doit donner des coefficients de corrections des températures et des valeurs d'hygrométrie mesurées les plus fiables possibles, et par conséquent, garantir la qualité des mesures prises sur le terrain.

¹ UMR1201 DYNAFOR (Dynamiques forestières dans l'espace rural) - INRA - F- 31326 Castanet-Tolosan

☎ 05 61 28 54 98 ✉ laurent.burnel@toulouse.inra.fr

² UMR1248 AGIR (Agrosystèmes et développement territorial) - INRA- F- 31326 Castanet-Tolosan

1. Objectifs de la méthode

Pour estimer la justesse des instruments de mesure, il s'agit tout d'abord d'établir dans des conditions contrôlées, la relation entre les valeurs de la grandeur indiquée par les mini capteurs (valeur lue) et les valeurs correspondantes de la grandeur indiquée par les étalons (valeur vraie). L'erreur de justesse (valeur lue – valeur vraie) est calculée et comparée aux spécifications fournies par le constructeur. Elle permet de vérifier si les capteurs répondent aux spécifications annoncées par les constructeurs.

Dans notre unité, les mini-capteurs sont destinés à une utilisation sur le terrain. Nous avons admis que les spécifications du constructeur, en accord avec nos exigences scientifiques *in situ*³ définissent notre erreur maximale tolérée (EMT) qui est donc de $\pm 0,7^{\circ}\text{C}$ pour la température et de $\pm 5\%$ pour l'humidité relative (Tableau 1).

Si l'erreur de justesse est supérieure à l'EMT, il faudra réaliser une correction qui peut être modélisée sur toute l'étendue de mesure à partir d'un nombre de points d'étalonnage. Trois points au minimum sont requis pour une correction d'étalonnage (Marloie, 2005).

La fidélité quant à elle, sera estimée par le paramétrage de paliers suffisamment longs de température et d'humidité relative dans le milieu de comparaison.

Ces deux paramètres, justesse et fidélité, nous permettront de statuer sur l'exactitude des capteurs HOBO.

2. Matériel et Méthodes

2.1 La chaîne des appareils

La chaîne des appareils utilisés est composée : i) des capteurs de température et d'humidité relative à étalonner, ii) de sondes étalons permettant de connaître avec précision la température et l'hygrométrie réelle auxquelles sont soumis les capteurs, iii) d'un milieu de comparaison.

2.1.a Capteur de température et d'humidité relative à étalonner

Les capteurs testés sont de type HOBO H08-004-02 (**figure 1**). Ce modèle possède 4 canaux (entrées) : un pour la température de l'air, un pour l'humidité relative de l'air ou hygrométrie, un pour la luminosité et un dernier pour une sonde externe optionnelle (**tableau 1**).

Chaque capteur est identifié par un numéro de série qui lui est propre. L'utilisateur peut programmer des instructions comme le départ différé, l'intervalle de mesure et les canaux à utiliser. Nous n'utiliserons ici que les données relatives à la température et l'humidité relative de l'air. Pour l'identification et le suivi métrologique, nous avons attribué un code à chaque HOBO : H01, H02, etc.



Figure 1 : mini-capteur HOBO H08-004-02

³ Comparaison de situations sur le terrain où les écarts attendus doivent être supérieurs aux spécifications du constructeur.

Caractéristiques générales des HOBO			
Caractéristiques	Spécification	Caractéristiques	Spécification
Pas de temps programmable :	Min : 0,5 s Max : 9 h	Mémoire de stockage :	64 ko
Batterie -autonomie : -type :	1 an CR-2032 (lithium)	Nombre de mesures correspondantes :	Max 31779 mesures (si un seul canal activé)
Dimensions :	61 mm x 48 mm x 20 mm	Poids :	29 g
Caractéristiques de la sonde température	Spécification	Caractéristiques de la sonde d'humidité	Spécification
Type de thermomètre :	thermistance	Type d'hygromètre :	capacitif
Etendue de mesure :	-20 °C à +70 °C	Etendue de mesure :	25 % à 95 %
Incertitude de mesure :	±0,7 °C	Incertitude de mesure :	±5 %
Résolution :	0,4 °C	Résolution :	0,1 %
Temps de réponse :	1 min à l'air libre	Temps de réponse :	10 s à l'air libre

Tableau 1: *spécifications du constructeur pour le HOBO H08-004-02*

2.1.b Les étalons

Caractéristiques générales des étalons		
	Température	Humidité relative
Modèle :	ROTRONIC MP103A	ROTRONIC MP103A
Elément sensible :	Pt 100 ¹ / ₃ DIN	Hygromer C94
Etendue de mesure :	-40 °C à +60 °C	0 à 100 %
Constante de temps à 23 °C et V _{air} de 1 m/s:	< 10 s	< 15 s
Incertitude de mesure :	± 0,3 °C	± 1 % (entre 5 % et 95 %) ± 2 % (< 5 % et > 95 %)
Reproductibilité	< 0,1 °C	< 0,5 %
Stabilité sur 12 mois	Non communiqué	< 1 %

Tableau 2 : *caractéristiques générales des étalons*

La sonde étalon pour l'hygrométrie a été préalablement vérifiée sur trois points d'humidité relative dans une cellule avec trois solutions salines non saturées provenant du SCS (Swiss Calibration Service). En revanche, il n'y a pas eu de vérification de la sonde étalon de température faute de moyens.

2.1.c Le milieu de comparaison

Notre unité ne dispose pas de chambre climatique pour à la fois contrôler et programmer des températures et des humidités relatives. Nous avons donc dissocié les tests relatifs à la température de ceux de l'hygrométrie.

Pour la température :

Nous avons utilisé une enceinte climatique de marque Memmert ICP700. Son homogénéité et sa stabilité sur la température ont fait l'objet d'un constat de vérification (vérification Inra, novembre 2008). Ce type d'enceinte ne nous permet de reproduire que partiellement des

ambiances proches des conditions rencontrées sur le terrain. La température est programmable dans une gamme de + 2°C à + 60°C et il est possible de réaliser des paliers de température pendant une période définie. Cette enceinte ne descendant pas sous + 2 °C, nous n'avons donc pas réalisé de point d'étalonnage pour une température négative.

Pour l'hygrométrie :

Ne disposant pas de chambre d'étalonnage appropriée, la principale difficulté est de maintenir l'air à un même pourcentage d'humidité relative pendant une durée souhaitée.

Nous avons repris la même enceinte climatique Memmert (milieu homogène où la température est contrôlable) dans laquelle nous avons tenté de réaliser des paliers d'humidité relative (3 au minimum) correspondant aux conditions rencontrées sur nos terrains d'étude (de 25 % à 100 %). Après plusieurs essais, nous n'avons pu réaliser que 4 paliers suffisamment constants entre 60 et 90 %. Ainsi, les extrêmes mesurés sur le terrain n'ont pas fait l'objet d'un point d'étalonnage.

2.2 Mode opératoire de l'étalonnage

Pour chaque test réalisé, l'ensemble des 35 capteurs HOBO est placé de manière aléatoire en position centrale du volume de travail : sur l'étagère du milieu de l'enceinte climatique. Ils sont programmés pour un départ différé à un horaire identique. Les mesures enregistrées par les HOBO sont réalisées toutes les 3 minutes.

Nous signalons qu'un mode opératoire spécifique et détaillé a été rédigé dans le cadre de la démarche qualité de nos Unités (Burnel et Perrin, 2009).

2.2.a Test en température

L'enceinte est programmée pour réaliser 18 paliers de températures compris entre 0 et 40°C, chaque palier étant d'une durée de 2 heures. Ces paliers sont testés dans un sens croissant puis décroissant (**figure 2**) afin d'évaluer si les capteurs réagiront différemment sur le terrain à des périodes de refroidissement ou de réchauffement climatique (effet d'hystérésis).

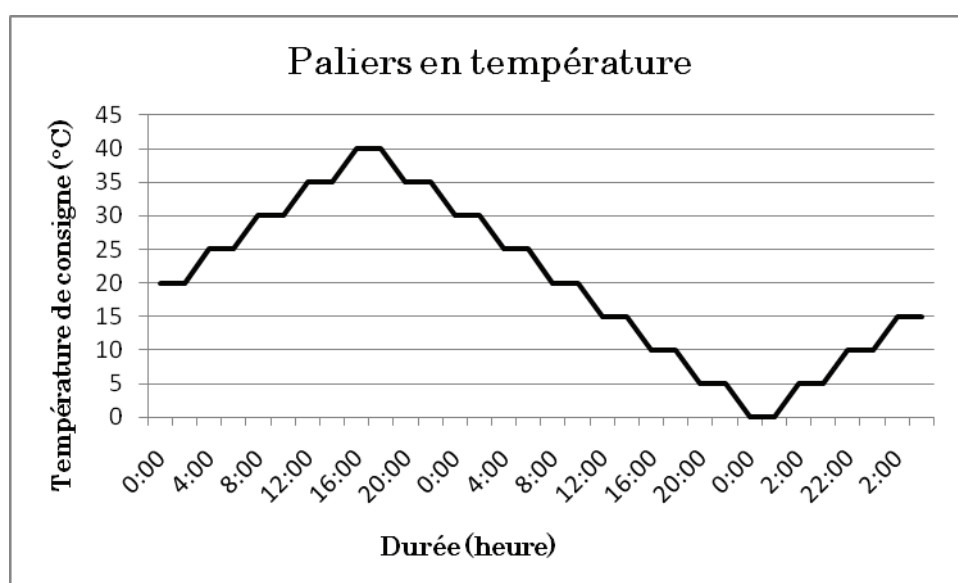


Figure 2: paliers de température ascendants et descendants, d'une durée de 2h chacun

2.2.b Test en hygrométrie

Pour obtenir des paliers d'humidité relative basse (inférieur à 50 %), nous avons placé les capteurs dans un caisson étanche en polystyrène de dimension $30 \times 30 \times 30$ cm avec du dessicant (DESI-PAK, 354 grammes, aluminium silicate clay). Toutefois, après plusieurs essais, nous n'avons pas obtenu de palier suffisamment constant pour tester la fidélité des capteurs.

Pour des valeurs plus hautes en hygrométrie (supérieures à 60 %), nous avons placé deux bassines d'eau (soit 6 litres) au centre de l'enceinte climatique. Nous avons progressivement augmenté la température de l'enceinte jusqu'à $+40^{\circ}\text{C}$, favorisant ainsi l'évaporation.

Au final, nous avons réalisé 4 paliers constants d'hygrométrie à 61 %, 72 %, 83 % et 89 %.

2.3. Traitement statistique des données

Les mesures de température et d'humidité relative enregistrées par les capteurs sont comparées à celles des étalons. Pour chaque palier, chaque HOBO et chaque variable, 30 mesures minimum sont extraites puis traitées sous un tableur de type Excel. Après une analyse graphique sous forme de boîtes à moustaches (**figure 3**) permettant de visualiser la distribution des données, nous avons constaté que tous les capteurs ne peuvent être corrigés de la même façon. Comme Thiébeau (2003), la correction appliquée aux valeurs lues de température et d'humidité relative de l'air est un ajustement linéaire. Le calcul des pentes et ordonnées des droites d'ajustement est réalisé à partir des 30 mesures extraites par palier, par variable et par capteur. Chaque HOBO possède donc sa propre correction de mesure pour la température et l'hygrométrie.

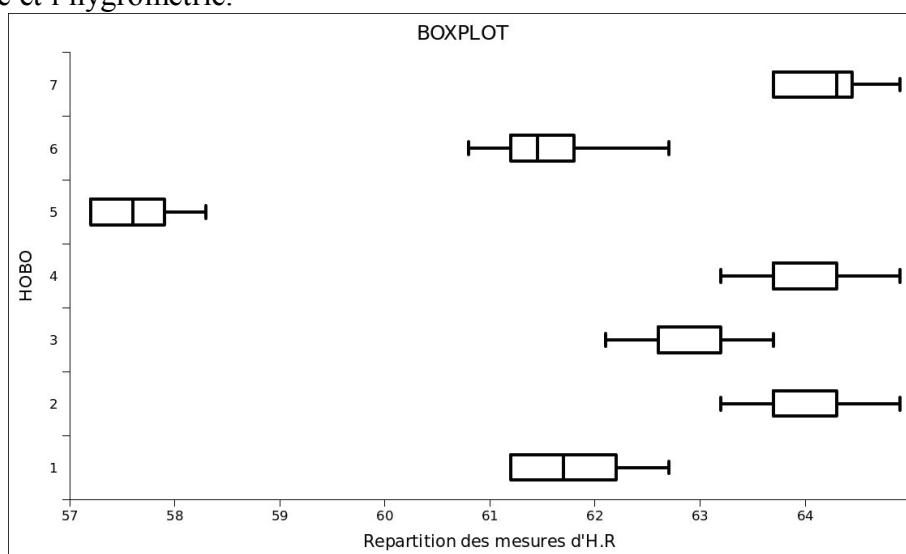


Figure 3 : boîtes à moustache de 5 HOBO testés en humidité relative (H.R.) au palier de 61 %

3. Résultats

Pour éviter une présentation exhaustive des résultats par capteur, nous présentons ici les éléments les plus intéressants de l'étude.

3.1. Avant correction

L'examen des données (**tableau 3**) indique les éléments suivants sur les 35 HOBO testés :

	Nombre de HOBO testés	Nombre de HOBO testés ne présentant aucune valeur hors spécification constructeur	Ecart type moyen	Ecart moyen enregistré	Ecart maximal enregistré	Ecart minimal enregistré	% moyen de valeurs hors spécification constructeur	% de valeurs hors spécification pour le HOBO ayant présenté le maximum d'erreur
Température	35	2	0,06	0,8°C	1,1 °C	0,5°C	11,8	57,6%
Humidité	35	30	0,82	3,9%	7,6%	2,1%	6,4	7,6%

Tableau 3 : *tableau récapitulatif des erreurs observées sur l'ensemble des capteurs HOBO pour la température et l'hygrométrie*

3.1.a Pour la température

Seuls deux HOBO présentent des valeurs de température qui ne s'écartent jamais des mesures de l'étalon de plus d'une EMT. L'écart moyen enregistré pour la température sur les 35 capteurs dépasse l'EMT (défini à $\pm 0,7^{\circ}\text{C}$) que l'on s'était fixée.

Au regard de ces résultats, on peut dire que les HOBO ne sont pas justes mais sont suffisamment fidèles en température. C'est pourquoi chaque capteur HOBO doit faire l'objet d'un étalonnage et d'une correction individualisée.

3.1.b Pour l'humidité relative

Contrairement à ce qui a été observé pour la température, 30 HOBO (soit 86 % des capteurs) enregistrent des données d'hygrométrie systématiquement conformes aux spécifications du constructeur (pas plus d'une EMT par rapport à la sonde étalon). L'écart moyen enregistré pour l'humidité relative sur les 35 capteurs est inférieur à l'EMT ($\pm 5\%$). Le pourcentage moyen de valeurs enregistrées hors spécification constructeur est de 11,8 % pour la température et de 6,4 % pour l'humidité relative.

Ainsi, en ce qui concerne l'humidité relative, nous pourrions nous satisfaire de leur justesse et de leur fidélité. Cinq HOBO ne sont pas systématiquement conformes aux spécifications fournies par le constructeur, c'est pourquoi nous avons également choisi de réaliser un étalonnage et une correction individualisée.

3.2. Après correction

Un extrait des corrections pour cinq HOBO est présenté dans les tableaux 4 et 5.

3.2.a Pour la température (tableau 4)

Les coefficients directeurs des droites de correction varient de 0,99 à 1,02 avec une moyenne de 1. Les ordonnées à l'origine présentent une moyenne de 0,35 avec un écart type faible de 0,23. Les paliers de température testés dans sens décroissant puis décroissant n'ont pas révélé d'effet d'hystérésis.

	CORRECTION DES TEMPERATURES (T°C) (T°C corrigée = T°C mesurée + correction)						
T°C corrigée = a * T°C mesurée + b	Minimum enregistré	Maximum enregistré	H01	H02	H03	H04	H05
a	0,99	1,02	1,00	1,00	1,02	1,00	1,00
b	-0,09	0,79	0,58	0,17	-0,09	0,36	0,31
r ²	0,99	1,00	1,00	1,00	0,99	1,00	1,00

Tableau 4 : valeurs des coefficients de la droite d'ajustement de la correction pour la température. Extrait pour 5 HOBO

3.2.b Pour l'hygrométrie (tableau 5)

Les coefficients directeurs des droites de correction oscillent entre 0,73 et 0,97 avec une moyenne de 0,87. Les ordonnées à l'origine présentent une moyenne de 7,83 avec un écart type de 2,45.

	CORRECTION DES HYGROMETRIES (HR) (HR corrigée = HR mesurée + correction)						
HR corrigée = a * HR mesurée + b	Minimum enregistré	Maximum enregistré	H01	H02	H03	H04	H05
a	0,73	0,97	0,89	0,83	0,89	0,84	0,92
b	3,74	14,69	7,56	9,05	6,60	9,37	6,33
r ²	-	-	0,97	0,98	0,98	0,98	0,98

Tableau 5: valeurs des coefficients de la droite d'ajustement de la correction pour l'humidité. Extrait pour 5 HOBO

L'examen graphique des données avant correction (**figures 4 et 6**) et après correction (**figures 5 et 7**) montre une erreur systématique des capteurs. Les paliers obtenus pour l'humidité relative sont moins précis que ceux obtenus pour la température d'où l'étalement des données.

Les résultats montrent qu'après correction, l'ensemble des 35 capteurs HOBO présentent des données conformes aux spécifications du constructeur (EMT = 0,7°C pour la température et EMT = 5% pour l'humidité). La correction appliquée est donc efficace et réduit visiblement les écarts de mesure entre les capteurs et les sondes étalons.

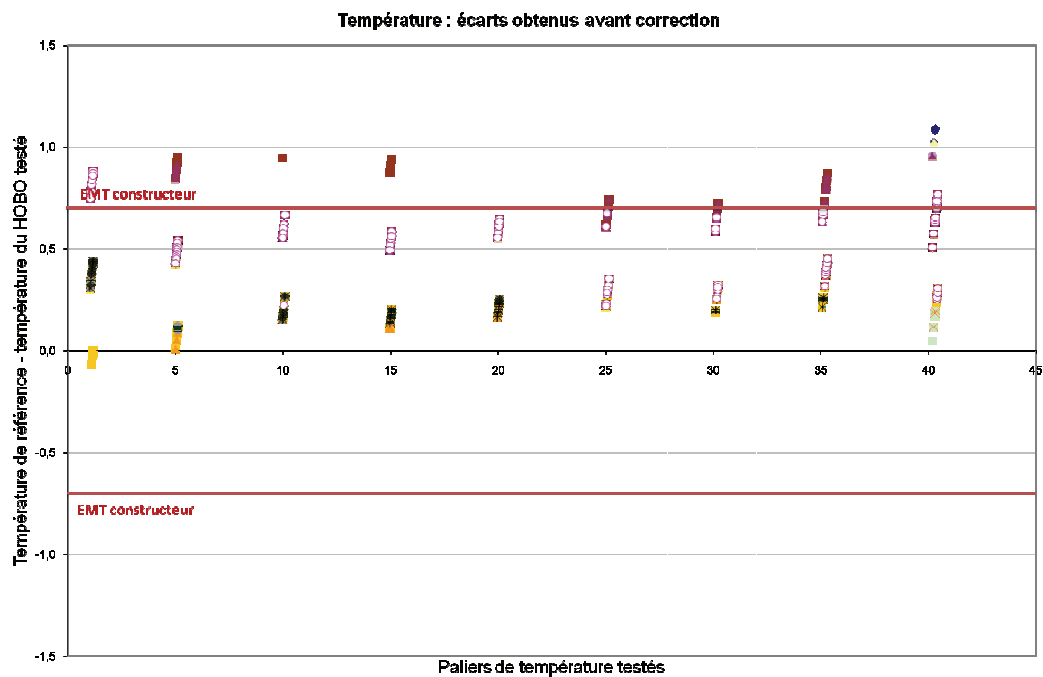


Figure 4 : écarts obtenus *avant correction* entre les *températures* enregistrées par les capteurs HOBO et les valeurs des étalons, pour chaque palier testé. Les lignes en gras indiquent les incertitudes de mesures fournies par le constructeur correspondant à notre EMT

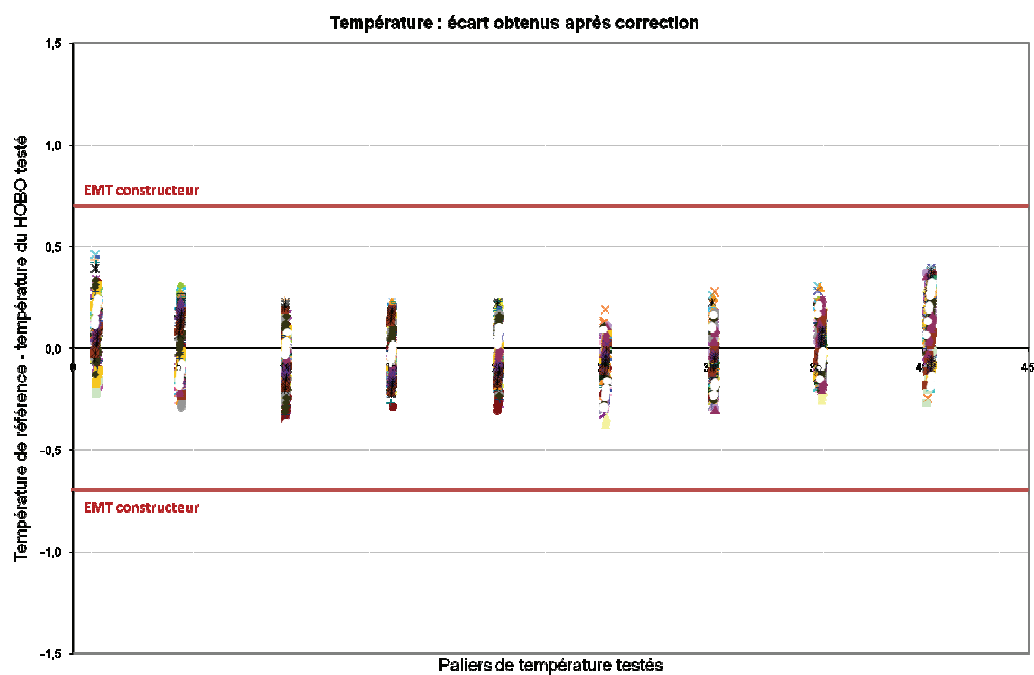


Figure 5 : écarts obtenus *après correction* entre les *températures* enregistrées par les capteurs HOBO et les valeurs des étalons, pour chaque palier testé. Les lignes en gras indiquent les incertitudes de mesures fournies par le constructeur correspondant à notre EMT

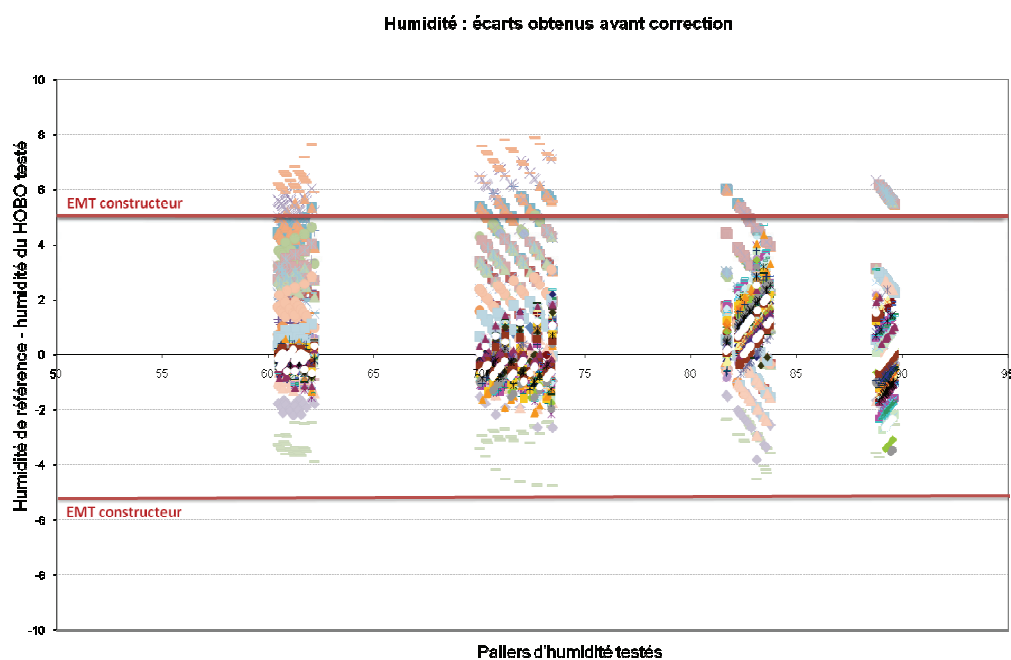


Figure 6 : écarts obtenus *avant correction* entre les *humidités relatives* enregistrées par les capteurs HOB0 et les valeurs des étalons, pour chaque palier testé. Les lignes en gras indiquent les incertitudes de mesures fournies par le constructeur correspondant à notre EMT

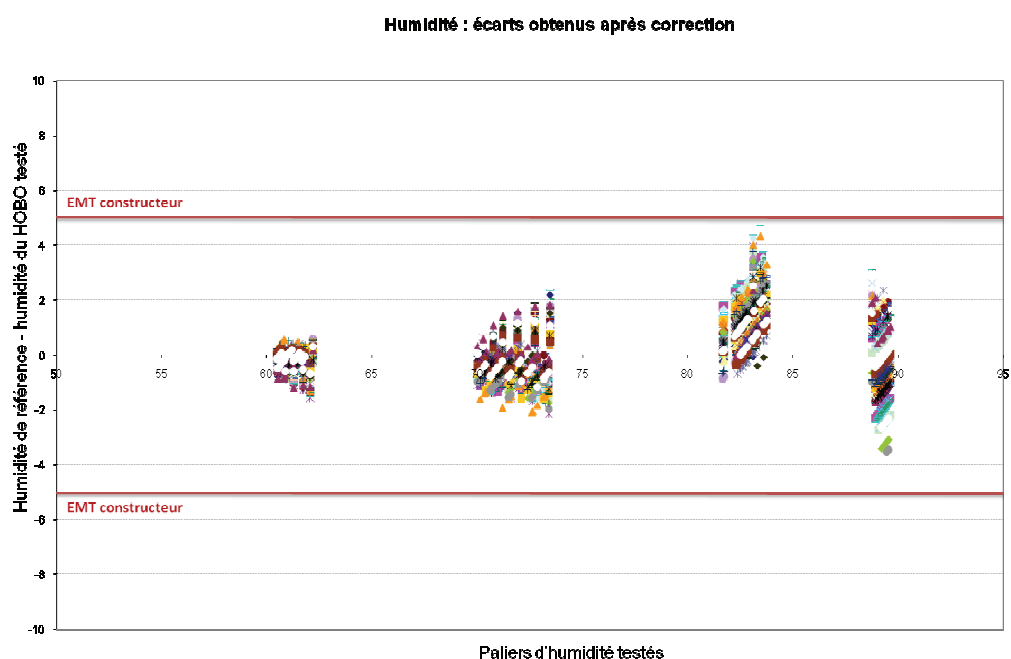


Figure 7: écarts obtenus *après correction* entre les *humidités relatives* enregistrées par les capteurs HOB0 et les valeurs des étalons, pour chaque palier testé. Les lignes en gras indiquent les incertitudes de mesures fournies par le constructeur correspondant à notre EMT

4. Discussion et conclusion

Par cette étude, nous avons cherché à tester l'exactitude de mesure d'un parc de 35 mini-capteurs enregistreurs HOBO. Nous avons expérimenté une procédure d'étalonnage et de vérification des mesures enregistrées par ces capteurs.

Les tests réalisés en milieu contrôlé sur la température et l'humidité relative des HOBO nous ont indiqué la nécessité de réaliser un étalonnage et une correction individualisée des capteurs. Les courbes de température et d'humidité mesurées imposent le calcul de droites d'ajustement (ou correction). Il semblerait cependant que la correction des capteurs pour l'hygrométrie ne soit pas indispensable contrairement aux valeurs de température. Par notre dispositif d'étalonnage, nous sommes en mesure de corriger les valeurs enregistrées par les capteurs et d'obtenir des valeurs de température et d'humidité fidèles et justes. Les mesures enregistrées par les capteurs HOBO sont alors comparables entre elles et conformes, après correction, aux spécifications du constructeur. Les HOBO, par leur taille, leur faible coût, leur exactitude, leur capacité de stockage de données ouvrent le champ aux investigations climatiques en écologie du paysage.

Toutefois, nous avons pu constater combien le choix d'un dispositif d'étalonnage, l'estimation de l'incertitude de mesure et l'application d'une correction sont des opérations difficiles à mener, d'autant plus pour les béotiens en métrologie que nous sommes. Comme le rappelle Marloie (2005), l'incertitude d'étalonnage ne représente qu'une part de l'incertitude associée aux résultats de mesure. Pour l'estimer complètement, il faut prendre en compte l'ensemble des composantes de l'application : matière, méthode, main d'œuvre, matériel, milieu.

C'est pourquoi à la suite à cette première expérience, nous avons pour perspectives :

- d'affiner le mode opératoire d'étalonnage en particulier pour obtenir des paliers d'hygrométrie basse constants ;
- de caractériser l'ensemble des composantes de l'incertitude du dispositif d'étalonnage ;
- de tester un éventuel effet de dérive dans le temps des capteurs, notamment au retour des appareils après une année sur site d'étude.

Remerciements : *Ce travail a reçu le soutien financier du conseil régional Midi-Pyrénées et du conseil régional Aquitaine pour le projet « Evolution de la biodiversité des forêts sous l'effet des changements globaux » pour l'achat des mini-capteurs enregistreurs HOBO. Nous remercions Christophe Bedouret et Martin Naillon, stagiaires en métrologie qui ont contribué à la réalisation de cette étude. Le stage de Christophe Bedouret a reçu le soutien financier du département EFPA, pour la démarche qualité.*

Bibliographie

- Burnel L, Perrin P. (2009) Mode opératoire d'étalonnage et de vérification de mini-capteurs enregistreurs HOBO. Document interne p.7 ; disponible sur demande auprès des auteurs
- Daly G., Flye H.J. (2000) Dataloggers deliver. Engineered systems 17, 84-89
- Marloie O. (2005) Instruction d'étalonnage d'un thermomètre à résistance. *Le Cahier des techniques de l'Inra*, 56, 45-58

- Thiebeau P. (2003) Définition d'une procédure d'étalonnage de capteurs de température de type "thermistance", à l'aide d'un calibrateur de température à bain sec. *Le Cahier des techniques de l'Inra*, 48, 1-10
- Thiebeau P., Pinto L. (2004) Étude d'une méthode d'étalonnage de capteurs de température de type thermistance, à valider sur un parc. *Le Cahier des techniques de l'Inra*, 51, 23-28
- Whiteman C.D., Hubbe J.M., Shaw W.J. (2000) Evaluation of an Inexpensive Temperature Datalogger for Meteorological Applications. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology* 17, 77-81

