

Étude des sources d'erreurs et d'instabilités du lidar Raman de l'IGN

Journées de la Recherche 2015

Leslie David

Olivier Bock, Christian Thom & Jacques Pelon

IGN – LAREG/LOEMI

20 Mars 2015

Historique

Choix du système

Étude des
sources
d'erreurs et
d'instabilités
du lidar
Raman de
l'IGN

Leslie David

Historique

Choix du système

Lidar Rameau

Rapport de mélange

Problématique

Démévap

Objectifs

Réduction des
instabilités

Optique

Électronique

Conclusions

1999 : Action de Recherche NiGPS (Nivellement par GPS)

- Amélioration de la mesure altimétrique du GPS

1 mm d'erreur dans l'estimation du ZTD → erreur de 3 mm sur la hauteur d'une station (*Santerre, 1991*)

2001–2005 : Thèse de Jérôme Tarniewicz

- Conception et développement du lidar Raman pour la mesure de profils de vapeur d'eau atmosphérique

2005–2008 : Thèse de Pierre Bosser

- Couplage lidar Raman/GPS

2008–2009 : Développement du périscope (LOEMI)

Historique

Le lidar Raman de l'IGN : Principe

Étude des
sources
d'erreurs et
d'instabilités
du lidar
Raman de
l'IGN

Leslie David

Historique

Choix du système

Lidar Rameau

Rapport de mélange

Problématique

Déméap

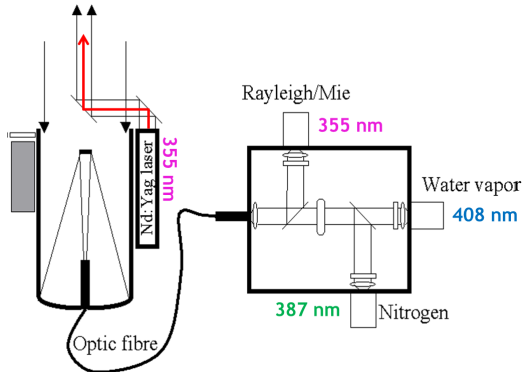
Objectifs

Réduction des
instabilités

Optique

Électronique

Conclusions



- Laser Nd :YAG à 355 nm

Historique

Le lidar Raman de l'IGN : Principe

Étude des
sources
d'erreurs et
d'instabilités
du lidar
Raman de
l'IGN

Leslie David

Historique

Choix du système

Lidar Rameau

Rapport de mélange

Problématique

Déméap

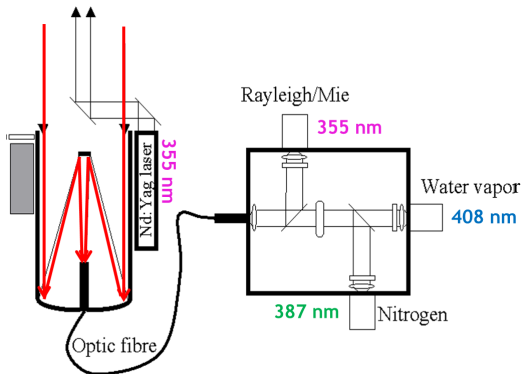
Objectifs

Réduction des
instabilités

Optique

Électronique

Conclusions



- Télescope Cassegrain (\varnothing 30 cm)
- Fibre optique (1 mm, 0,8 mm ou 0,4 mm)

Historique

Le lidar Raman de l'IGN : Principe

Étude des
sources
d'erreurs et
d'instabilités
du lidar
Raman de
l'IGN

Leslie David

Historique

Choix du système

Lidar Rameau

Rapport de mélange

Problématique

Déméap

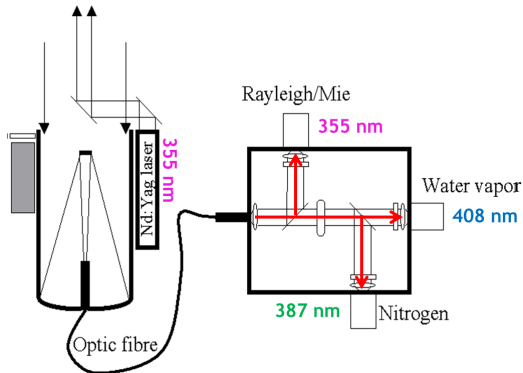
Objectifs

Réduction des
instabilités

Optique

Électronique

Conclusions



- 3 canaux séparés optiquement (Lames) et spectralement (Filtres interférentiels)
- Détection : Photomultiplicateurs (PMT)

Historique

Le lidar Raman de l'IGN : Restitution de la vapeur d'eau et étalonnage

Étude des
sources
d'erreurs et
d'instabilités
du lidar
Raman de
l'IGN

Leslie David

Historique

Choix du système

Lidar Rameau

Rapport de mélange

Problématique

Démévap

Objectifs

Réduction des
instabilités

Optique

Électronique

Conclusions

- Rapport de mélange : r

$$r(z) = r_{N_2} \overbrace{\frac{M_{H_2O}}{M_{N_2}} \frac{\frac{d\sigma_{N_2}(z, \lambda_{N_2})}{d\Omega}}{\frac{d\sigma_{H_2O}(z, \lambda_{H_2O})}{d\Omega}} \frac{T(z, \lambda_{N_2})}{T(z, \lambda_{H_2O})} \frac{C_{N_2}}{C_{H_2O}}}^{C_{lidar}} \cdot \frac{S_{H_2O}(z) - B_{H_2O}}{S_{N_2}(z) - B_{N_2}}$$

- Coefficient d'étalonnage : C_{lidar}
 - C_x : Efficacité instrumentale
 - T_x : Transmittance de l'atmosphère
 - $\frac{d\sigma_x}{d\Omega}$: Section efficace Raman
- Détermination *a priori* : C_{lidar0}

Historique

Le lidar Raman de l'IGN : Restitution de la vapeur d'eau et étalonnage

Étude des
sources
d'erreurs et
d'instabilités
du lidar
Raman de
l'IGN

Leslie David

Historique

Choix du système

Lidar Rameau

Rapport de mélange

Problématique

Démévap

Objectifs

Réduction des
instabilités

Optique

Électronique

Conclusions

- Rapport de mélange : r

$$r(z) = r_{N_2} \overbrace{\frac{M_{H_2O}}{M_{N_2}} \frac{\frac{d\sigma_{N_2}(z, \lambda_{N_2})}{d\Omega}}{\frac{d\sigma_{H_2O}(z, \lambda_{H_2O})}{d\Omega}} \frac{T(z, \lambda_{N_2})}{T(z, \lambda_{H_2O})} \frac{C_{N_2}}{C_{H_2O}}}^{C_{lidar}} \cdot \frac{S_{H_2O}(z) - B_{H_2O}}{S_{N_2}(z) - B_{N_2}}$$

- Coefficient d'étalonnage : C_{lidar}
 - C_x : Efficacité instrumentale
 - T_x : Transmittance de l'atmosphère
 - $\frac{d\sigma_x}{d\Omega}$: Section efficace Raman
- Détermination *a priori* : C_{lidar0}

Historique

Le lidar Raman de l'IGN : Restitution de la vapeur d'eau et étalonnage

Étude des
sources
d'erreurs et
d'instabilités
du lidar
Raman de
l'IGN

Leslie David

Historique

Choix du système

Lidar Rameau

Rapport de mélange

Problématique

Démévap

Objectifs

Réduction des
instabilités

Optique

Électronique

Conclusions

- Rapport de mélange : r

$$r(z) = r_{N_2} \overbrace{\frac{M_{H_2O}}{M_{N_2}} \frac{\frac{d\sigma_{N_2}(z, \lambda_{N_2})}{d\Omega}}{\frac{d\sigma_{H_2O}(z, \lambda_{H_2O})}{d\Omega}} \frac{T(z, \lambda_{N_2})}{T(z, \lambda_{H_2O})} \frac{C_{N_2}}{C_{H_2O}}}^{C_{lidar}} \cdot \frac{S_{H_2O}(z) - B_{H_2O}}{S_{N_2}(z) - B_{N_2}}$$

- Coefficient d'étalonnage : C_{lidar}
 - C_x : Efficacité instrumentale
 - T_x : **Transmittance de l'atmosphère**
 - $\frac{d\sigma_x}{d\Omega}$: Section efficace Raman
- Détermination *a priori* : C_{lidar0}

Historique

Le lidar Raman de l'IGN : Restitution de la vapeur d'eau et étalonnage

Étude des
sources
d'erreurs et
d'instabilités
du lidar
Raman de
l'IGN

Leslie David

Historique

Choix du système

Lidar Rameau

Rapport de mélange

Problématique

Démévap

Objectifs

Réduction des
instabilités

Optique

Électronique

Conclusions

- Rapport de mélange : r

$$r(z) = r_{N_2} \overbrace{\frac{M_{H_2O}}{M_{N_2}} \frac{\frac{d\sigma_{N_2}(z, \lambda_{N_2})}{d\Omega}}{\frac{d\sigma_{H_2O}(z, \lambda_{H_2O})}{d\Omega}} \frac{T(z, \lambda_{N_2})}{T(z, \lambda_{H_2O})} \frac{C_{N_2}}{C_{H_2O}}}^{C_{lidar}} \cdot \frac{S_{H_2O}(z) - B_{H_2O}}{S_{N_2}(z) - B_{N_2}}$$

- Coefficient d'étalonnage : C_{lidar}
 - C_x : Efficacité instrumentale
 - T_x : Transmittance de l'atmosphère
 - $\frac{d\sigma_x}{d\Omega}$: **Section efficace Raman**
- Détermination *a priori* : C_{lidar0}

Historique

Le lidar Raman de l'IGN : Restitution de la vapeur d'eau et étalonnage

Étude des
sources
d'erreurs et
d'instabilités
du lidar
Raman de
l'IGN

Leslie David

Historique

Choix du système

Lidar Rameau

Rapport de mélange

Problématique

Démévap

Objectifs

Réduction des
instabilités

Optique

Électronique

Conclusions

- Rapport de mélange : r

$$r(z) = r_{N_2} \overbrace{\frac{M_{H_2O}}{M_{N_2}} \frac{\frac{d\sigma_{N_2}(z, \lambda_{N_2})}{d\Omega}}{\frac{d\sigma_{H_2O}(z, \lambda_{H_2O})}{d\Omega}} \frac{T(z, \lambda_{N_2})}{T(z, \lambda_{H_2O})} \frac{C_{N_2}}{C_{H_2O}}}^{C_{lidar}} \cdot \frac{S_{H_2O}(z) - B_{H_2O}}{S_{N_2}(z) - B_{N_2}}$$

- Coefficient d'étalonnage : C_{lidar}
 - C_x : Efficacité instrumentale
 - T_x : Transmittance de l'atmosphère
 - $\frac{d\sigma_x}{d\Omega}$: Section efficace Raman
- Détermination *a priori* : C_{lidar0}

Historique

Le lidar Raman de l'IGN : Restitution de la vapeur d'eau et étalonnage

Étude des
sources
d'erreurs et
d'instabilités
du lidar
Raman de
l'IGN

Leslie David

Historique

Choix du système

Lidar Rameau

Rapport de mélange

Problématique

Déméap

Objectifs

Réduction des
instabilités

Optique

Électronique

Conclusions

- Rapport de mélange : r

$$r(z) = r_{N_2} \overbrace{\frac{M_{H_2O}}{M_{N_2}} \frac{\frac{d\sigma_{N_2}(z, \lambda_{N_2})}{d\Omega}}{\frac{d\sigma_{H_2O}(z, \lambda_{H_2O})}{d\Omega}} \frac{T(z, \lambda_{N_2})}{T(z, \lambda_{H_2O})} \frac{C_{N_2}}{C_{H_2O}}}^{C_{lidar}} \cdot \frac{S_{H_2O}(z) - B_{H_2O}}{S_{N_2}(z) - B_{N_2}}$$

- Coefficient d'étalonnage : C_{lidar}

- C_x : Efficacité instrumentale $\approx 10\%$
- T_x : Transmittance de l'atmosphère $\approx 2-5\%$
- $\frac{d\sigma_x}{d\Omega}$: Section efficace Raman $\approx 10\%$

- Détermination *a priori* : $C_{lidar0} \approx 20-25\%$

→ Ajustement nécessaire : étalonnage externe avec un autre instrument

Démévap

Présentation de la campagne

Étude des
sources
d'erreurs et
d'instabilités
du lidar
Raman de
l'IGN

Leslie David

Historique

Choix du système

Lidar Rameau

Rapport de mélange

Problématique

Démévap

Objectifs

Réduction des
instabilités

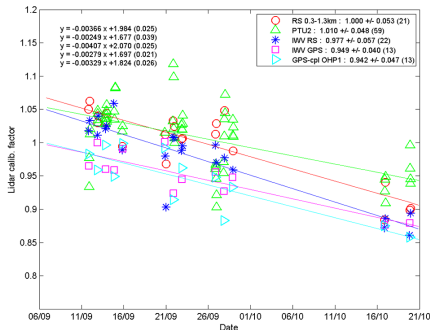
Optique

Électronique

Conclusions

- DÉveloppements MÉthodologiques pour la mesure de VAPeur d'eau
- Sept-Oct 2011 à l'Observatoire de Haute Provence
- Participants :
 - IGN (LOEMI/LAREG)
 - IPSL (LATMOS)
 - Météo-France (DSO/DOA et CNRM)
- Objectifs
 - **Évaluation et comparaison des méthodes d'étalonnage du lidar Raman**
 - Évaluer la qualité des mesures CIVE du GPS et des spectromètres
 - Évaluer la qualité des radiosondes opérationnelles

- Coefficient d'étalonnage
 - Dérive globale : 15% sur deux mois
 - Biais entre les différentes méthodes : 7%
 - Écart-type : 5%



Objectifs de thèse

Nouvelles applications pour le lidar Raman de l'IGN

Étude des
sources
d'erreurs et
d'instabilités
du lidar
Raman de
l'IGN

Leslie David

Historique

Choix du système

Lidar Rameau

Rapport de mélange

Problématique

Démévap

Objectifs

Réduction des
instabilités

Optique

Électronique

Conclusions

Optimisation du système lidar Raman

- permettant une **mesure précise du CIVE** pour la correction des retards de la donnée GPS
 - donnant des **mesures stables à long terme** pour les besoins de l'étude climatologique (Network for the Detection of Atmospheric Composition Change, NDACC)
 - de référence - i.e. fournissant une **mesure absolue** de profils de vapeur d'eau - dans le but d'étalonner d'autres systèmes de mesure de vapeur d'eau
- **Assurer la stabilité du coefficient d'étalonnage**
- Développements instrumentaux (optiques et électroniques)
 - Méthodologie de l'étalonnage

Sources de variations

Recherche de leur origine

Étude des
sources
d'erreurs et
d'instabilités
du lidar
Raman de
l'IGN

Leslie David

Historique

Choix du système

Lidar Rameau

Rapport de mélange

Problématique

Démévap

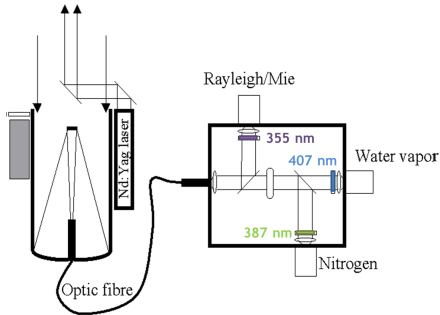
Objectifs

Réduction des
instabilités

Optique

Électronique

Conclusions



- Recherche des sources d'erreurs et d'instabilités
- Retour sur Démévap : Résultats des "Calibrations N₂" → Éléments optiques et électroniques

Sources de variations

Recherche de leur origine

Étude des
sources
d'erreurs et
d'instabilités
du lidar
Raman de
l'IGN

Leslie David

Historique

Choix du système

Lidar Rameau

Rapport de mélange

Problématique

Démévap

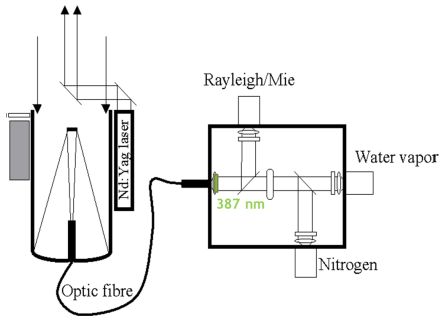
Objectifs

Réduction des
instabilités

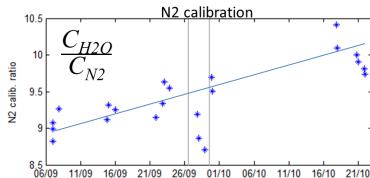
Optique

Électronique

Conclusions



- Recherche des sources d'erreurs et d'instabilités
- Retour sur Démévap : Résultats des "Calibrations N₂" → Éléments optiques et électroniques



Sources de variations

Listing

Étude des
sources
d'erreurs et
d'instabilités
du lidar
Raman de
l'IGN

Leslie David

Historique

Choix du système

Lidar Rameau

Rapport de mélange

Problématique

Démévap

Objectifs

Réduction des
instabilités

Optique

Électronique

Conclusions

- Émission/Réception

- *Beam jitter* et *Beam wandering* (± 0.06 mrad)

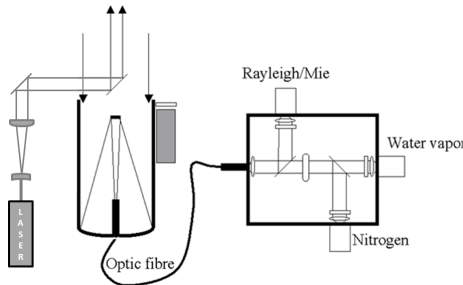
→ Mouvement du faisceau à l'entrée de la fibre

- Réception

- Fluctuation des modes de la fibre (*Avila, 1998*)

- Détection

- Hétérogénéité de la photocathode des PMT



Sources de variations

Listing

- Émission/Réception

- *Beam jitter* et *Beam wandering* (± 0.06 mrad)

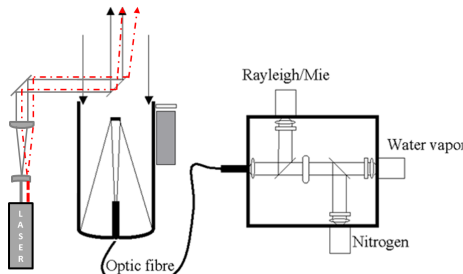
→ Mouvement du faisceau à l'entrée de la fibre

- Réception

- Fluctuation des modes de la fibre (*Avila, 1998*)

- Détection

- Hétérogénéité de la photocathode des PMT



Sources de variations

Listing

Étude des
sources
d'erreurs et
d'instabilités
du lidar
Raman de
l'IGN

Leslie David

Historique

Choix du système

Lidar Rameau

Rapport de mélange

Problématique

Démévap

Objectifs

Réduction des
instabilités

Optique

Électronique

Conclusions

- Émission/Réception

- *Beam jitter* et *Beam wandering* (± 0.06 mrad)
→ Mouvement du faisceau à l'entrée de la fibre

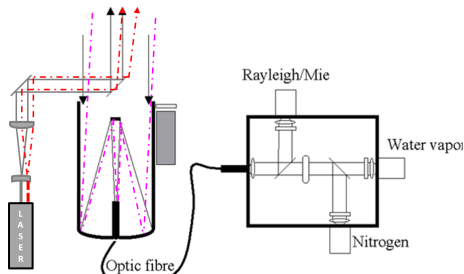


- Réception

- Fluctuation des modes de la fibre (*Avila, 1998*)

- Détection

- Hétérogénéité de la photocathode des PMT



Sources de variations

Listing

Étude des
sources
d'erreurs et
d'instabilités
du lidar
Raman de
l'IGN

Leslie David

Historique

Choix du système

Lidar Rameau

Rapport de mélange

Problématique

Démévap

Objectifs

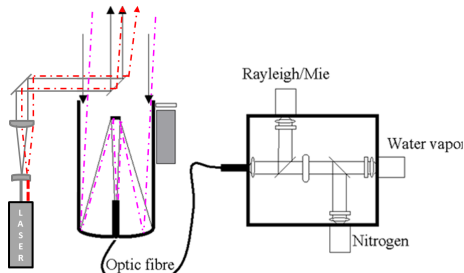
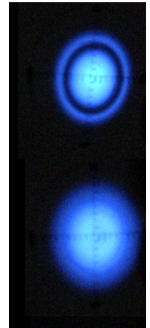
Réduction des
instabilités

Optique

Électronique

Conclusions

- Émission/Réception
 - *Beam jitter* et *Beam wandering* (± 0.06 mrad)
→ Mouvement du faisceau à l'entrée de la fibre
- Réception
 - Fluctuation des modes de la fibre (*Avila, 1998*)
- Détection
 - Hétérogénéité de la photocathode des PMT



Sources de variations

Listing

Étude des
sources
d'erreurs et
d'instabilités
du lidar
Raman de
l'IGN

Leslie David

Historique

Choix du système

Lidar Rameau

Rapport de mélange

Problématique

Démévap

Objectifs

Réduction des
instabilités

Optique

Électronique

Conclusions

- Émission/Réception

- *Beam jitter* et *Beam wandering* (± 0.06 mrad)

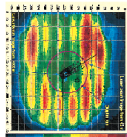
→ Mouvement du faisceau à l'entrée de la fibre

- Réception

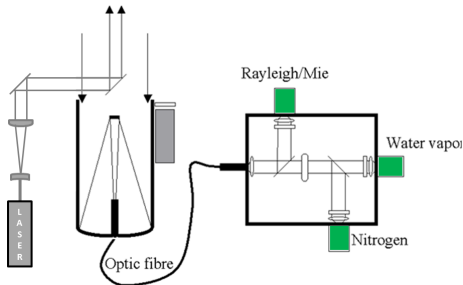
- Fluctuation des modes de la fibre (*Avila, 1998*)

- Détection

- Hétérogénéité de la photocathode des PMT



(Simeonov, 1999)

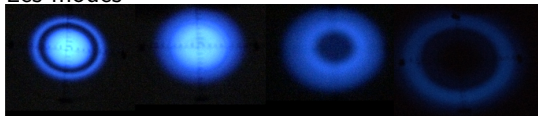


Étude de la partie optique

La fibre optique : instabilités

- Sources d'instabilités de la fibre optique

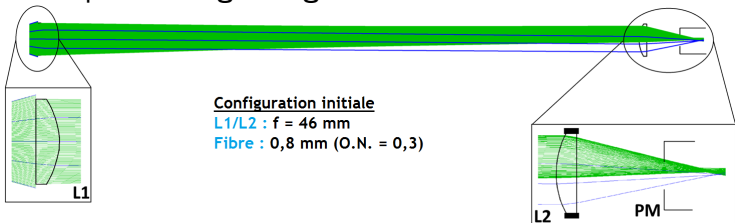
- Les modes



- L'ouverture numérique

- Fabricant : O.N. = 0,22
 - Observée : O.N. = 0,22 ($\varnothing = 0,2-0,4$ mm)
O.N. = 0,30 ($\varnothing = 0,8-1$ mm)

- Conséquence : **Vignettage**



Étude de la partie optique

Vignettage : Solutions développées

Étude des sources d'erreurs et d'instabilités du lidar Raman de l'IGN

Leslie David

Historique

Choix du système

Lidar Rameau

Rapport de mélange

Problématique

Déméap

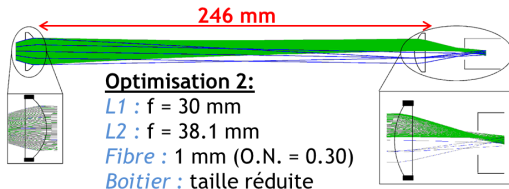
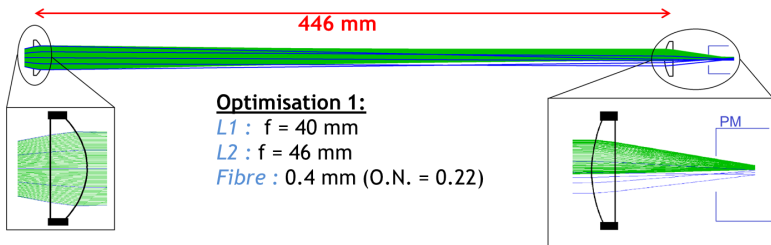
Objectifs

Réduction des instabilités

Optique

Électronique

Conclusions



Étude de la partie optique

Les PMT : instabilités

Étude des
sources
d'erreurs et
d'instabilités
du lidar
Raman de
l'IGN

Leslie David

Historique

Choix du système

Lidar Rameau

Rapport de mélange

Problématique

Déméap

Objectifs

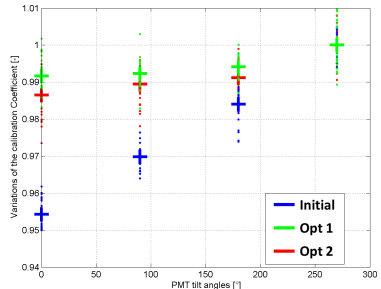
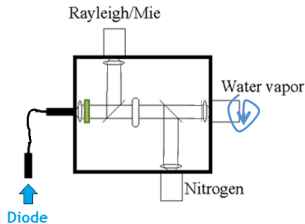
Réduction des
instabilités

Optique

Électronique

Conclusions

- Source d'instabilité des PMT
 - Inhomogénéité de sensibilité de la photocathode
- Conséquence : Variations différentielles
 - Visibles lors d'expériences en laboratoire (diode bleue)



Étude de la partie optique

Vérification expérimentale

Étude des
sources
d'erreurs et
d'instabilités
du lidar
Raman de
l'IGN

Leslie David

Historique

Choix du système

Lidar Rameau

Rapport de mélange

Problématique

Déméap

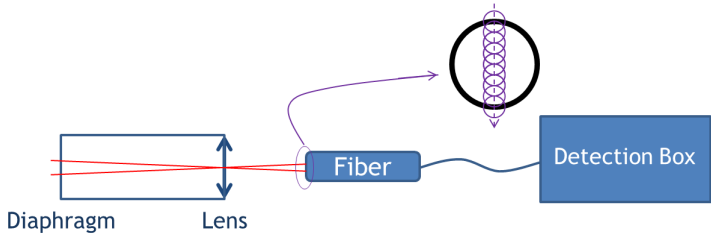
Objectifs

Réduction des
instabilités

Optique

Électronique

Conclusions



Étude de la partie optique

Vérification expérimentale

Étude des
sources
d'erreurs et
d'instabilités
du lidar
Raman de
l'IGN

Leslie David

Historique

Choix du système

Lidar Rameau

Rapport de mélange

Problématique

Déméap

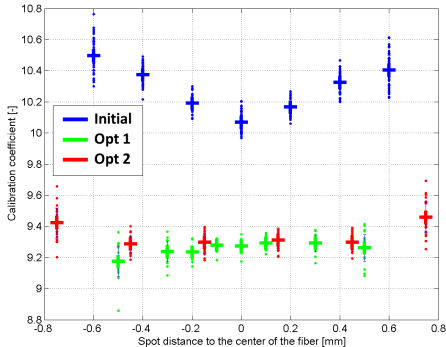
Objectifs

Réduction des
instabilités

Optique

Électronique

Conclusions



Configuration initiale

L1/L2 : $f = 46$ mm

Taille boîte : 446 mm

Fibre : 1 mm

Optimisation 1

L1 : $f = 40$ mm

L2 : $f = 46$ mm

Taille boîte : 446 mm

Fibre : 0,4 mm

Optimisation 2

L1 : $f = 20$ mm

L2 : $f = 46$ mm

Taille boîte : 246 mm

Fibre : 1 mm

Partie électronique

Détection de photons

Étude des
sources
d'erreurs et
d'instabilités
du lidar
Raman de
l'IGN

Leslie David

Historique

Choix du système

Lidar Rameau

Rapport de mélange

Problématique

Démévap

Objectifs

Réduction des
instabilités

Optique

Électronique

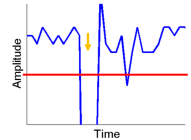
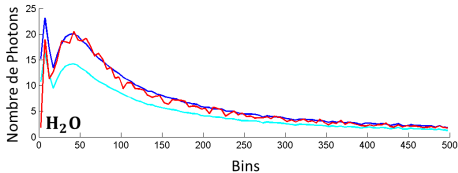
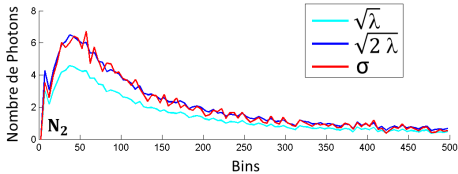
Conclusions

- Problème comptage de photons
 - Loi de Poisson : $\sigma = \sqrt{\lambda}$

Partie électronique

Détection de photons

- Problème comptage de photons
 - Loi de Poisson : $\sigma = \sqrt{\lambda}$
 - Loi de Poisson observée : $\sigma = \sqrt{2 \times \lambda}$ (Bosser, 2008)

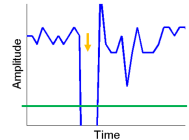
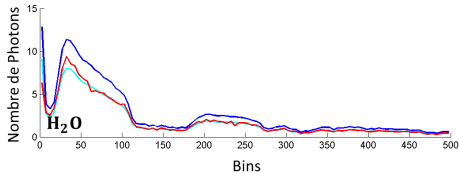
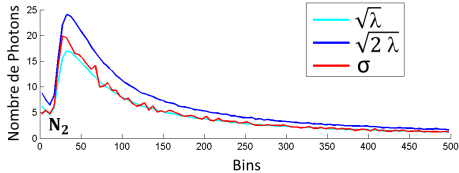


Partie électronique

Détection de photons

- Problème comptage de photons

- Loi de Poisson : $\sigma = \sqrt{\lambda}$
- Loi de Poisson observée : $\sigma = \sqrt{2 \times \lambda}$ (Bosser, 2008)
- Détermination du seuil optimal pour chaque PMT



Étude des
sources
d'erreurs et
d'instabilités
du lidar
Raman de
l'IGN

Leslie David

Historique

Choix du système

Lidar Rameau

Rapport de mélange

Problématique

Déméap

Objectifs

Réduction des
instabilités

Optique

Électronique

Conclusions

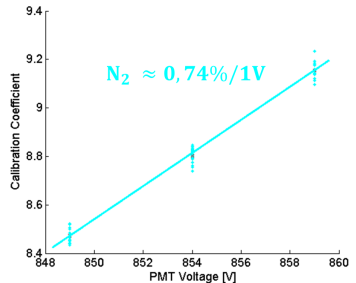
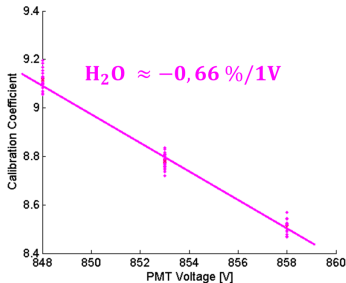
Partie électronique

Détection de photons

Étude des
sources
d'erreurs et
d'instabilités
du lidar
Raman de
l'IGN

Leslie David

- Problème comptage de photons
- Tension PMT
 - Variation différentielle



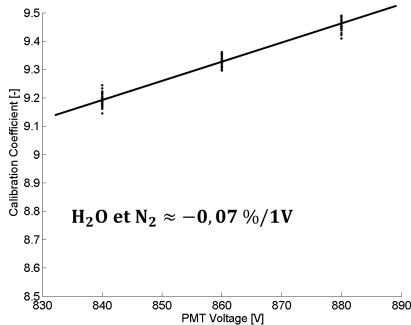
Partie électronique

Détection de photons

Étude des
sources
d'erreurs et
d'instabilités
du lidar
Raman de
l'IGN

Leslie David

- Problème comptage de photons
- Tension PMT
 - Variation différentielle
 - 2 PMT → 1 Alimentation



Conclusions et Perspectives

Étude des
sources
d'erreurs et
d'instabilités
du lidar
Raman de
l'IGN

Leslie David

Historique

Choix du système

Lidar Rameau

Rapport de mélange

Problématique

Déméap

Objectifs

Réduction des
instabilités

Optique

Électronique

Conclusions

- Validation des améliorations
 - Remontage complet du système
 - Mesures de profils atmosphériques
 - Stabilité du coefficient sur le long et le court terme
- Étude d'un nouveau système démarrée (LOEMI)
 - Sans fibre
 - Miniaturisation