



# Méthodes de calibration anémo- barométriques sur un F-16



FRANCOIS MEIGNIEN, IPA, DGA Essais en vol

[francois.meignien@intradef.gouv.fr](mailto:francois.meignien@intradef.gouv.fr)

0557154660

Travaux réalisés à l'US Air Force Test Pilot School dans le cadre de  
la scolarité



# Sommaire

- Contexte
- Résultats principaux
- Moyens d'essais
- Méthodes d'essais
- Résultats détaillés
- Conclusions





# Contexte

- Nécessité de calibrer l'altimètre et l'anémomètre de chaque aéronef nouveau
  - si aéronef d'accompagnement : calibration annuelle requise
- “Nouvelles” méthodes à valider
  - Orbis et “Boomer Turn”
- “Nouvelles” méthodes pour obtenir la référence atmosphérique
  - Multiples ballons, mappage atmosphérique

→ Objectif global :

Comparer les techniques de calibration et les méthodes d'analyse des données



# Vocabulaire

## **Ensemble à calibrer**

Perche anémo, Cône

## **+ Méthode d'essai**

Accélération/décélération, 360°, Trèfle, Paliers stabilisés, Passages tour

## **+ Référence atmosphérique**

Un/plusieurs ballons, mappage atmosphérique, capteur au sol

## **+ Méthode d'analyse des données**

Standard, Orbis, "Bommer turn"

---

**= Calibration**



# Résultats principaux

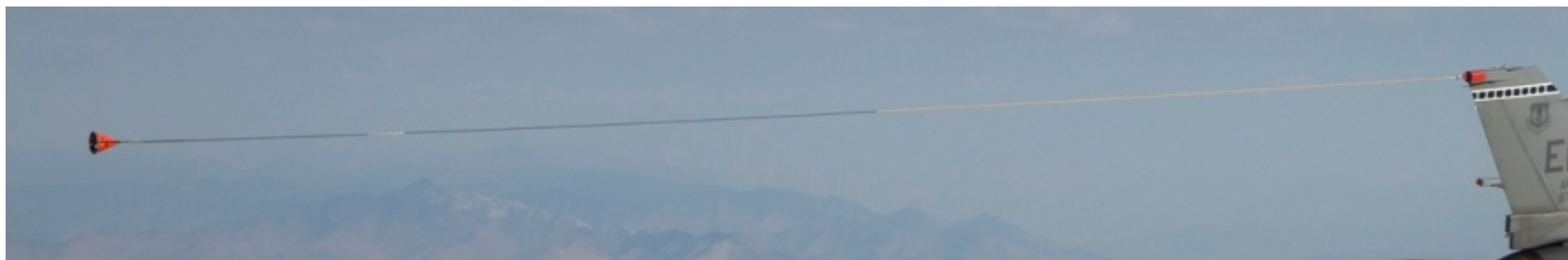
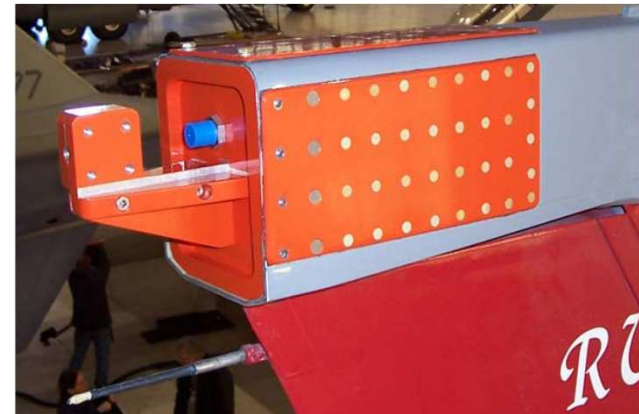
- La calibration de la perche et du cône sont fonction de l'altitude
- Les passages tour, accel/decel et les paliers stabilisés donnent des résultats similaires
- L'utilisation du mappage atmosphérique ne permet pas de réduire significativement l'incertitude
- Les méthodes basées sur la vitesse présentent une dispersion des résultats plus importante



# Moyens d'essais



- Cône
  - 62 ft de la dérive au cone
  - Prise statique 9 ft avant le cone





# MÉTHODES D'ESSAIS





# Ensembles à calibrer

- Perche anémométrique:
  - 2 prises de pression statique
  - 1 prise de pression totale
- Cône:
  - 1 prise de pression statique uniquement





# Technique de calibration

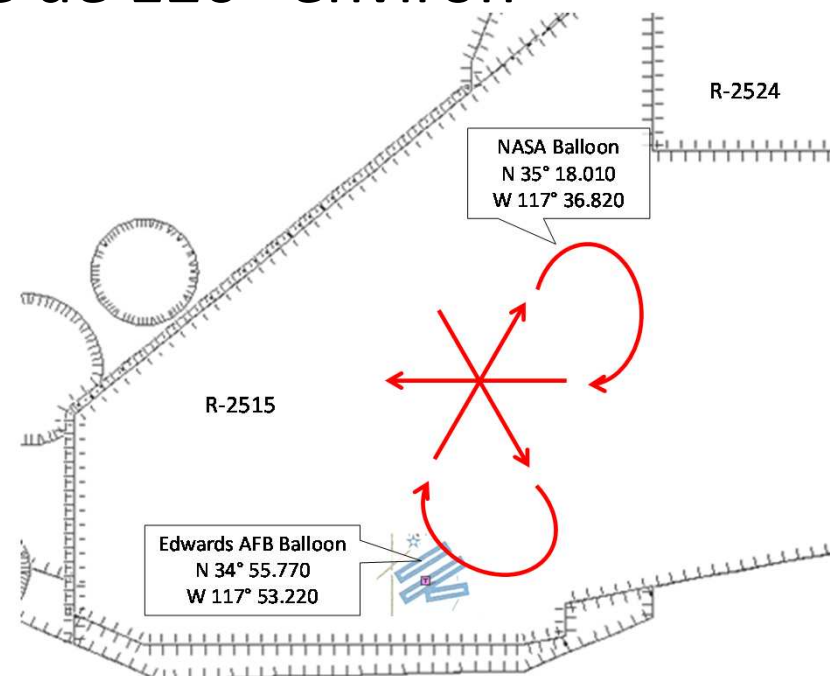
- Accélération / Décélération en palier
  - Variation de vitesse : 2-5 KCAS par seconde
  - Accel & decel réalisées sur le même axe (cap inverse)
  - De 11° d'incidence jusque Mach 0.93





# Technique de calibration

- Trèfle (GPS)
  - Méthode basée sur la vitesse
  - Trois paliers stabilisés passant par le même point avec un cap incrémenté de 120° environ





# Technique de calibration

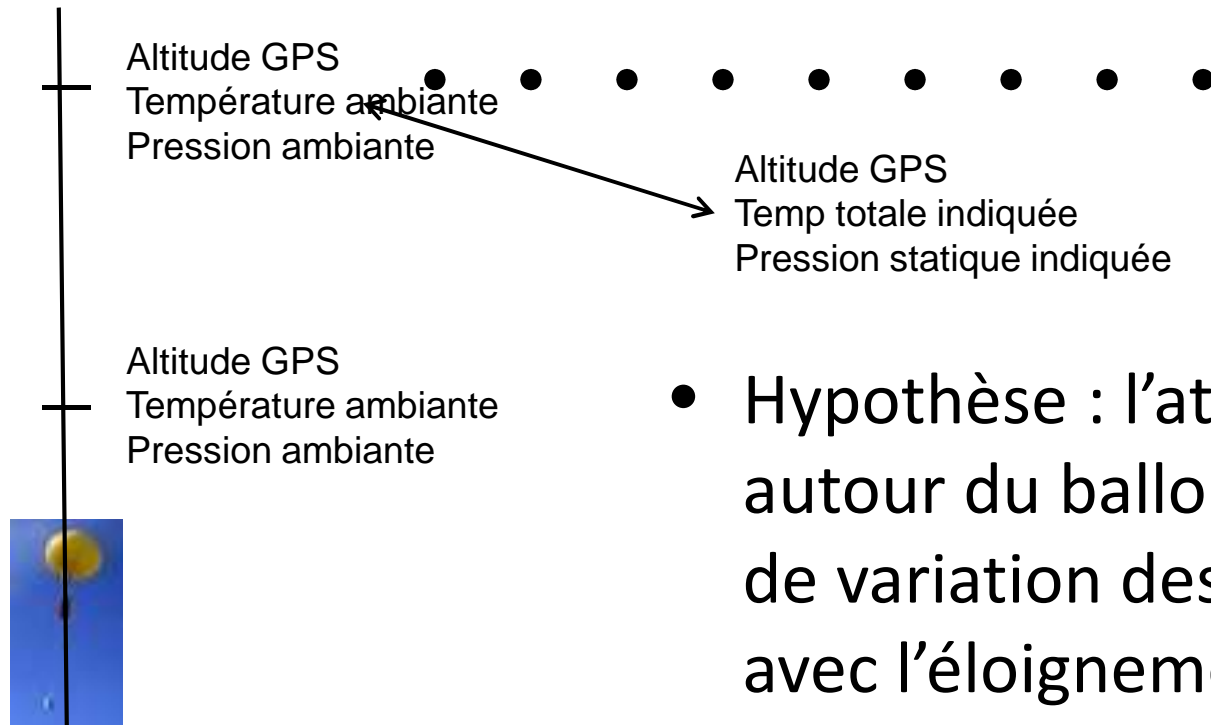
- 360
  - Méthode basée sur la vitesse
  - Altitude, vitesse et inclinaison constantes





# Référence atmosphérique

- Un/Deux ballons

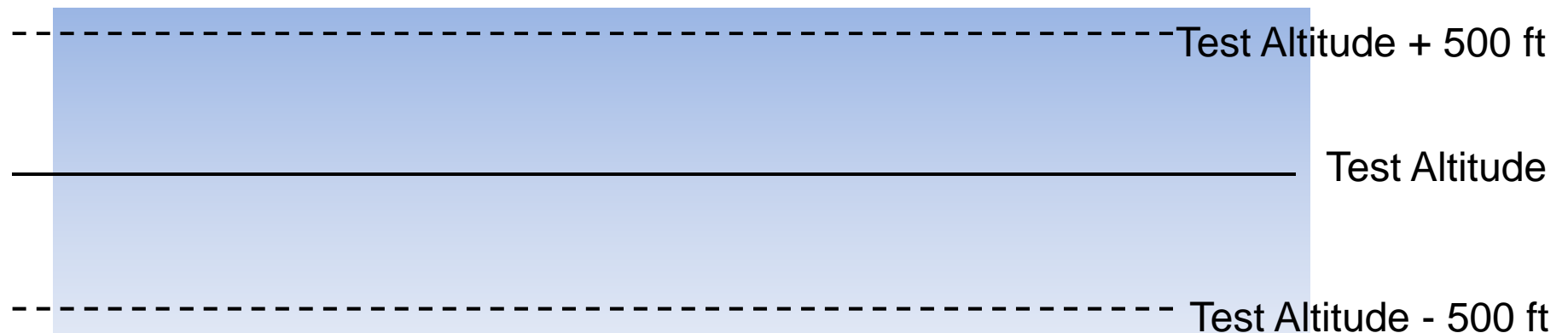


- Hypothèse : l'atmosphère autour du ballon est stable (pas de variation des paramètres avec l'éloignement ou le temps)



# Référence atmosphérique

- Mappage atmosphérique



- Passes réalisées à M 0.70 en dessus et au dessous de la cible
- Point d'essais réalisés à l'intérieur de l'espace analysé
- Passes de mappage répétées après les points d'essais
- Modèle de l'atmosphère fonction de la position et du temps
- Ce modèle est utilisé comme référence (en conjonction avec un ballon ou une précédente calibration)



# Référence atmosphérique

- Méthodes basées sur la vitesse
  - Vecteur vent extrapolé à partir des changements de vitesse sol
  - Vitesse sol corrigée du vent pour obtenir la vitesse vraie de référence
  - Température totale requise pour obtenir une “vitesse vraie corrigée” ( $V_{p_{ic}}$ ) à partir de la vitesse corrigée ( $V_{ic}$ )



# RÉSULTATS DÉTAILLÉS



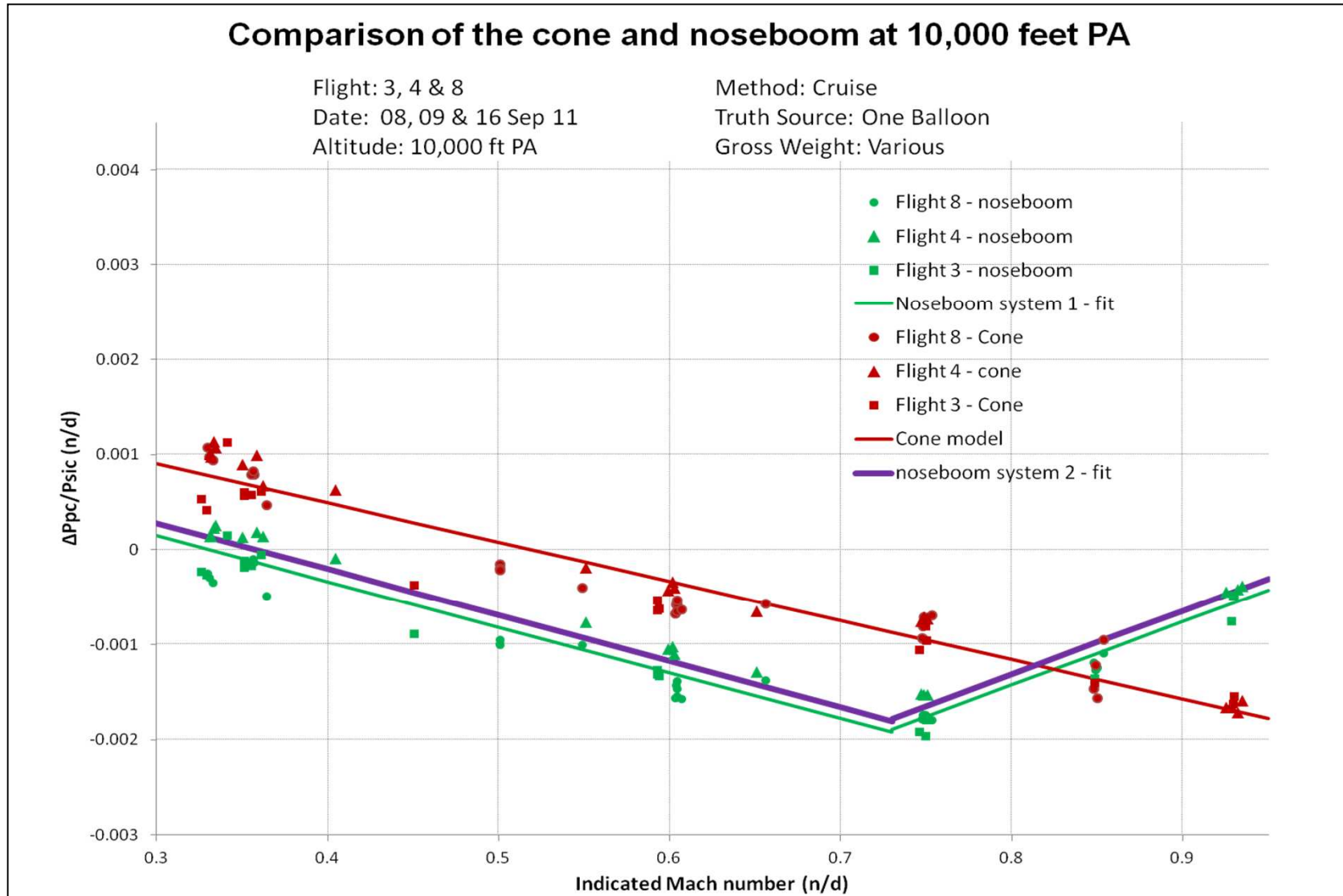


# Objectif détaillé

- Comparer les méthodes de calibration d'erreur de statique :
  - Incertitudes
  - Coûts
  - Charge de travail

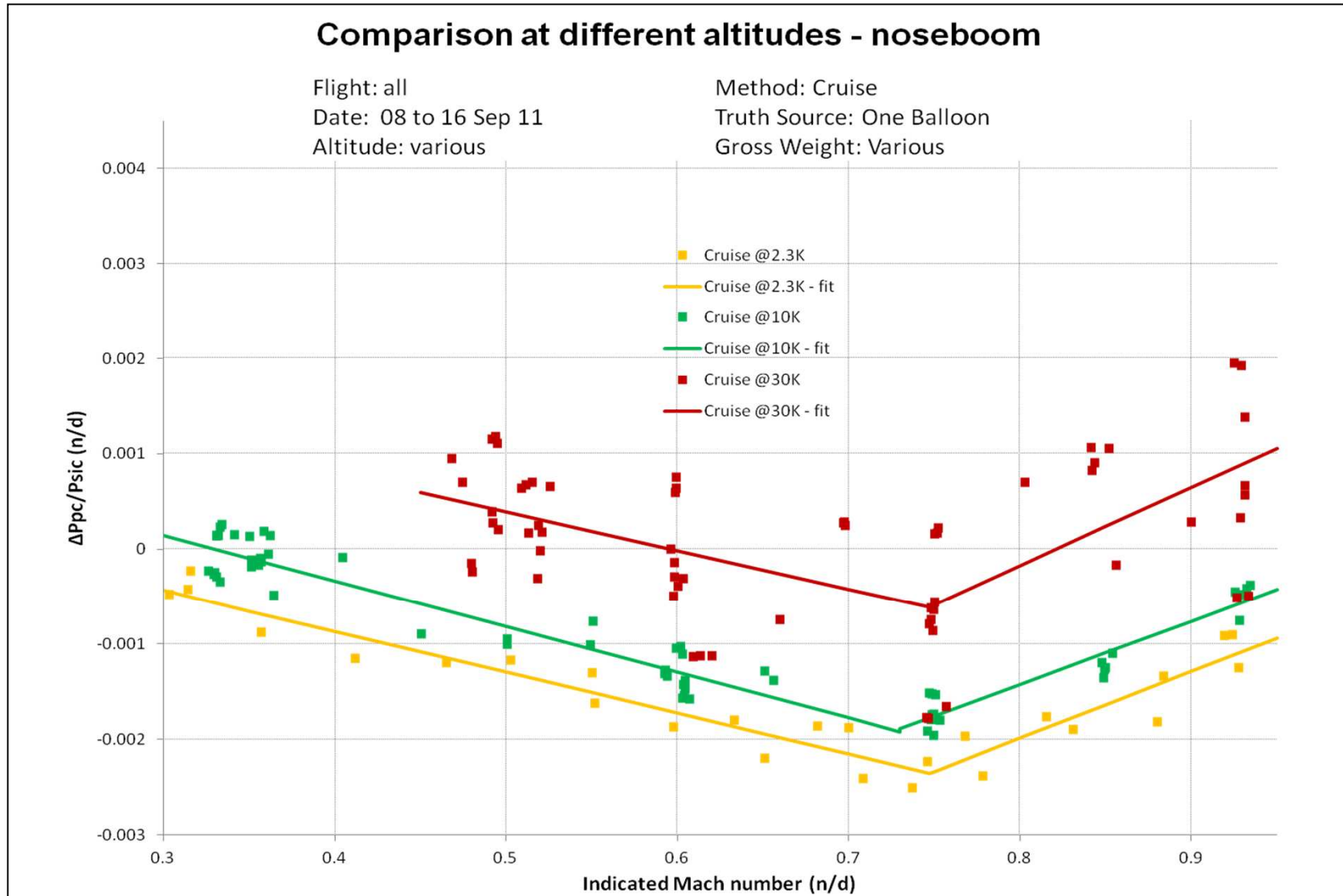


# Cône vs Perche



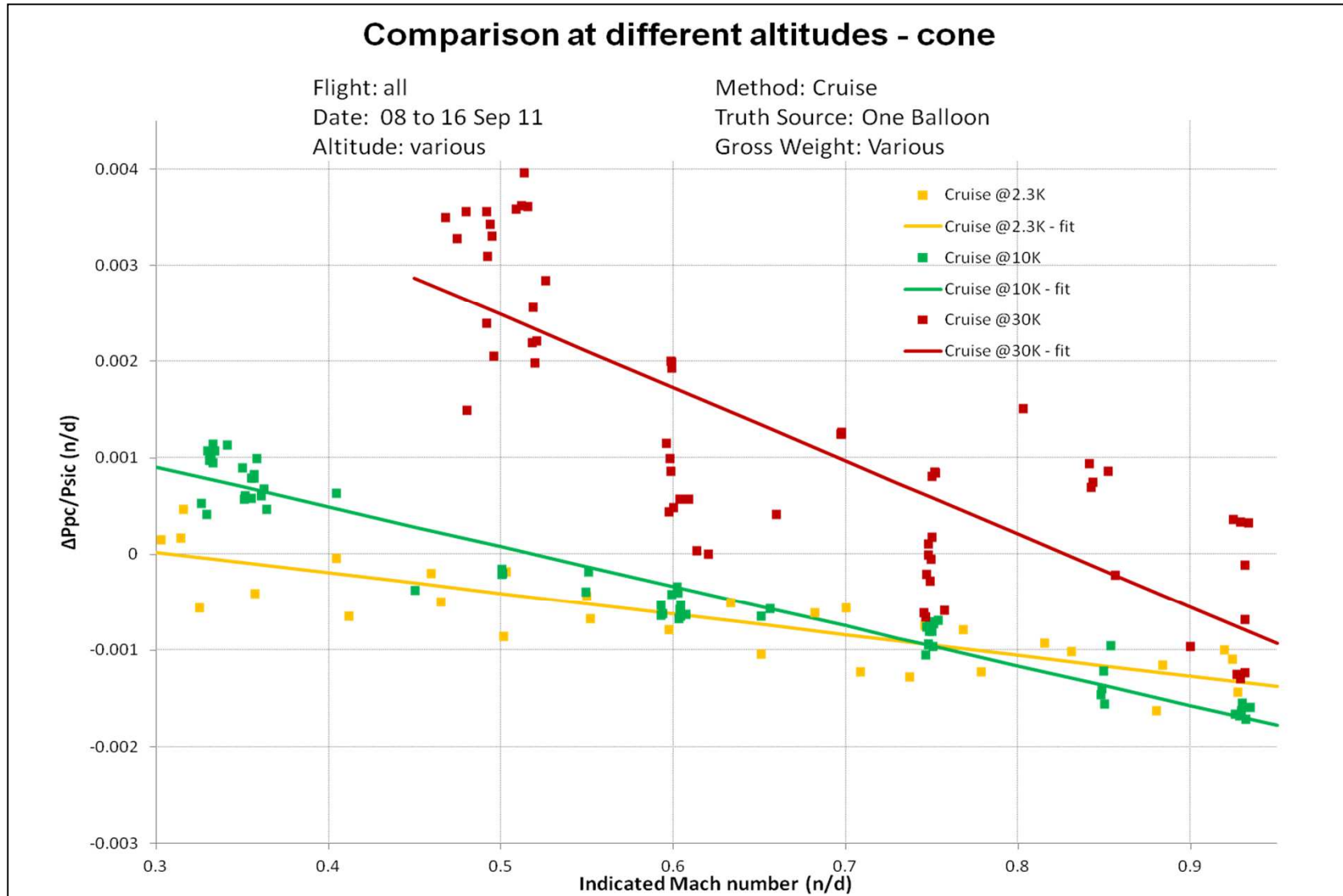


# Effets d'altitude - perche



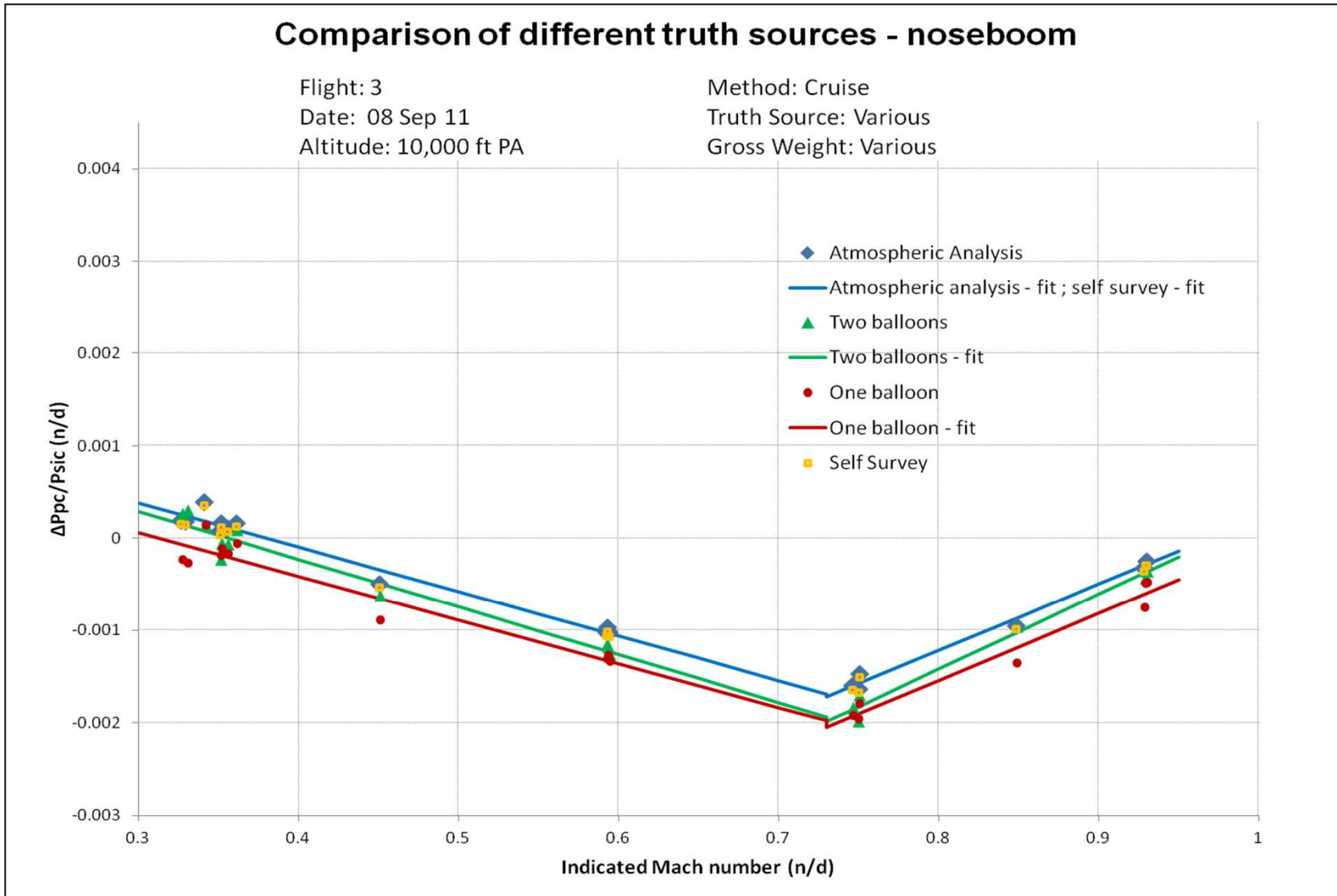


# Effets d'altitude - cône





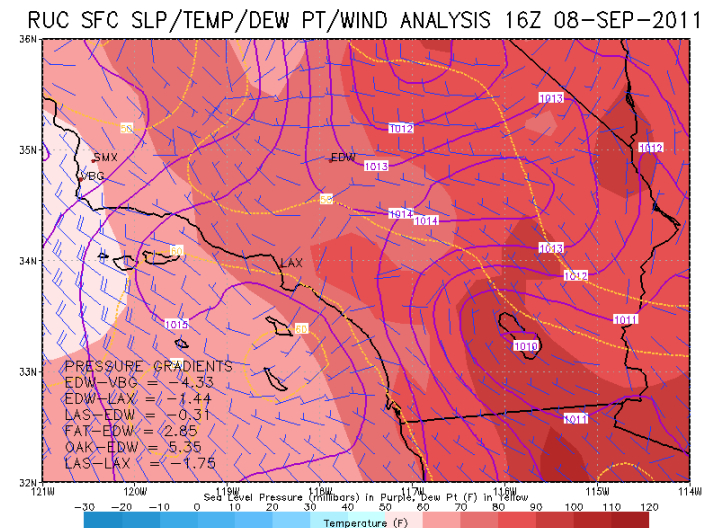
# Références atmosphériques





# Mappage atmosphérique

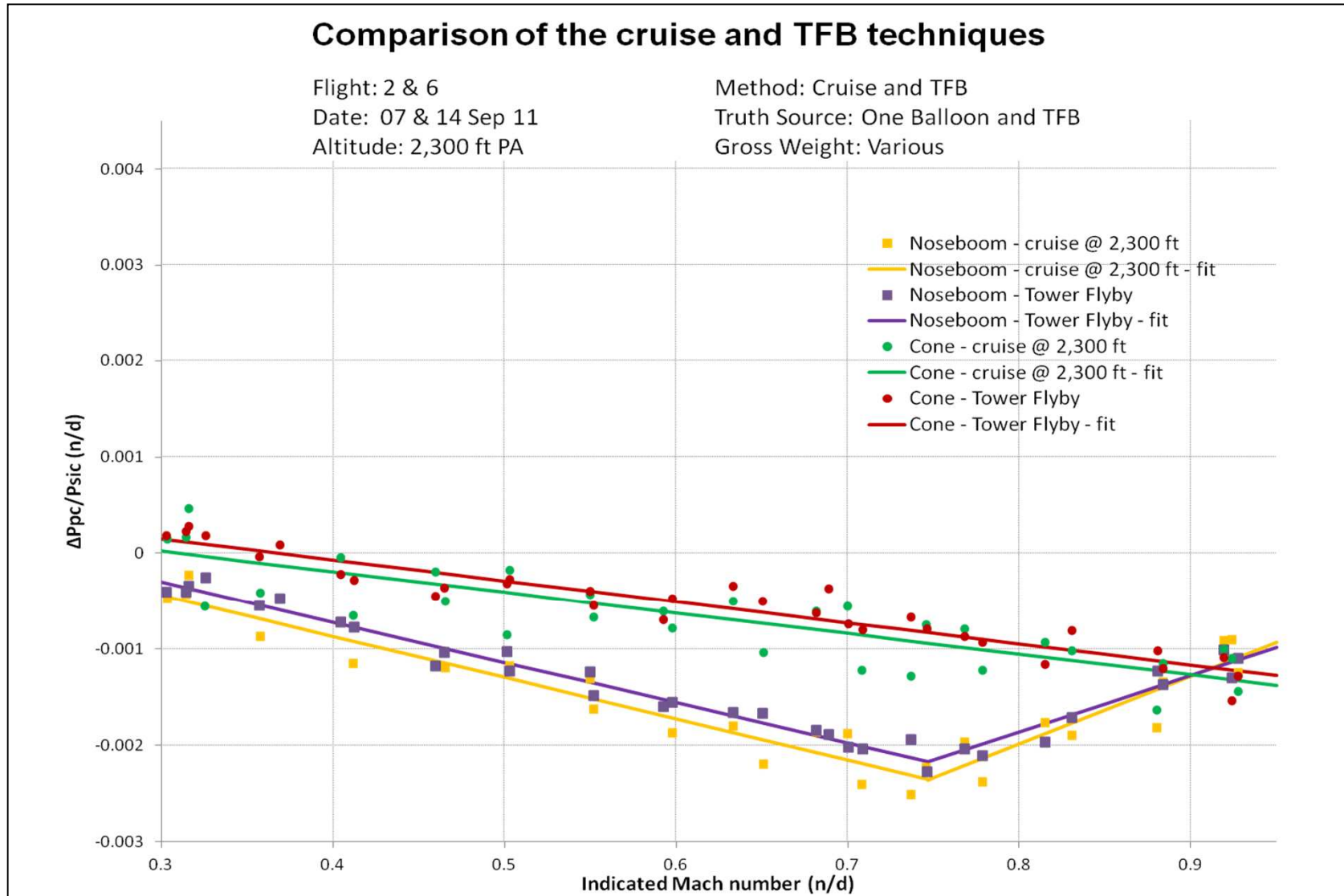
- La pression ambiante est modélisée comme une fonction LINEAIRE de:
  - Altitude
  - Temps
  - Latitude
  - Longitude
- C'est en général incorrect!
  - Petites variations → le modèle a un impact limité
  - Grandes variations → le modèle a une validité limitée







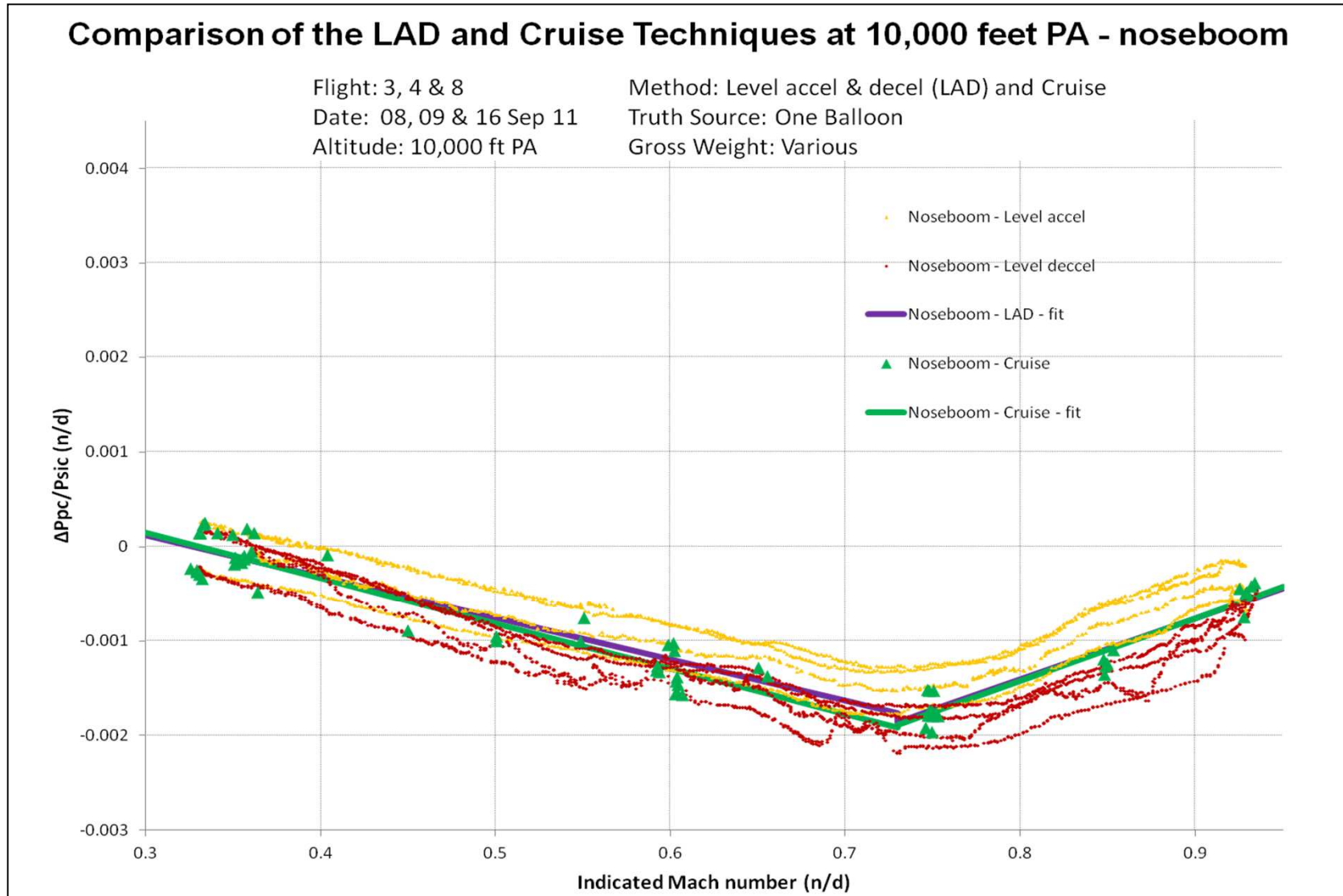
# Paliers stab vs passages tour





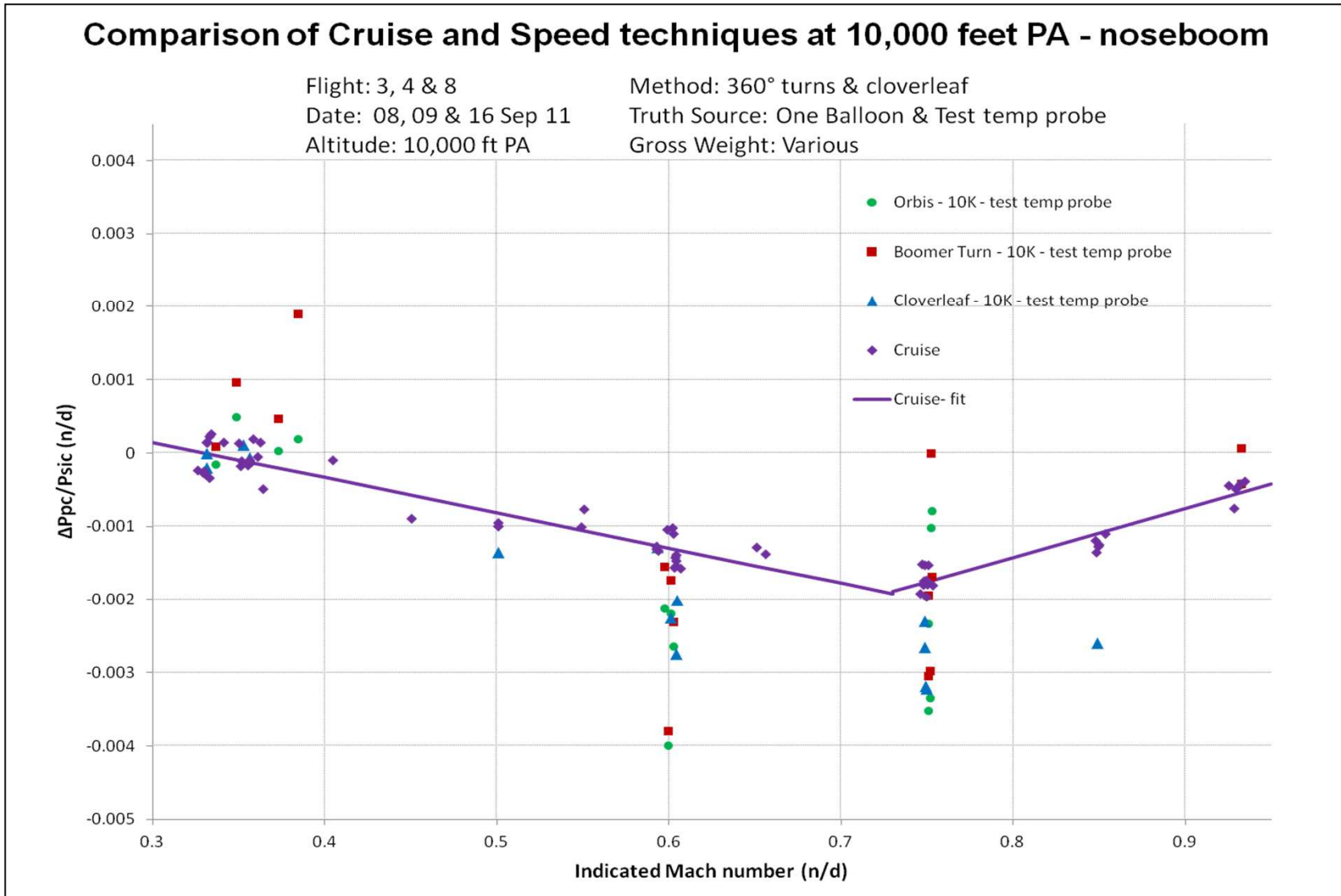


# Paliers stab vs accel/decel





# Paliers stab vs méthodes vitesse





# Calibration de l'erreur de statique

- Le cône et la perche
  - Peuvent être calibrés avec la même précision
- Effets d'altitude
  - La calibration du cône (et de la perche) ne sont PAS INDEPENDANTES de l'altitude
- Méthodes d'essais
  - Paliers stabilisés et passages tour : résultats similaires
  - Paliers stabilisés et accel/decel : résultats similaires
  - Méthodes vitesse : dispersion des résultats bien plus grande
- Références atmosphérique
  - Deux ballons : n'améliore pas significativement la précision
  - Mappage atmosphérique : bon indicateur de qualité



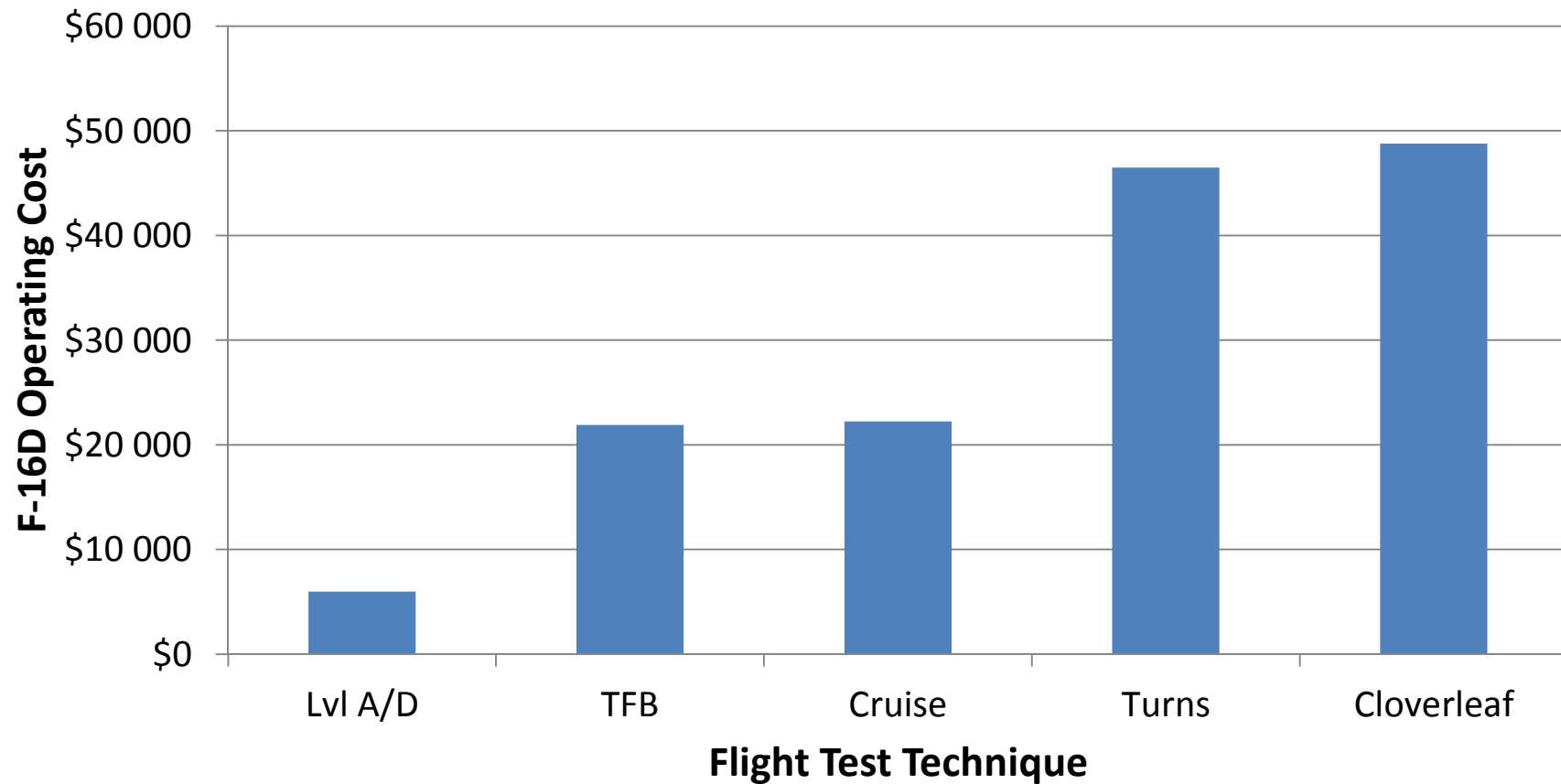
# Calibration: coûts et charge de travail

- Coûts et charge de travail analysés pour toutes les combinaisons de
  - Méthode d'essai,
  - Méthode d'analyse des données,
  - Référence atmosphérique,
  - Équipement nécessaire.



# Coût à l'heure de vol

## Flight Hour Cost per FTT





# Coût des références atmosphériques

Truth Source	Expendable Resource Cost	F-16 Hours	F-16 Operational Costs	Man-Hours	Labor Costs	Total per Flight
1 balloon rawinsonde	\$400			1	\$56	\$456
2 balloon rawinsonde	\$800			12	\$678	\$1,478
Self-Survey		0.84	\$14,830			\$14,830
Atmospheric Analysis	\$400	0.84	\$14,830	1	\$56	\$14,886
Tower Flyby				8	\$452	\$452



# Coûts et charge de travail : résumé

			FTTs - in increasing order of difficulty →								
			Cruise		Turns		Lvl A/D		Cloverleaf		TFB
		Individual Costs	\$22,245		\$46,492		\$5,983		\$48,774		\$21,904
Truth Sources - in increasing order of workload ↓	1 balloon	\$457	\$22,702	\$46,948	\$6,440	\$49,231	N/A				
			Simple & Quick 1	Simple & Quick 1/2	Simple & Quick 2	Simple & Quick 2					
	TFB	\$453	N/A	N/A	N/A	N/A	\$22,357		Simple & Quick 2/3		
	2 balloon	\$1,479	\$23,724	\$47,970	\$7,462	\$50,253	N/A				
			Complex & Quick 1	Complex & Quick 1/2	Complex & Quick 2	Complex & Quick 2					
	Self Survey	\$14,830	\$37,076	\$61,322	\$20,813	\$63,605	N/A				
			Complex & Long 1	Complex & Long 1/2	Complex & Long 2	Complex & Long 2					
	Atmospheric Analysis	\$14,887	\$37,132	\$61,378	\$20,870	\$63,661	N/A				
			Complex & Long 1	Complex & Long 1/2	Complex & Long 2	Complex & Long 2					





# Notes : Pace Car – C-12

- Utilisation des ballons limités car durée de vol trop longue / espace aérien trop large.
- Incertitudes pour la méthode basée sur la vitesse moins grande mais toute fois moins précise que la méthode basée sur l'altitude
- Accélérations/décélérations palier moins concluante (mais discordance entre les résultats pour la perche essai et le système d'origine)



# CONCLUSIONS

**QUESTIONS?**

