

MINISTÈRE DE LA TRANSITION ECOLOGIQUE ET SOLIDAIRE

Note technique MESURE DE L'ANGLE DE CALAGE D'UNE UNITE DE PAPI PAR LA METHODE DU DRONE

Référence : NIT/SE/E/18-5028

Objet :	Validation de la mesure de l'angle de calage d'une unité de PAPI selon la méthode du drone par comparaison avec les résultats obtenus selon la méthode dite de la nacelle
----------------	---

Validation du document

Nom	Responsabilités	Date	Visa
Valérie FOK BOR <i>Chef de la subdivision Aides visuelles</i>	Rédacteur	10/01/2018	Signé
Christian DREANO <i>Chargé d'affaires, subdivision Energie Balisage</i>	Rédacteur	10/01/2018	Signé
Philippe RAPP <i>Chargé d'affaires, subdivision Energie Balisage</i>	Vérificateur	12/01/2018	Signé
Daniel ALLAIN <i>Chef de la subdivision Energie Balisage</i>	Vérificateur	15/01/2018	Signé
Patrick VERGER <i>Chef de Division, p.i.</i>	Approbateur	17/01/2018	Signé

Diffusion du document

Destinataires	Copie pour information
Publication sur le site internet du STAC	STAC/SE
<i>Remarques :</i>	

Classement du document

Processus de rattachement	-	
Type de classement	Lieu	Durée
Classement papier	Bureau de la subdivision Energie Balisage W008-W009	10 ans
Classement informatique	S:\SE\Equipements\10 - NITs et études\Experimentation- drone-CDG-PAPI\NIT\18-5028-Note Technique Experimentation drone 2018_01_17.docx	10 ans
Archivage	-	-

Modèle : MOD RAPPORT v5

Historique du document

Version - Date	Synthèse des évolutions	Auteur	Paragraphes concernés
V1 du 17/01/2018	Création du document	Valérie FOK BOR Christian DREANO	Tous

Sommaire

1. Description de l'expérimentation	3
1.1. Objectif.....	3
1.2. Services présents	3
1.3. Plan de situation	3
1.4. Equipements mis en œuvre.....	4
1.4.1. Méthode de la nacelle	4
1.4.2. Méthode du drone	4
1.5. Conditions de mesure	5
1.6. Protocole de mesure	5
1.6.1. Principe de mesure.....	5
1.6.2. Nombres et distances de mesure	5
1.6.3. Détails	6
2. Résultats des mesures	8
3. Analyse des résultats.....	9
3.1.1. Répétabilité	9
3.1.2. Fidélité intermédiaire	10
3.1.3. Justesse	11
4. Conclusion	12

1. DESCRIPTION DE L'EXPERIMENTATION

1.1. OBJECTIF

L'objectif de l'expérimentation objet du présent document est de valider la méthode de mesure de l'angle de calage d'une unité de PAPI au moyen d'un drone. L'intérêt de cette méthode désignée dans le présent document comme la « méthode du drone » réside dans sa plus grande rapidité et souplesse de mise en œuvre que la méthode dite de la nacelle.

La validation de la méthode du drone est réalisée par comparaison des résultats de mesure obtenus selon la méthode du drone avec ceux obtenus selon la méthode dite de la nacelle, méthode de référence reconnue par l'autorité de surveillance.

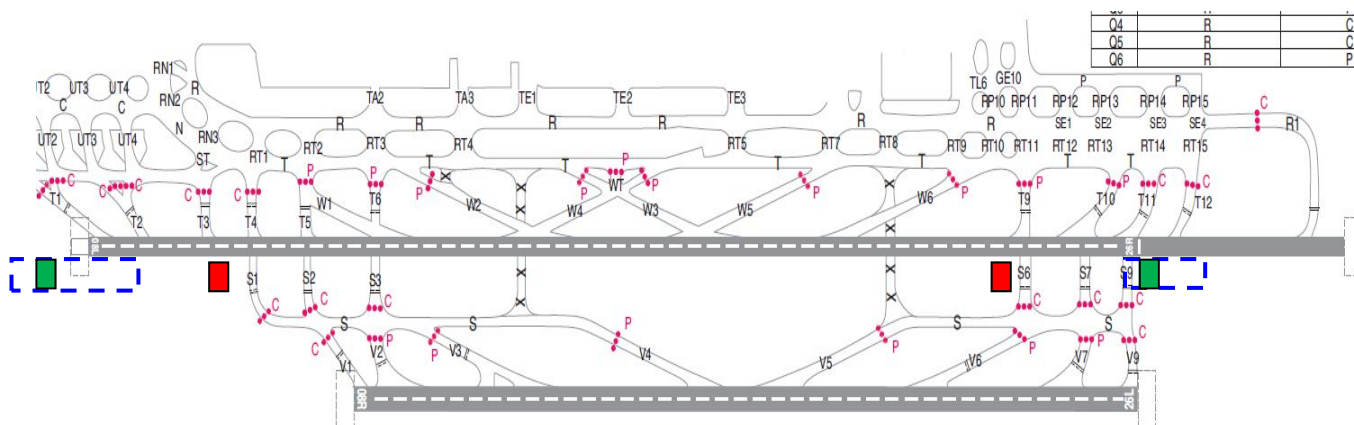
1.2. SERVICES PRESENTS

- ✓ ADP : Aéroport De Paris – CDGR Pôle Systèmes navigation aérienne, exploitant d'aérodrome
- ✓ STAC : Service Technique de l'Aviation Civile – Division Equipements
- ✓ CANARD Drones : société d'exploitation de drones spécialisée dans le contrôle des aides à la navigation aérienne
- ✓ Cabinet de géomètres expert et société de location de nacelle

1.3. PLAN DE SITUATION

Date de l'expérimentation : nuit du 6 au 7 décembre 2017

Lieu : pistes 08L et 26R de l'aérodrome de Paris Roissy Charles de Gaulle



■ : nacelle

■ : barre de PAPI

□ : zone d'évolution du drone

Distance de la barre de PAPI au seuil de la piste 08L : 440 m

Distance de la barre de PAPI au seuil de la piste 26R : 415 m

Angles de calage requis des unités de PAPI : 2°25 – 2°45 – 3°15 – 3°35

1.4. EQUIPEMENTS MIS EN ŒUVRE

1.4.1. Méthode de la nacelle

- ✓ 1 camion nacelle :



- ✓ 1 station « totale et GPS théodolite »

1.4.2. Méthode du drone

- ✓ 1 drone hexacopteur Matrice M 600 Pro équipé de modules GNSS et d'une caméra vidéo :



<https://www.dji.com/fr/matrice600-pro>

- ✓ 2 tablettes permettant la réception et l'enregistrement des images vidéo en direct via une liaison de données avec la caméra embarquée
- ✓ 1 station de référence D-RTK GNSS montée sur trépied et positionnée au seuil de piste

Note : Le RTK (Real Time Kinematic - cinématique en temps réel) est une technique de correction de la position GPS permettant d'atteindre un niveau de précision de l'ordre de 2 cm dans les différents plans. Le GPS RTK requiert au minimum deux récepteurs du signal satellite et deux radios pour le dialogue entre les balises. Récepteur GPS et radio sont généralement regroupés dans une balise RTK. L'un des récepteurs GPS (aussi appelé la base RTK) est installé comme station de référence de sorte qu'il peut transmettre le message de correction au récepteur GPS itinérant (également appelé le récepteur mobile). Les deux récepteurs GPS enregistrent les données particulières émises par les satellites GPS sur la fréquence L2, permettant d'atteindre une meilleure précision.

1.5. CONDITIONS DE MESURE

- Début de l'expérimentation : 00h30
- Fin de l'expérimentation : 04h30
- Conditions météorologiques :
 - température : 2 à 3°C (ressentie = -2 à -4 °C)
 - vent : de l'ordre de 10 nœuds et laminaire
 - visibilité : CAVOK

1.6. PROTOCOLE DE MESURE

1.6.1. Principe de mesure

Pour chacune des 4 unités de PAPI, la position du drone (pour la méthode du drone) est enregistrée aux points de transition colorimétrique suivants :

- point de transition colorimétrique du rouge vers le blanc
- point de transition colorimétrique du blanc vers le rouge

L'angle de calage de l'unité de PAPI est ensuite calculé à partir de la moyenne entre ces 2 positions enregistrées.

Pour chacune des 4 unités de PAPI, une seule position de l'observateur dans la nacelle (pour la méthode de la nacelle) est enregistrée au niveau du secteur de transition colorimétrique.

1.6.2. Nombres et distances de mesure

Pour chacune des unités de PAPI, le tableau ci-après indique le nombre de mesures de l'angle de calage réalisées par distance de mesure, selon chacune des deux méthodes. Les différentes mesures ont été réalisées de manière indépendante.

Il convient de noter que la source lumineuse des unités de PAPI des pistes 08L et 26R est de type LED.

QFU Piste	Unité	Méthode de la nacelle		Méthode du drone	
		Distance de mesure (mètres)	Nombre de mesures	Distance de mesure (mètres)	Nombre de mesures
08L	A	479	4	230	5
				350	5
				450	5
				510	5
	B		4	230	5
				350	5
				450	5
				510	5
	C	478	4	230	5
				350	5
				450	5
				510	5
D	4		230	5	
			350	5	
			450	5	
			510	5	
26R	A	220	4	390	4
				460	5
	B		4	390	5
				460	5
	C	221	4	390	5
				460	5
	D		4	390	5
				460	5

1.6.3. Détails

1.6.3.1. Méthode de la nacelle

QFU piste	Position de la nacelle
08L	Sur la route de service, à environ 470 m de la barre PAPI
26R	Au seuil de piste



QFU 08L vu depuis la nacelle (à environ 40 mètres de hauteur)

1.6.3.2. Méthode du drone

- Etape 1 : Mise en place d'un récepteur GPS (base RTK, station de référence) au seuil de piste. Tous les points de mesures de la position du drone sont référencés par rapport à ce récepteur.



- Etape 2 : Mesure de la position de l'axe des lentilles de chaque unité de PAPI (extrapolée de la position du drone posé sur chaque unité).



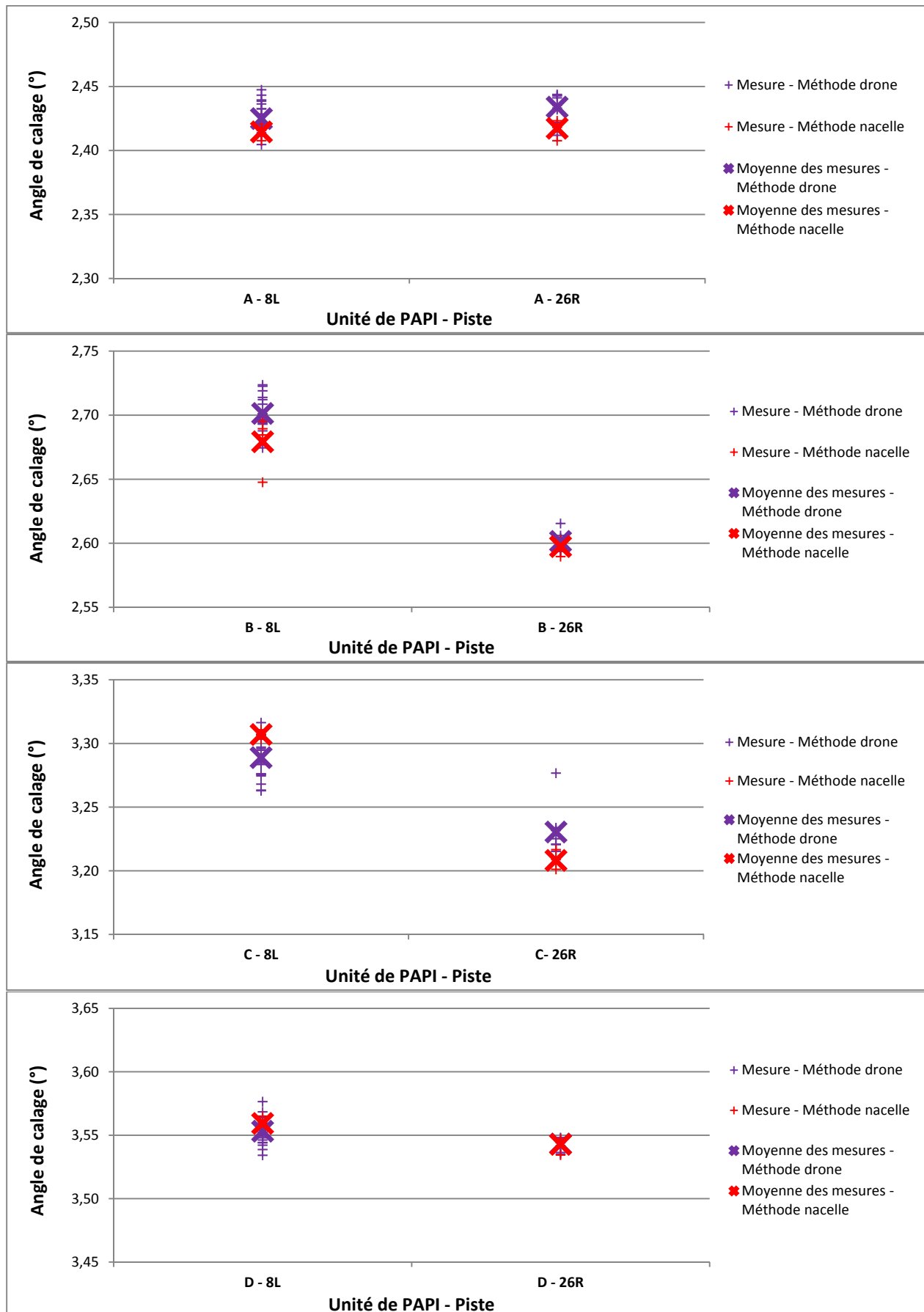
- Etape 3 : Mesure en vol de l'angle de calage de chaque unité de PAPI



- Positionnement du drone par le pilote à la distance de mesure prédéfinie, dans un plan horizontal. Le pilote contrôle ensuite le déplacement du drone uniquement dans le plan vertical.
- Le pilote et l'observateur disposent chacun d'un retour vidéo. Le pilote suit les instructions de l'observateur qui déclenche et enregistre les mesures de la position du drone aux points de transition colorimétrique. Au moment de la mesure de la position du drone, ce dernier est immobile ; sa position est stabilisée. L'observateur visualise sur écran la transition colorimétrique de chaque unité de PAPI

2. RESULTATS DES MESURES

Les résultats des mesures de l'angle de calage sont présentés ci-après pour chaque unité de PAPI.



3. ANALYSE DES RESULTATS

3.1.1. Répétabilité

3.1.1.1. Définition (selon la norme NF ISO 5725-1)

Répétabilité : Ecart de mesure d'accord entre des résultats d'essais indépendants obtenus par la même méthode, sur des objets d'essais identiques, dans le même laboratoire, par le même opérateur, utilisant les mêmes équipements de mesure et pendant un court intervalle de temps.

3.1.1.2. Méthode de calcul

Un écart type absolu moyen de répétabilité σ_{r-um} de la méthode m de mesure par unité u de PAPI est calculé d'après la formule suivante:

$$\sigma_{r-um} = \frac{1}{n_{um}} \sum_d \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n_{dum}} (x_{idum} - \bar{x}_{dum})^2}{n_{dum} - 1}}$$

avec, pour chaque unité u de PAPI mesurée selon la méthode m à la distance d :

$\bar{x}_{dum} = \frac{1}{n_{dum}} \sum_{i=1}^{n_{dum}} x_{idum}$: la moyenne des mesures de l'angle de calage réalisées,

n_{dum} : le nombre de mesures successives de l'angle de calage réalisées,

$(x_{idum})_{1 \leq i \leq n}$: les valeurs des mesures de l'angle de calage réalisées,

n_{um} : le nombre de distances de mesure de l'angle de calage de l'unité u de PAPI selon la méthode m .

L'écart type absolu moyen de répétabilité σ_{r-m} de la méthode m de mesure est alors calculé d'après la formule suivante :

$$\sigma_{r-m} = \frac{1}{n_m} \sum_u \sigma_{r-um}$$

avec n_m le nombre d'unités de PAPI mesurées selon la méthode m .

3.1.1.3. Critère de validation

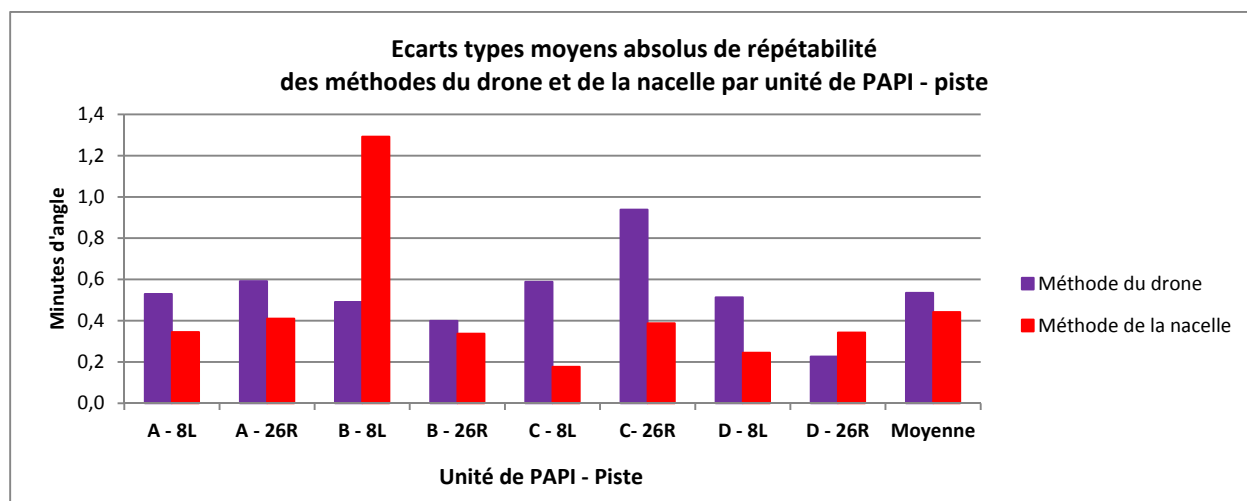
En terme de répétabilité de mesure de la méthode du drone :

$4\sigma_{r-uDrone} \leq 5 \text{ minutes}$ soit $\sigma_{r-uDrone} \leq 1,25 \text{ minutes}$ pour chaque unité u de PAPI.

3.1.1.4. Résultats

Le graphique ci-après présente :

- l'écart type absolu moyen de répétabilité σ_{r-um} de la méthode m de mesure pour chaque unité u de PAPI,
- l'écart type absolu moyen de répétabilité σ_{r-m} de la méthode m de mesure.



On trouve : $\sigma_{r-Drone} = 0,53$ minute et $\sigma_{r-Nacelle} = 0,44$ minute. Ce sont des valeurs très proches (0,09 minutes de différence).

D'une unité de PAPI à l'autre mesurée selon les méthodes du drone et de la nacelle, la différence en terme d'écart type absolu de répétabilité de la méthode peut être plus importante, sans toutefois dépasser 0,55 minute (différence maximale relevée pour l'unité C de la piste 26R avec $\sigma_{r-C26RDrone} = 0,94$ minute et $\sigma_{r-C26RNacelle} = 0,39$ minute).

3.1.1.5. Avis

L'écart type absolu maximal de répétabilité de la méthode du drone est relevé pour l'unité C de la piste 26R : 0,94 minute. Il reste inférieur à 1,25 minute, ce qui permet de valider la méthode du drone en terme de répétabilité de mesure.

3.1.2. Fidélité intermédiaire

3.1.2.1. Définition (selon la norme NF ISO 5725-1)

Fidélité intermédiaire temps-distances différents : Etroitesse d'accord entre des résultats d'essais indépendants obtenus par la même méthode, sur des objets d'essais identiques, dans le même laboratoire, par le même opérateur, utilisant les mêmes équipements de mesure, mais à des distances de mesure et des instants différents.

3.1.2.2. Méthode de calcul

Un écart type absolu de fidélité intermédiaire temps-distances différents $\sigma_{f-uDrone}$ de la méthode du drone par unité u de PAPI est calculé d'après la formule suivante :

$$\sigma_{f-uDrone} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n_{uDrone}} (x_{iuDrone} - \bar{x}_{uDrone})^2}{n_{uDrone} - 1}}$$

avec, pour chaque unité u de PAPI mesurée selon la méthode du drone :

$$\bar{x}_{uDrone} = \frac{1}{n_{uDrone}} \sum_{i=1}^{n_{uDrone}} x_{iuDrone} : \text{ la moyenne des mesures de l'angle de calage réalisées.}$$

n_{uDrone} : le nombre de mesures successives de l'angle de calage réalisées.

$(x_{iuDrone})_{1 \leq i \leq n}$: les valeurs des mesures de l'angle de calage réalisées.

Un écart type absolu moyen de fidélité intermédiaire temps-distances différents $\sigma_{f-Drone}$ de la méthode du drone est alors calculé d'après la formule suivante :

$$\sigma_{f-Drone} = \frac{1}{n_{Drone}} \sum_u \sigma_{r-Drone}$$

avec n_{Drone} le nombre d'unités de PAPI mesurées selon la méthode du drone.

3.1.2.3. Critère de validation

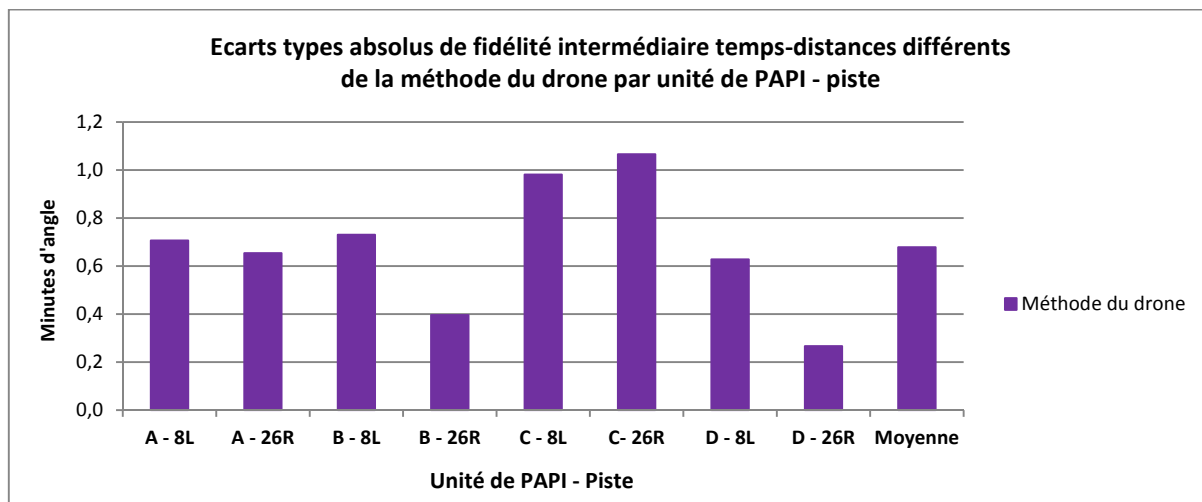
En terme de fidélité intermédiaire de mesure de la méthode du drone :

$$4\sigma_{f-uDrone} \leq 5 \text{ minutes soit } \sigma_{f-uDrone} \leq 1,25 \text{ minutes pour chaque unité } u \text{ de PAPI.}$$

3.1.2.4. Résultats

Le graphique ci-après présente :

- l'écart type absolu de fidélité intermédiaire temps-distances différents $\sigma_{f-uDrone}$ de la méthode du drone pour chaque unité u de PAPI,
- l'écart type absolu moyen de fidélité intermédiaire temps-distances différents $\sigma_{f-Drone}$ de la méthode du drone.



On trouve : $\sigma_{f-Drone} = 0,68$ minute. L'écart type absolu moyen de fidélité intermédiaire temps-distances différents de la méthode drone reste très proche de l'écart type absolu moyen de répétabilité de la même méthode : $\sigma_{r-Drone} = 0,53$ minute.

D'une unité de PAPI à l'autre, l'écart type absolu de fidélité intermédiaire temps-distances différents de la méthode du drone reste compris entre 0,27 minute (= $\sigma_{r-D26RDrone}$) et 1,07 minute (= $\sigma_{f-C26RDrone}$).

3.1.2.5. Avis

L'écart type absolu maximal de fidélité intermédiaire temps-distances différents de la méthode du drone est ainsi relevé pour l'unité C de la piste 26R : 1,07 minute. Il reste inférieur à 1,25 minute, ce qui permet de valider la méthode du drone en terme de fidélité intermédiaire temps-distances différents de mesure.

3.1.3. Justesse

3.1.3.1. Définition (selon la norme NF ISO 5725-1)

Justesse : Ecart entre la valeur moyenne obtenue à partir d'une large série de résultats d'essais et une valeur de référence acceptée

3.1.3.2. Méthode de calcul

La moyenne $\overline{x_{um}}$ des mesures de l'angle de calage réalisées par unité u de PAPI selon la méthode m est calculée d'après la formule suivante :

$$\overline{x_{um}} = \frac{1}{n_{um}} \sum_{i=1}^{n_{um}} x_{ium}$$

avec, pour chaque unité u de PAPI mesurée selon la méthode m :

n_{um} : le nombre de mesures successives de l'angle de calage réalisées

$(x_{ium})_{1 \leq i \leq n}$: les valeurs des mesures de l'angle de calage réalisées

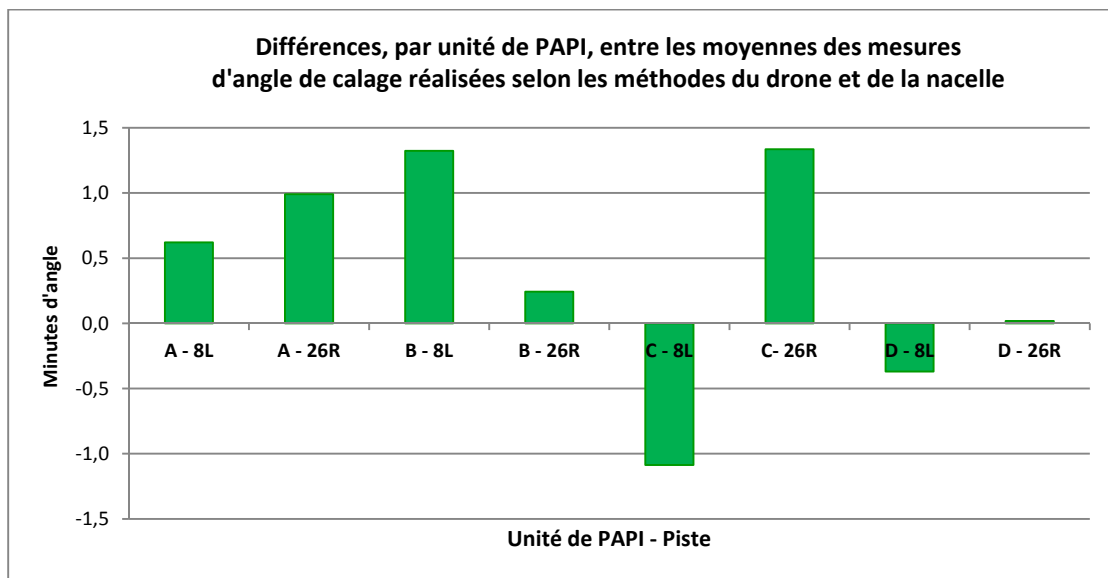
3.1.3.3. Critère de validation

En terme de justesse de mesure de la méthode du drone :

$$|\overline{x_{uDrone}} - \overline{x_{uNacelle}}| \leq 5 \text{ minutes pour chaque unité } u \text{ de PAPI.}$$

3.1.3.4. Résultats

Le graphique ci-après présente, pour chaque unité u de PAPI mesurée, la différence en valeur absolue entre les moyennes des mesures de l'angle de calage réalisées selon les méthodes du drone et de la nacelle.



D'une unité de PAPI à l'autre, la différence en valeur absolue entre les moyennes des mesures de l'angle de calage réalisées selon les méthodes du drone et de la nacelle, reste comprise entre 0,02 minute et 1,32 minute.

3.1.3.5. Avis

La différence maximale en valeur absolue entre les moyennes des mesures d'angle de calage réalisées selon les méthodes du drone et de la nacelle est relevée pour l'unité C de la piste 26R. Elle s'élève à 1,32 minute. Elle reste inférieure à 5 minutes, ce qui permet de valider la méthode du drone en terme de justesse de mesure.

4. CONCLUSION

- ✓ La mise en œuvre (montage du drone, positionnement de la station de référence, mesure de la position des lentilles) est relativement rapide.
- ✓ Les mesures en vol sont réalisées pour l'ensemble des 4 unités de PAPI en environ 10 à 15 minutes.
- ✓ Sur les écrans des tablettes de retour vidéo, la distinction entre le blanc, le rose caractéristique du secteur de transition colorimétrique d'une unité de PAPI et le rouge est possible.
- ✓ L'efficacité de la mesure, sa précision et sa rapidité d'exécution dépendent fortement de la synergie entre le pilote et l'opérateur.
- ✓ L'autonomie des batteries est suffisante pour une opération de mesure « standard » : 10 points de mesure par unité à une seule distance et pour les 2 barres PAPI d'une piste. Il n'y a eu qu'un changement de batteries pour la mesure des 8 unités de PAPI (240 points de mesure).
- ✓ Les résultats de mesure de l'angle de calage d'une unité de PAPI obtenus selon la méthode du drone sont satisfaisants. A l'issue de l'expérimentation objet du présent document, le STAC a validé la méthode du drone mise en œuvre par la société CANARD Drones, avec ce type de drone, évoluant dans son domaine de vol, conformément au protocole décrit précédemment.