

THESE

pour obtenir le grade de

Docteur de l'INPG

Spécialité : Optique, Optoélectronique et Micro-ondes

Préparée au **Département Systèmes** du **LETI - CEA Grenoble**

Titre :

« Etude et réalisation d'un télémètre laser par temps de vol »

Présentée et soutenue publiquement par :

Vincent DELAYE

Directeur de thèse : Germain CHARTIER

Responsable CEA : Pierre LABEYE

Plan de la présentation



Introduction

Télémétrie laser - Télémétrie laser par temps de vol

I - **Éléments et performances d'un télémètre laser temps de vol**

Emission - Réception - Dynamique du signal - Traitement

Résumé des performances

II - **Amélioration des performances, choix de techniques adaptées**

Choix - Précision - Portée

III - **Mise en œuvre expérimentale**

IV - **Résultats**

Dynamique - Précision - Portée - Stratégie de mesure - Application à l'imagerie 3D

Conclusion

Conclusion et perspectives

Télémétrie laser, méthodes et applications

Méthodes et performances

Domaines d'application

METHODE

Mesure de phase

portée

50 m

précision

> mm

cadence

1 Hz

RMCW

km

m

-

FMCW

10 m

< mm

10 kHz

Temps de vol

> 100 m

> cm

10 kHz

pour une puissance laser émise donnée

automobile, militaire

géologie, topographie

aéronautique, spatiale

sports (golf),

aide à la navigation

imagerie 3D...

Méthode :

Télémétrie laser par temps de vol



Application et spécifications :

Imagerie 3D

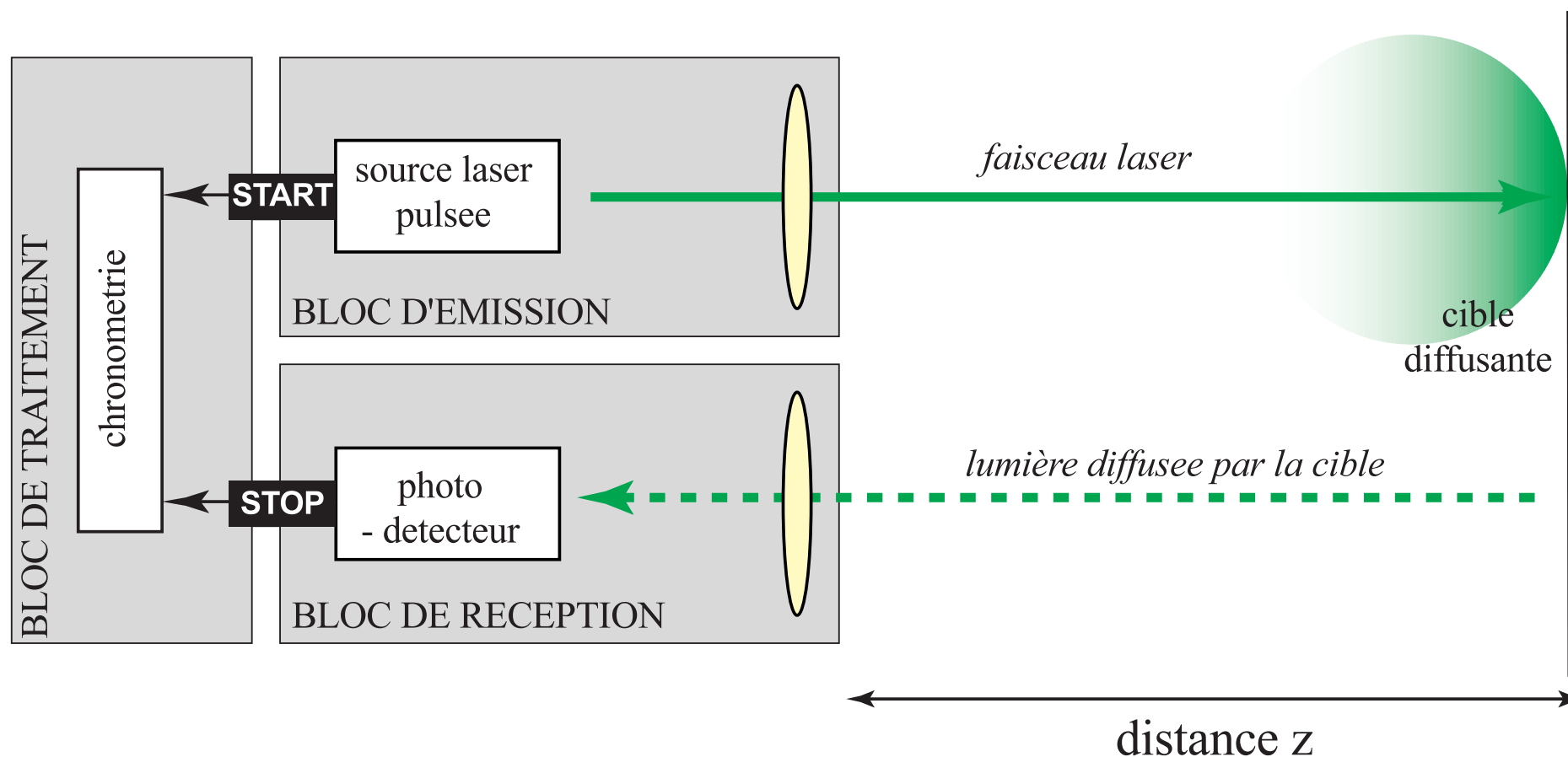
portée : > 100 m

précision : cm

cadence : 10 kHz

Principe de la télémétrie laser temps de vol

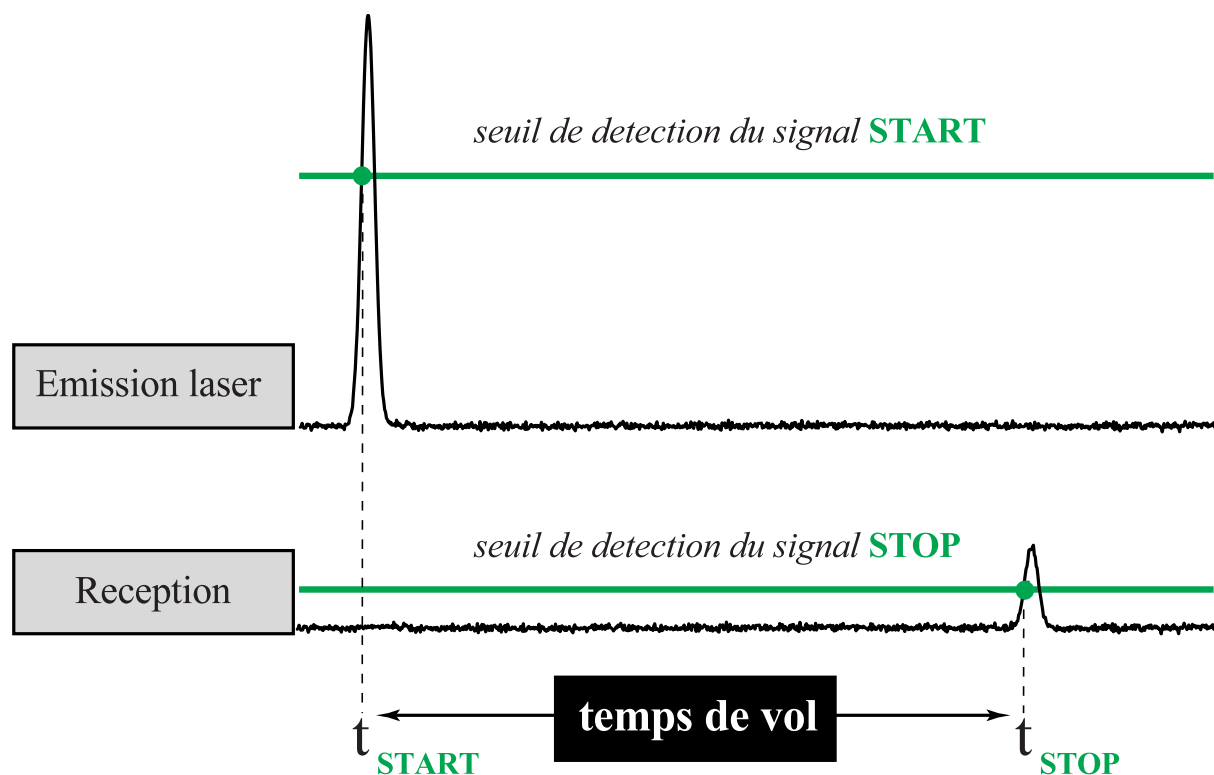
Schéma de principe d'un télémètre



Détection de signaux optiques de l'ordre de 100 nW - 10 μ W

Principe de la télémétrie laser temps de vol

Principe de la mesure de distance



seuils de détection



mesure de distance z

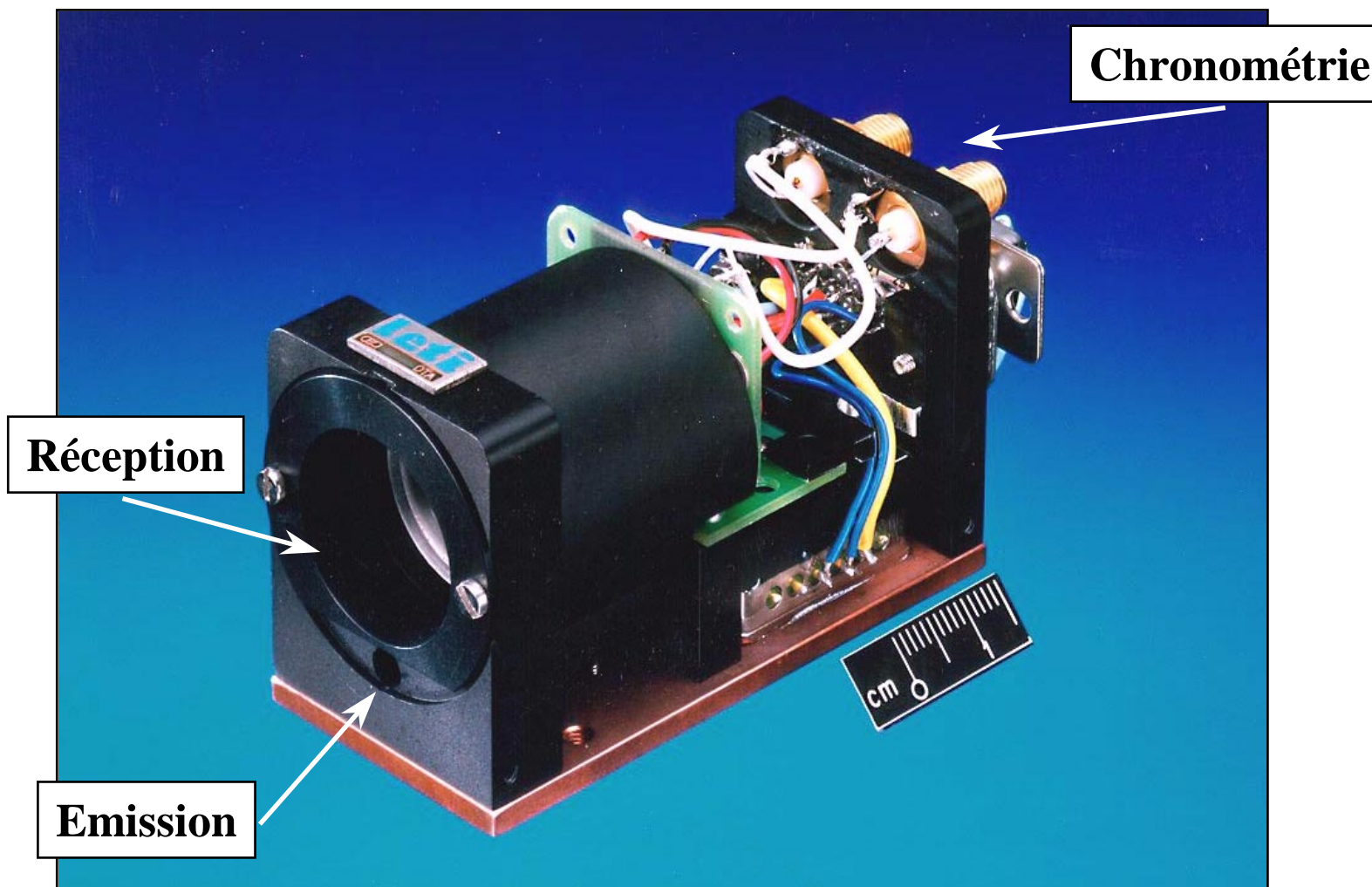
$$z = \frac{c}{2} \cdot (\text{temps de vol})$$

c : vitesse de la lumière

Exemple pour 100 m : temps de vol = 600 ns

Précision de 1 cm : mesure du temps à 60 ps près

Télémètre laser temps de vol compact



Télémètre utilisant un microlaser déclenché passivement, développé au LETI

Plan de la présentation



Introduction

Télémétrie laser - Télémétrie laser par temps de vol

I - Éléments et performances d'un télémètre laser temps de vol

Emission - Réception - Dynamique du signal - Traitement

Résumé des performances

II - Amélioration des performances, choix de techniques adaptées

Choix - Précision - Portée

III - Mise en œuvre expérimentale

IV - Résultats

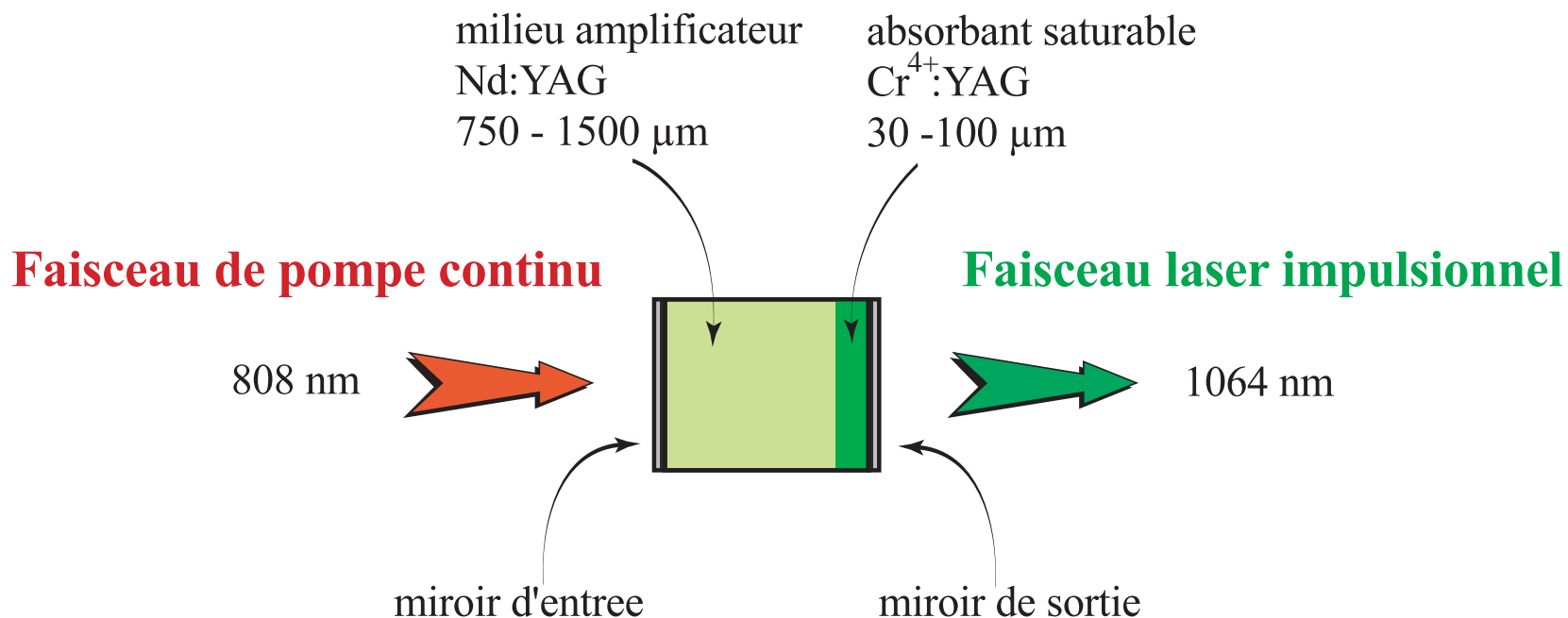
Dynamique - Précision - Portée - Stratégie de mesure - Application à l'imagerie 3D

Conclusion

Conclusion et perspectives

Partie émission laser

Structure d'un microlaser déclenché passivement



Points clés :

Puissance crête (kW)

Largeur (ns)

Fréquence de récurrence (kHz)

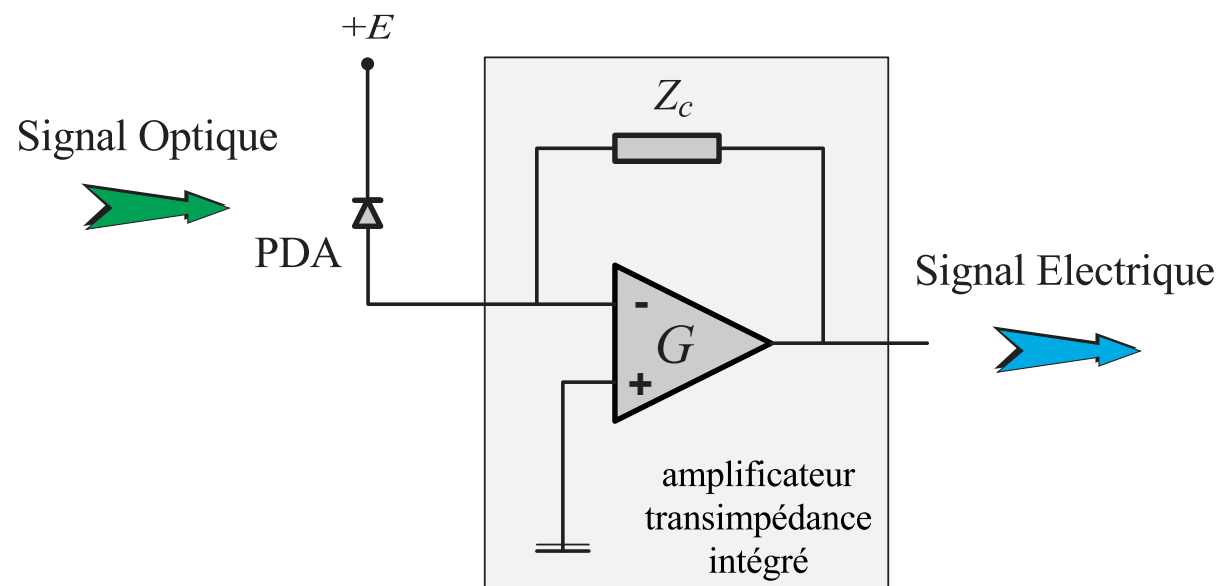
Divergence (mrad)



Sécurité Oculaire

Partie réception

Circuit électronique de réception



photodiode à avalanche (InGaAs) et amplificateur transimpédance

Points clés :

Gain

Bande passante

Bruits (RSB)

CEM

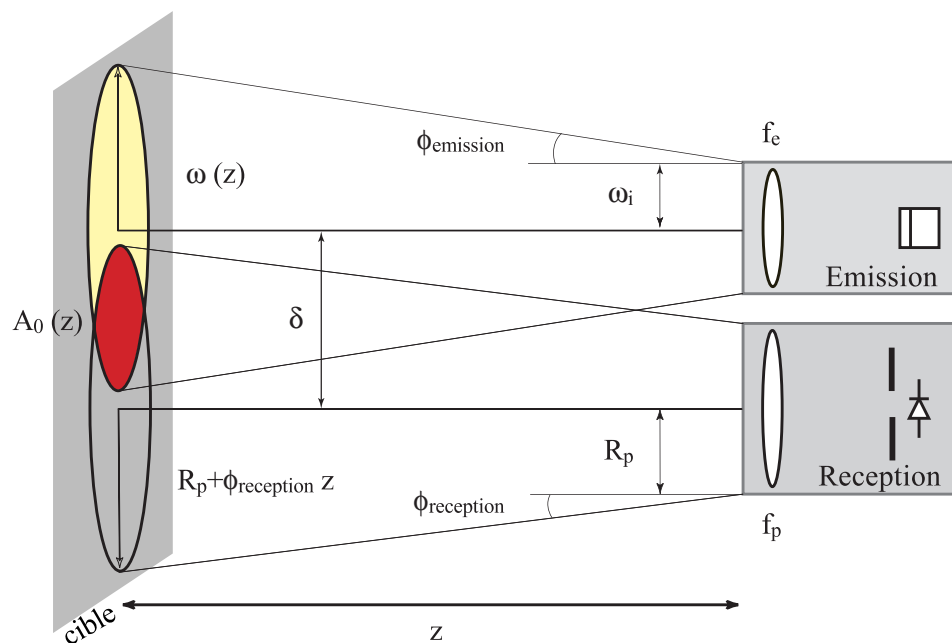
Dynamique (100)

Rapport signal sur bruit des puissances électriques

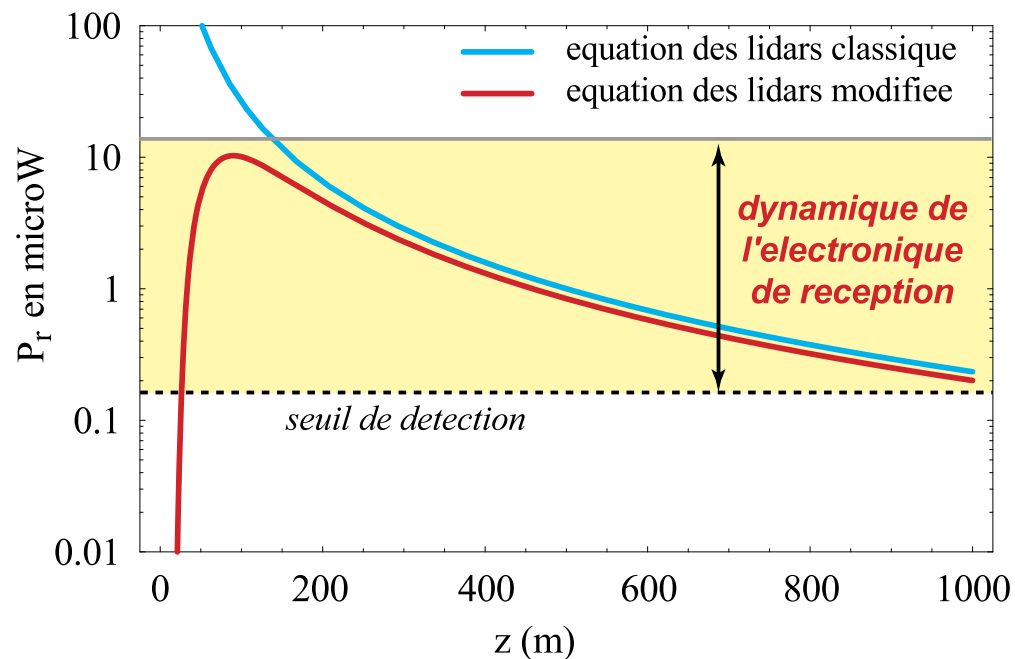
$$RSB = \frac{\eta(B) \cdot P_{signal}}{B \cdot [P'_{thermique} + P'_{ampli} + P'_{obscurité} + P'_{quantique} + P'_{parasite}]}$$

Dynamique du signal

Configuration optique et géométrique



Puissance optique reçue (Distance)

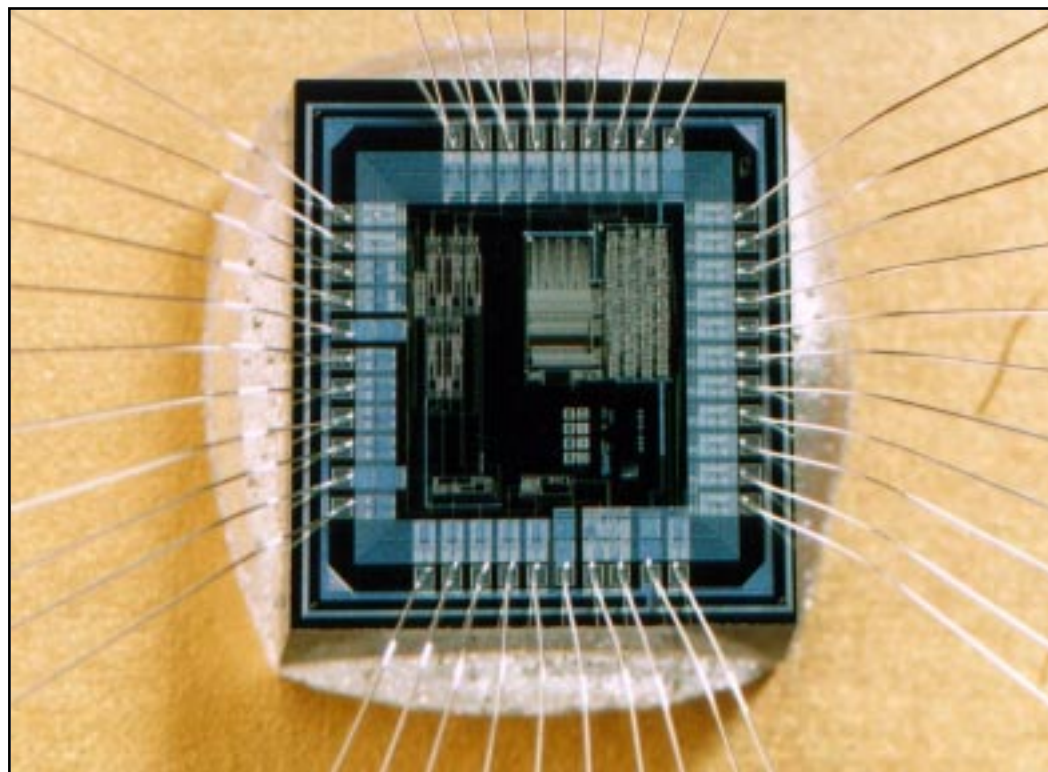


Points clés :

Focale de l'optique de réception, Entre-axe, angle entre les axes
 Diamètre du photodétecteur...

Partie traitement, ASIC de chronométrie

Electronique compacte de mesure de temps de vol



résolution : 60 ps (1 cm)

cadence : 10 μ s/mesure

faible consommation

sortie de la distance digitale

Performances d'un télémètre laser par temps de vol

Paramètres principaux influant sur les performances d'un télémètre

Précision

Largeur de l'impulsion	↘
Rapport signal sur bruit	↗
Position du seuil	Optimum

Portée

Rapport signal sur bruit	↗
Puissance crête laser	↗
Ouverture réception	↗
Gain du détecteur	Optimum

Cadence

Fréquence de récurrence	↗
-------------------------	---

Performances typiques des télémètres développés au LETI :

précision : ± 3 cm

écart-type : 1 cm

erreur systématique : 2 à 3 cm

portée : > 100 m

cadence : 10 kHz

Plan de la présentation



Introduction

Télémétrie laser - Télémétrie laser par temps de vol

I - Éléments et performances d'un télémètre laser temps de vol

Emission - Réception - Dynamique du signal - Traitement

Résumé des performances

II - Amélioration des performances, choix de techniques adaptées

Choix - Précision - Portée

III - Mise en œuvre expérimentale

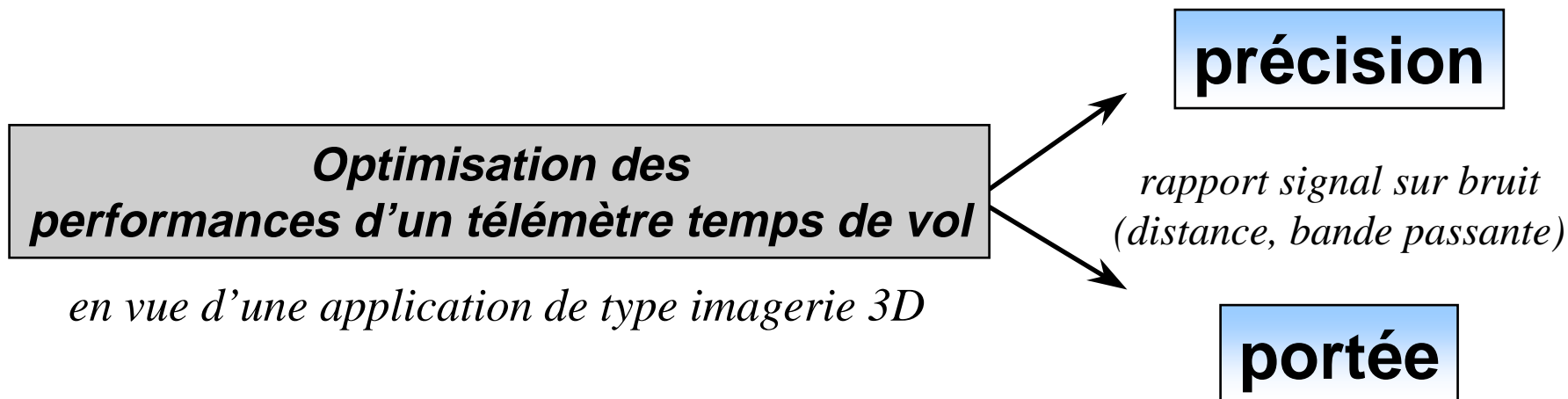
IV - Résultats

Dynamique - Précision - Portée - Stratégie de mesure - Application à l'imagerie 3D

Conclusion

Conclusion et perspectives - Application à l'imagerie 3D

Améliorations des performances



Première approche : **amplification optique**
(ampli à fibre optique par exemple)

Deuxième approche : **traitement numérique du signal**

- recherche et mise en œuvre des techniques adaptées



Un seul détecteur
Fréquence d'échantillonnage
Bruit de numérisation
Cadence des mesures

Traitements numériques, amélioration de la précision

Méthodes

Régression linéaire (1ms)

Régression non-linéaire (10 ms)

gaussienne

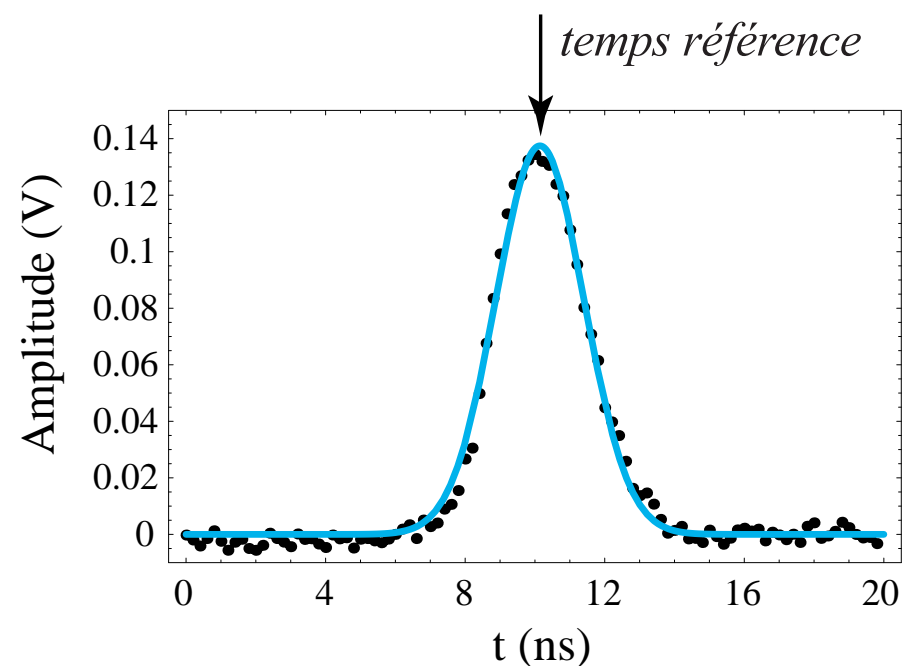
gaussienne asymétrique

double sigmoïde asymétrique

gaussienne amortie...

Corrélation (50 ms)

Exemple



Régression non-linéaire : fonction gaussienne

gain d'un facteur 3 par rapport à la télémétrie «analogique»

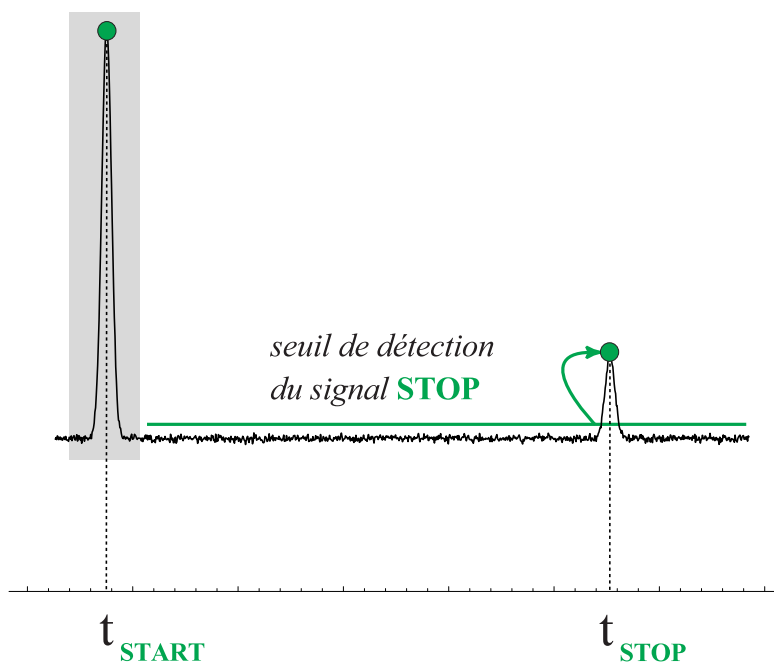
Mesure différentielle du temps de vol

Mesure différentielle

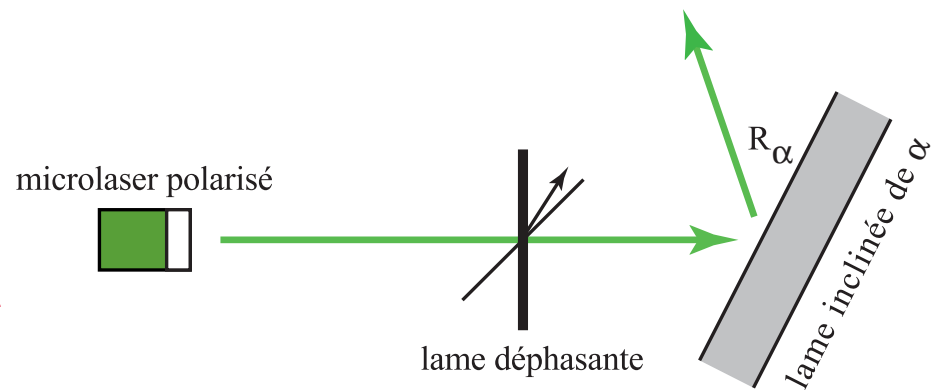
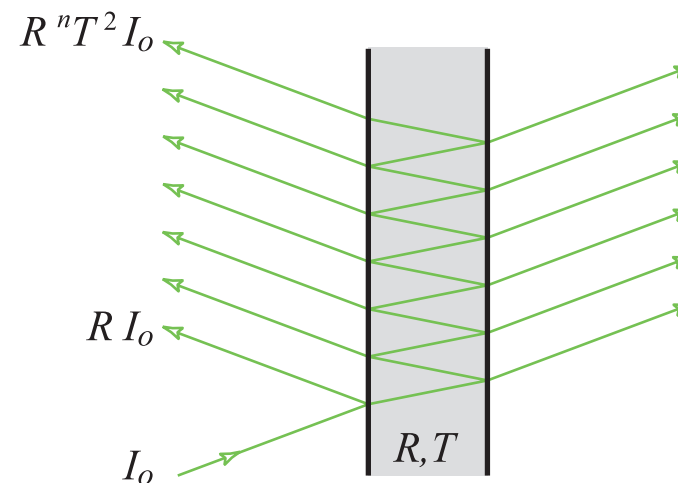
Dispositif de prélèvement d'une très faible partie du faisceau à l'émission

recherche du maximum de l'impulsion
START
Emission laser

Réception APD

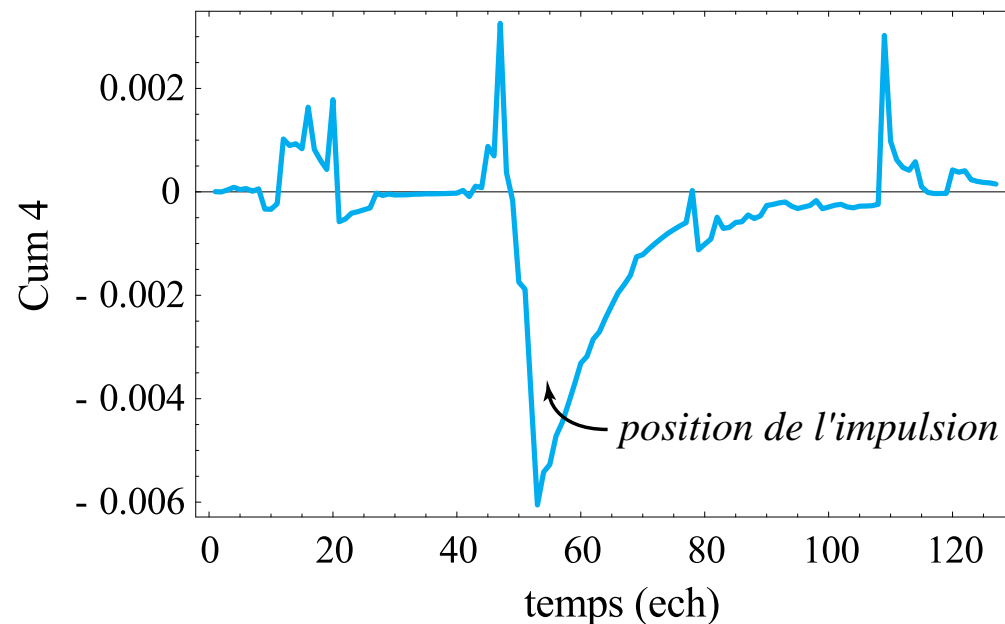
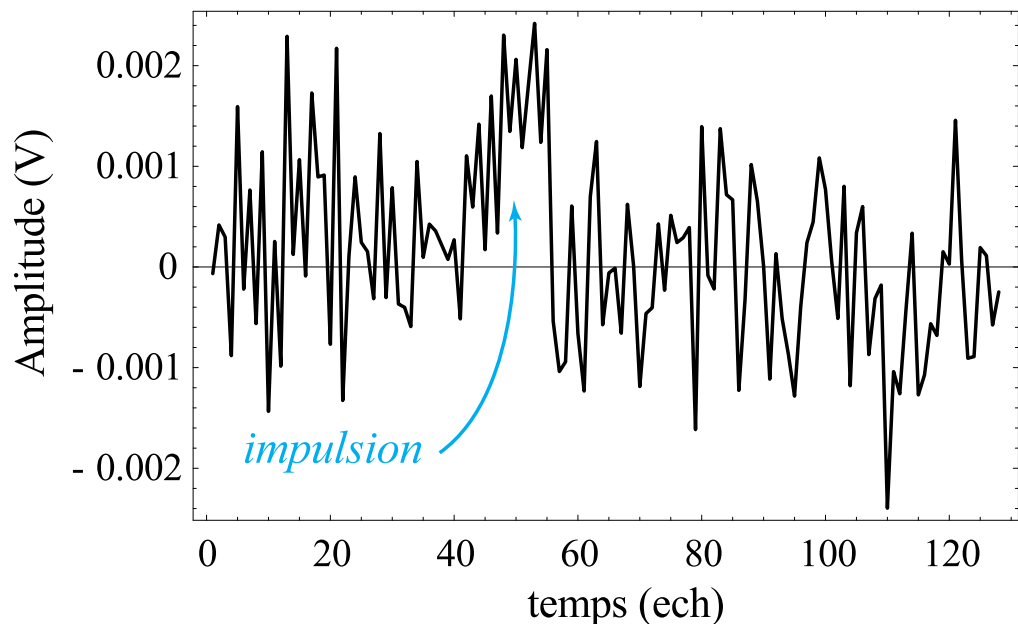


réponse identique pour les deux impulsions



Traitements numériques, amélioration de la portée

Statistiques d'ordre supérieur : cumulant d'ordre 4



Exemple de simulation :
impulsion d'amplitude **2,5 mV**
écart-type du bruit de **1 mV**

Cumulant d'ordre 4 (SOS)

$$Cum_4(x) = E[x^4] - 3 \cdot E[x^2]^2$$

détection d'un signal noyé dans le bruit



augmentation de la portée

Plan de la présentation



Introduction

Télémétrie laser - Télémétrie laser par temps de vol

I - Éléments et performances d'un télémètre laser temps de vol

Emission - Réception - Dynamique du signal - Traitement

Résumé des performances

II - Amélioration des performances, choix de techniques adaptées

Choix - Précision - Portée

III - Mise en œuvre expérimentale

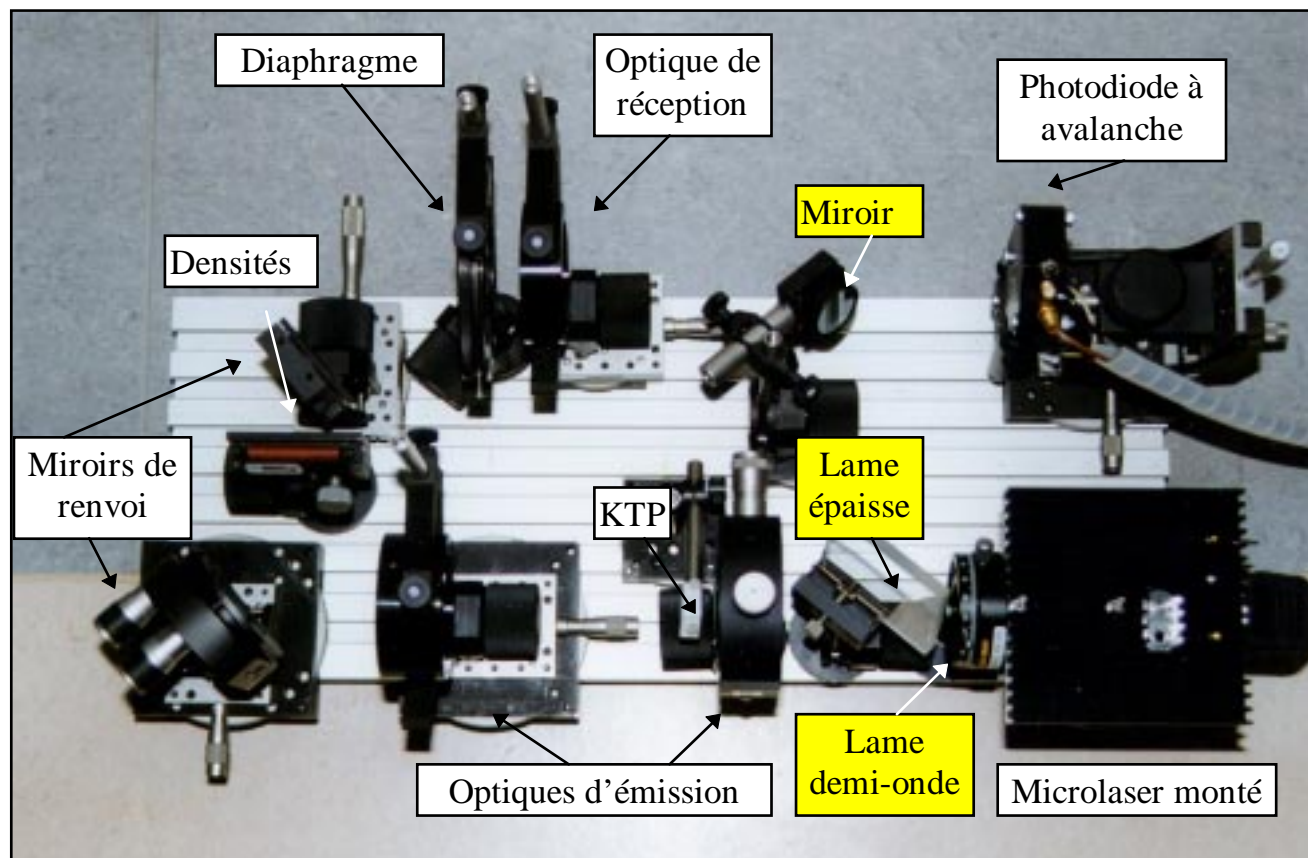
IV - Résultats

Dynamique - Précision - Portée - Stratégie de mesure - Application à l'imagerie 3D

Conclusion

Conclusion et perspectives - Application à l'imagerie 3D

Montage optique expérimental



Caractéristiques : *émission laser*

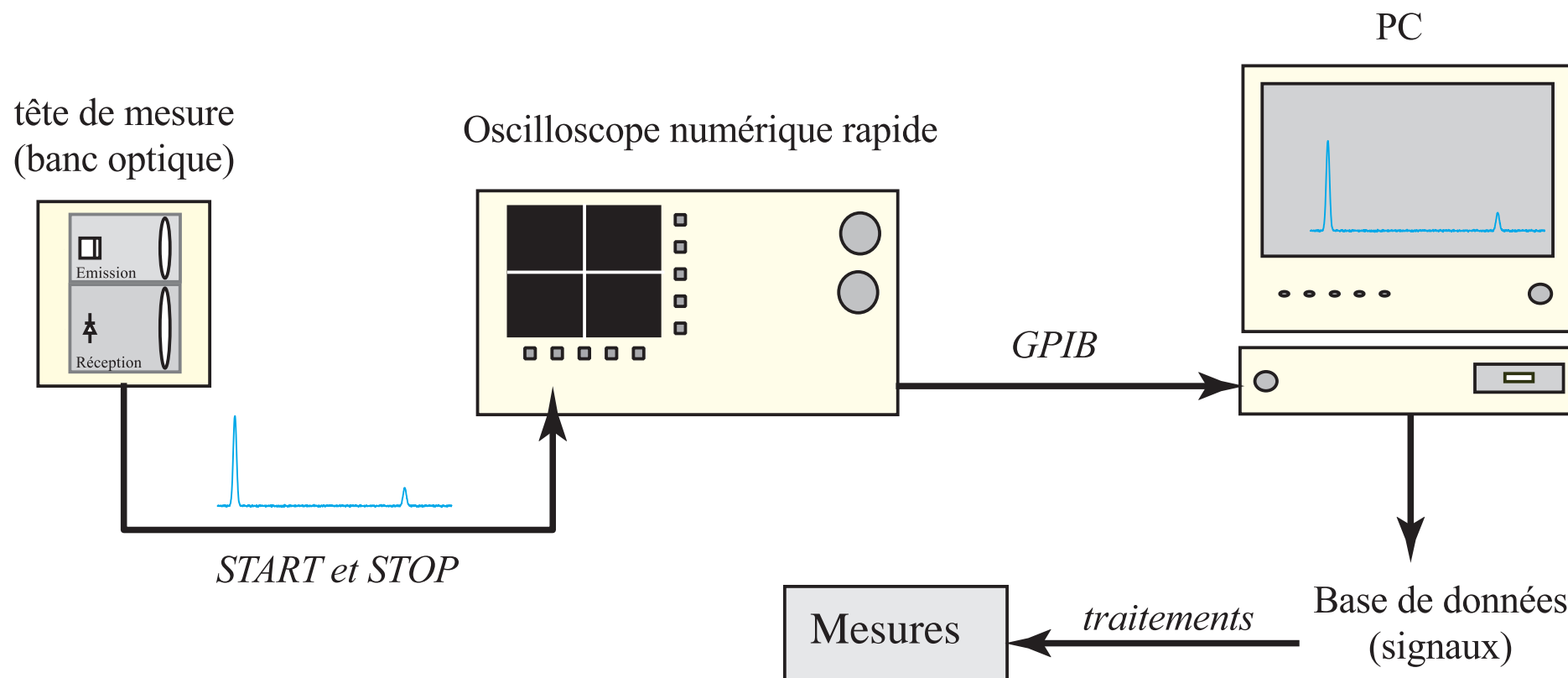
divergence = 0,5 mrad
 P_e = réglable (1 kW max)
 FWHM = 2,5 ns

réception

ouverture = 50 mm
 focale = 200 mm
 $\Delta\phi = 1,6$ mrad

Chaîne de mesure

Schéma de principe :



Plan de la présentation



Introduction

Télémétrie laser - Télémétrie laser par temps de vol

I - Éléments et performances d'un télémètre laser temps de vol

Emission - Réception - Dynamique du signal - Traitement

Résumé des performances

II - Amélioration des performances, choix de techniques adaptées

Choix - Précision - Portée

III - Mise en œuvre expérimentale

IV - Résultats

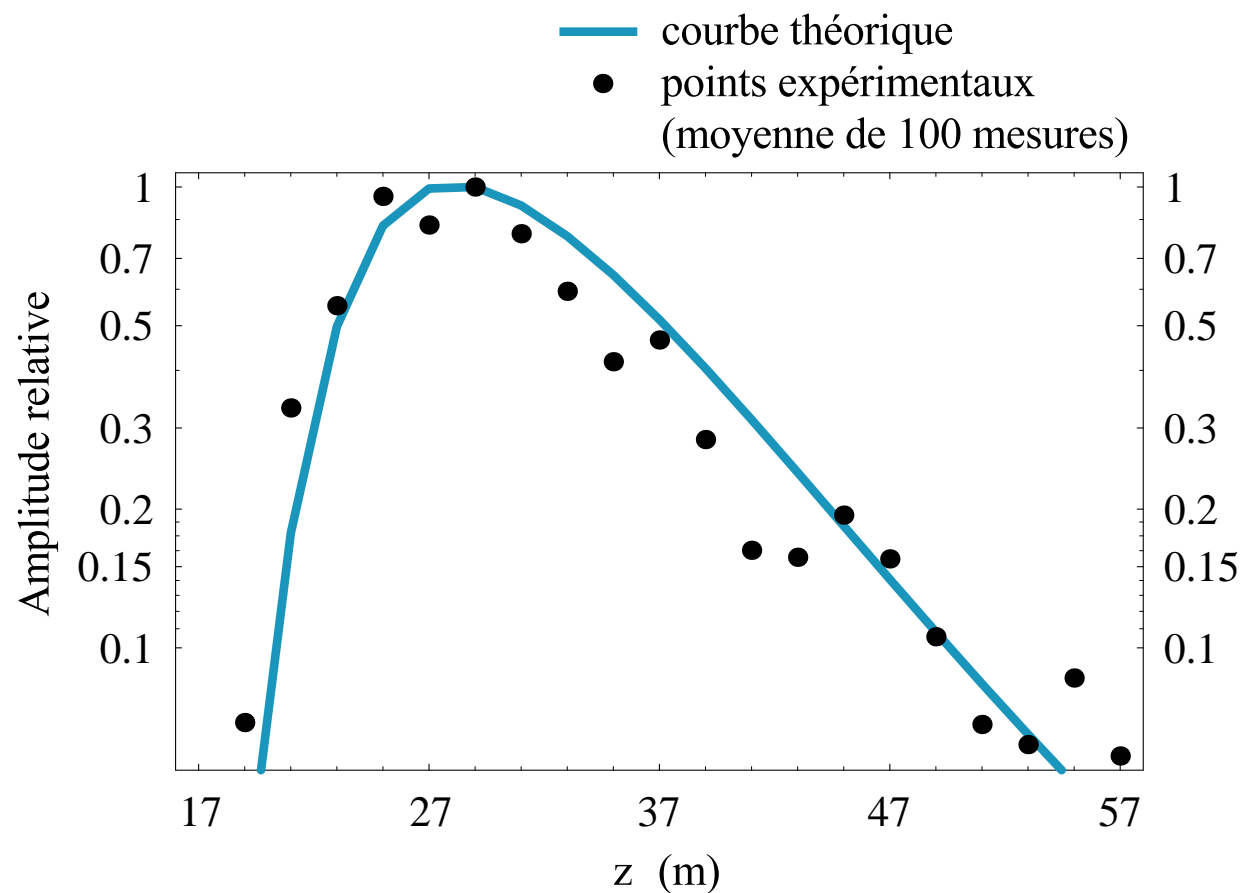
Dynamique - Précision - Portée - Stratégie de mesure - Application à l'imagerie 3D

Conclusion

Conclusion et perspectives

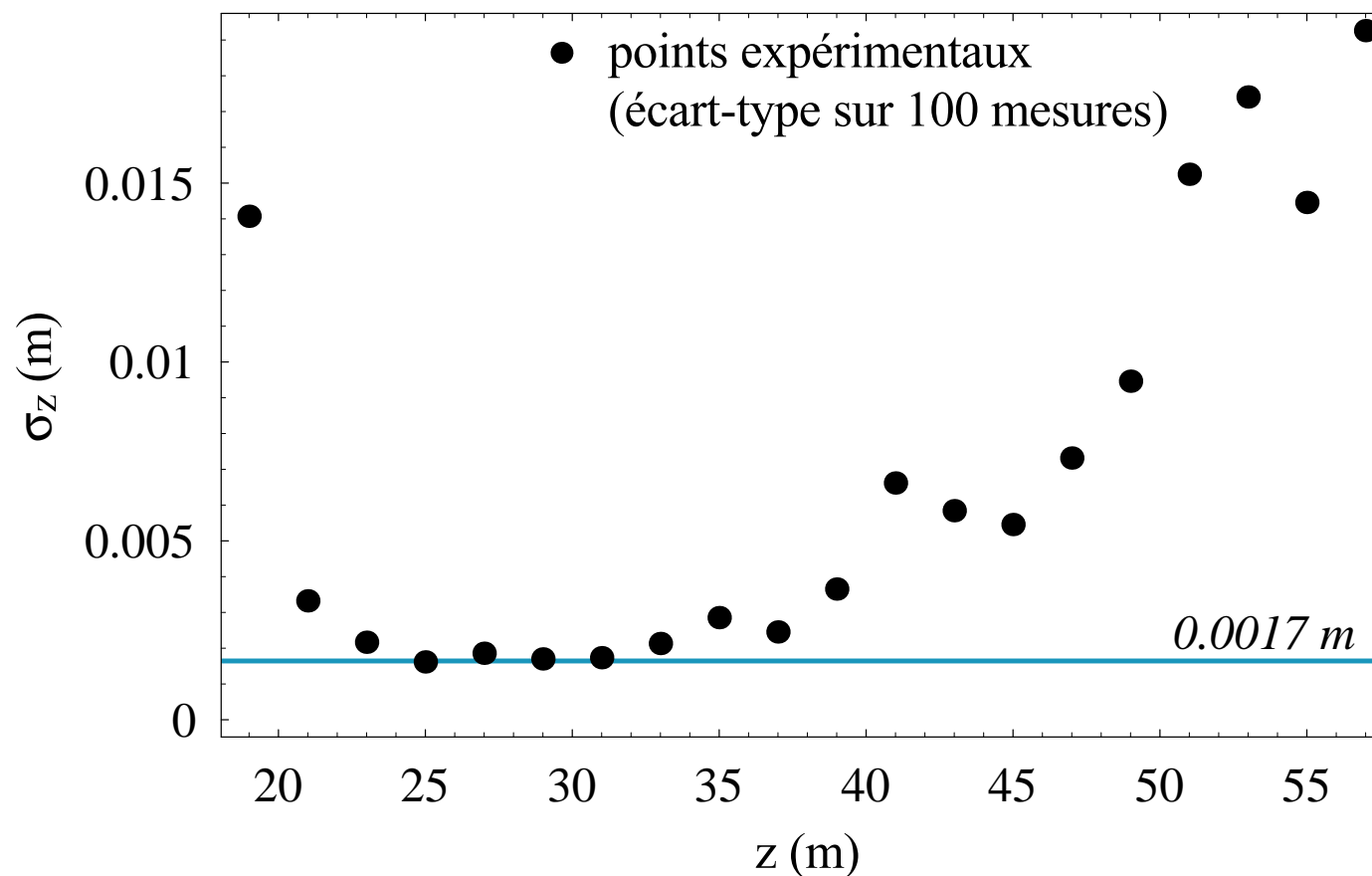
Résultats expérimentaux

Variation théorique et expérimentale de l'amplitude du signal STOP en fonction de la distance, *dynamique du signal*



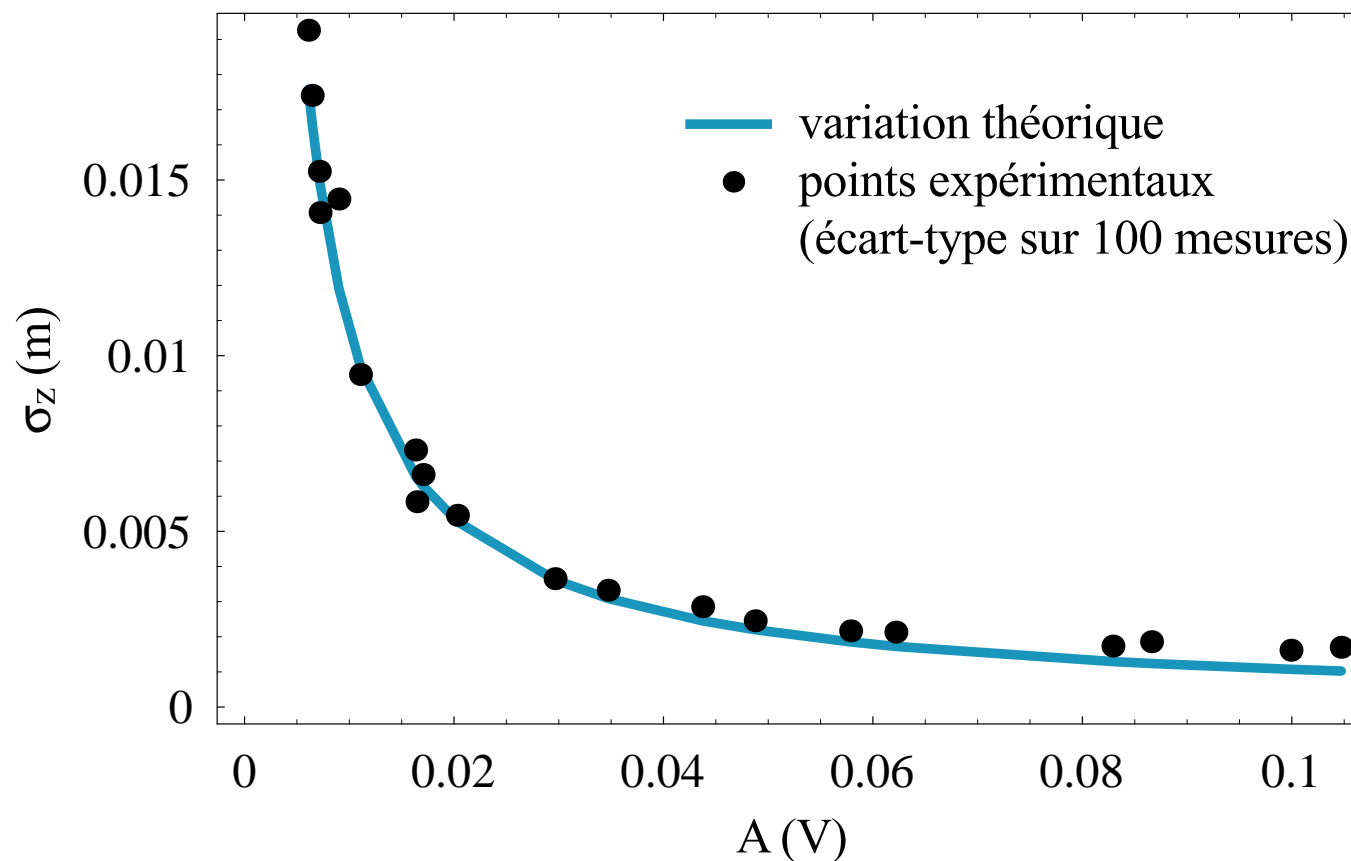
Résultats expérimentaux

Variation expérimentale de l'écart-type de la mesure en fonction de la distance



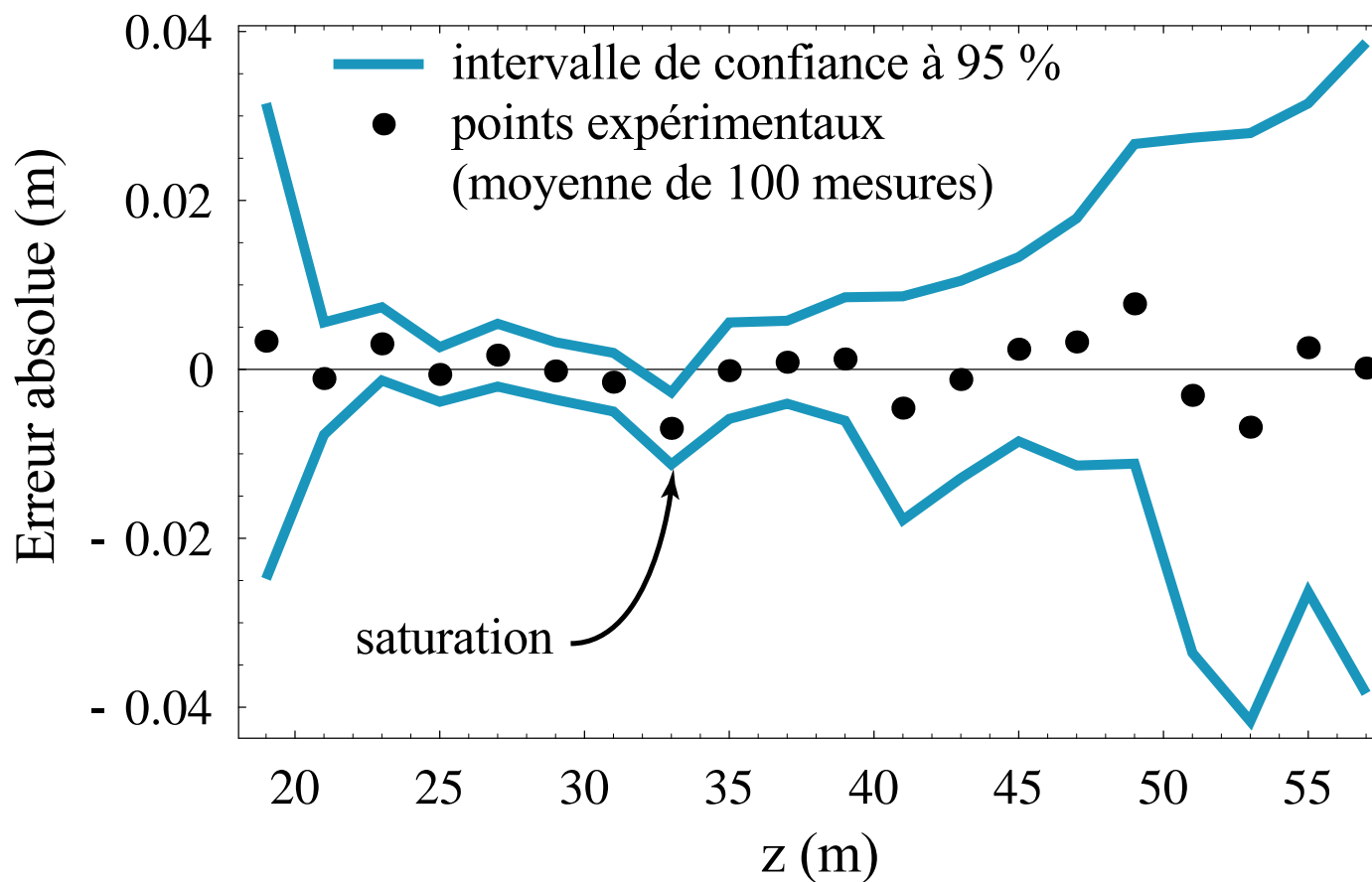
Résultats expérimentaux

Variation théorique et expérimentale de l'écart-type de la mesure en fonction de l'amplitude



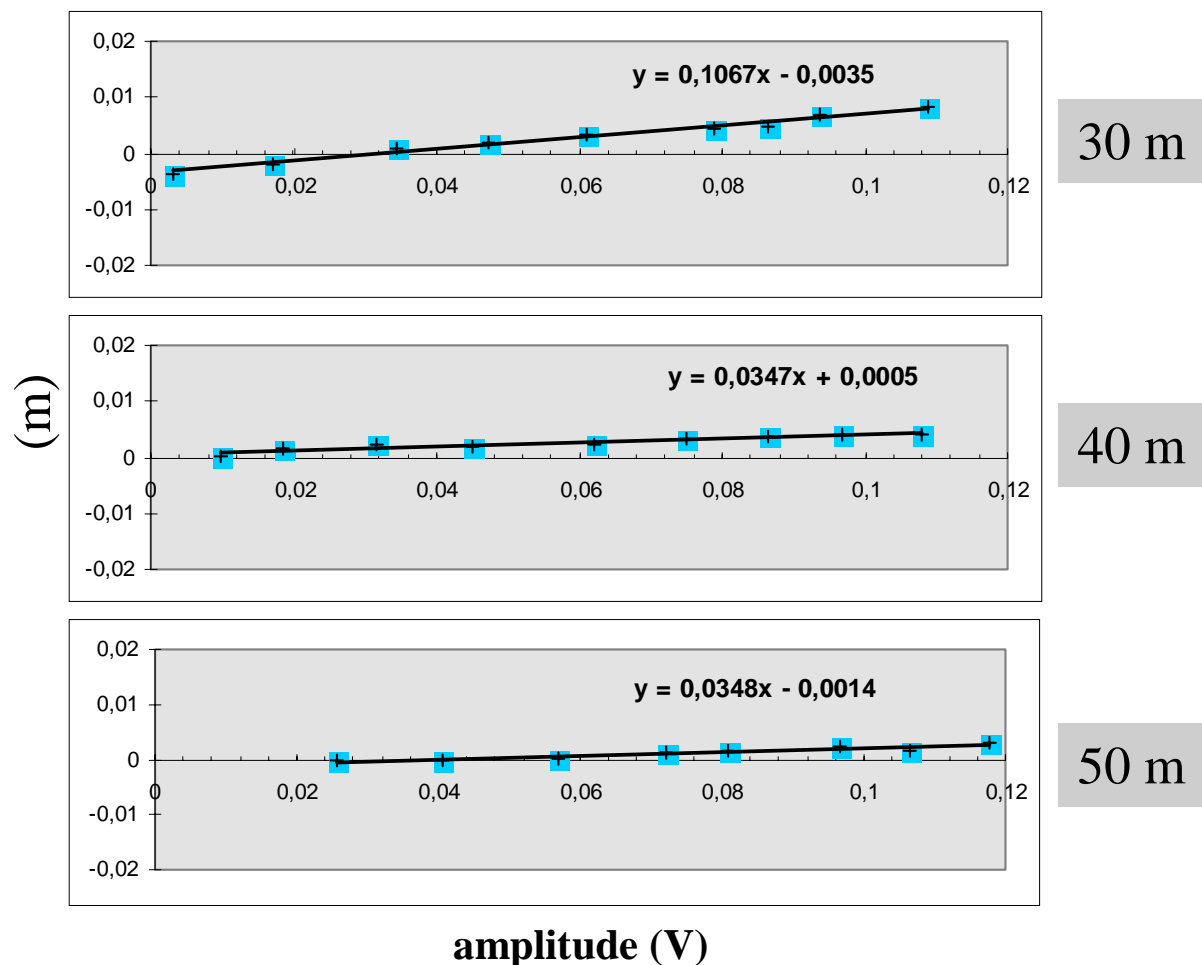
Résultats expérimentaux

Erreur absolue sur la distance mesurée en fonction de la distance



Résultats expérimentaux

Effet de la variation de l'amplitude sur l'erreur absolue : non-linéarités



Résultats expérimentaux

Comparaison de techniques d'augmentation du rapport signal sur bruit

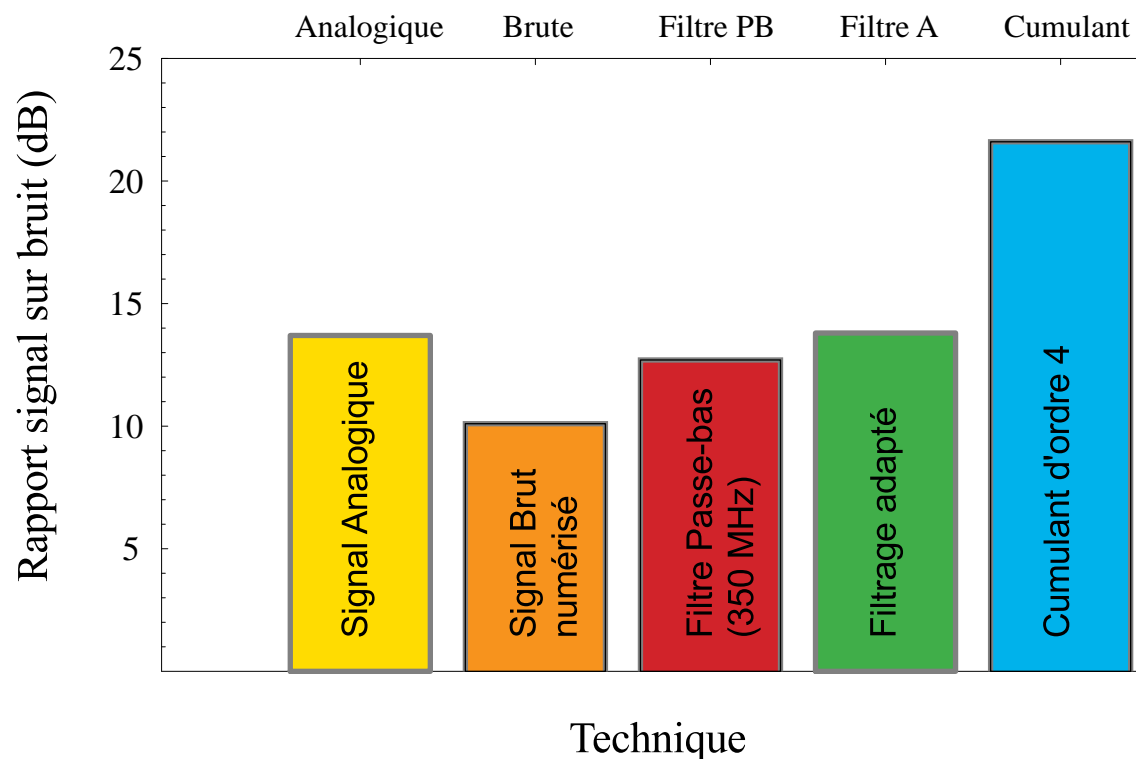
Exemple :

Amplitude du signal : 2,5 mV

Ecart-type du bruit : 800 μ V

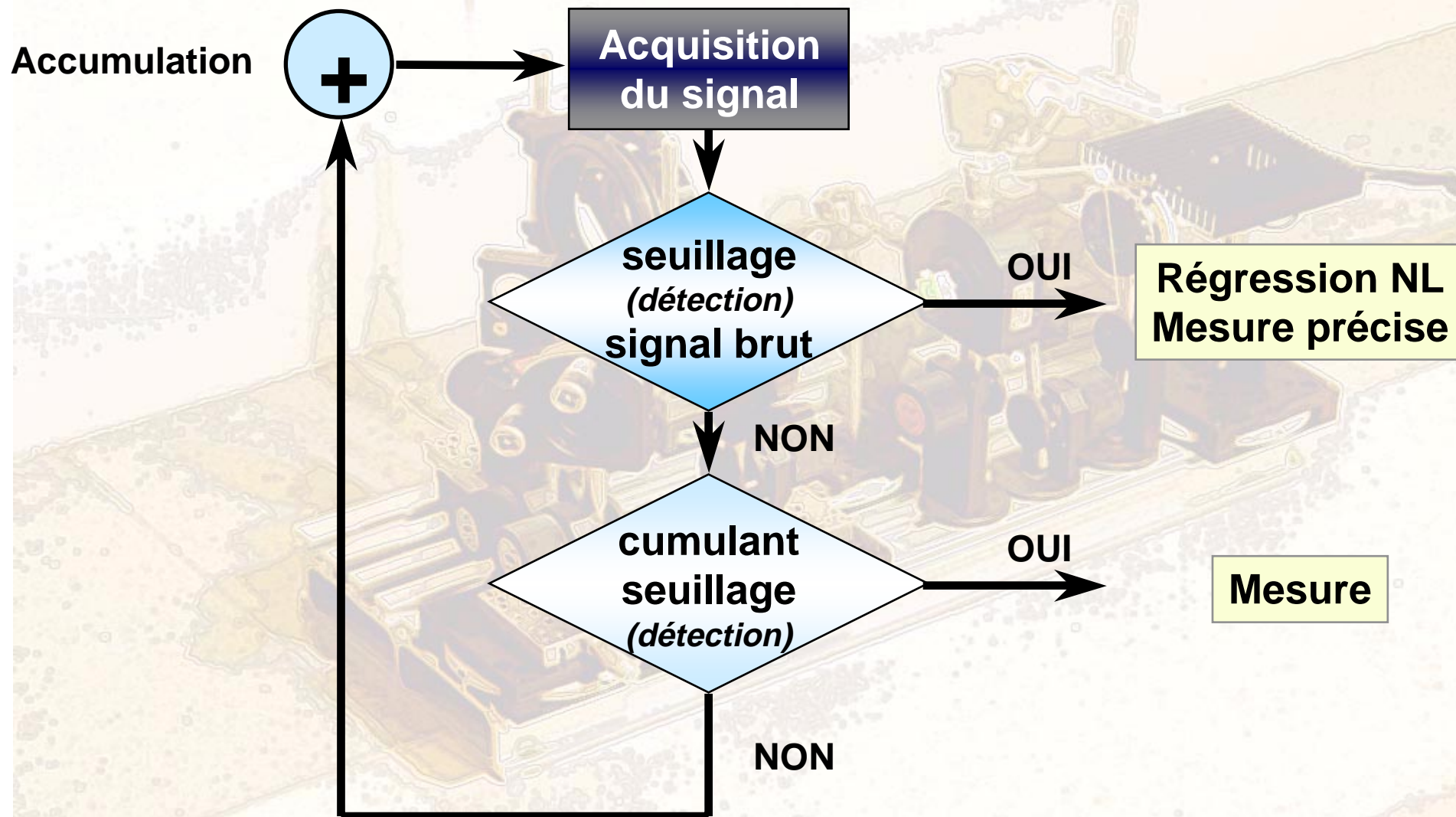
seuil à 15 dB

taux de fausse alarme de 10^{-9}



Signal analogique	Signal numérique	Filtre passe bas	Filtre adapté	Cumulant
$RSB = 13,7$ dB	$RSB = 10,1$ dB	$RSB = 12,7$ dB	$RSB = 13,84$ dB	$RSB = 21,6$ dB

Stratégie de mesure

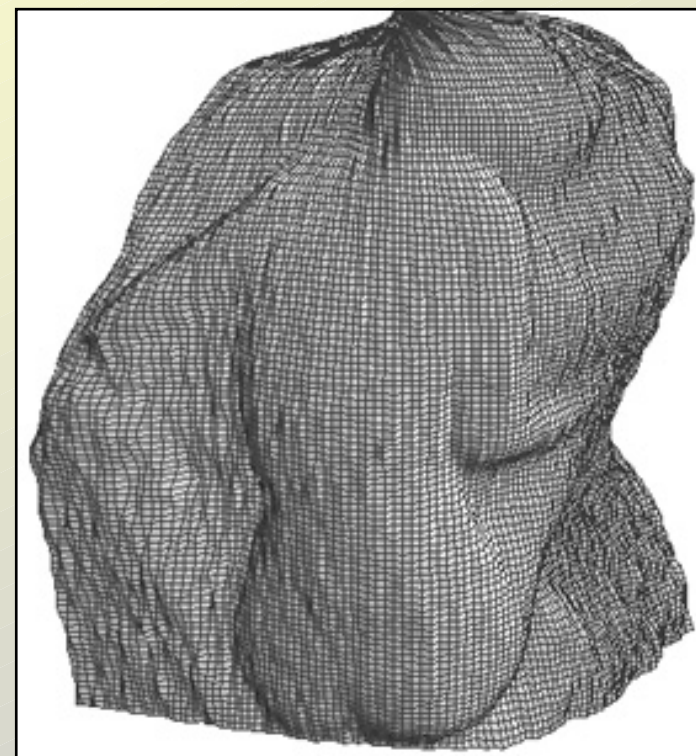


Numérisation 3D

Application à l'imagerie en 3 dimensions



Sculpture photographiée



Sculpture numérisée

Conclusion

Comparaison avec la télémétrie «analogique»

- ☑ le seuil de détection est dissocié de la mesure du temps de vol
optimisation de la portée et de la précision simultanée possible
- ☑ possibilité d'accumulation des signaux
augmentation du RSB (portée, précision)
- ☐ *amélioration des performances en terme de précision d'un facteur 3 à 5*
- ☐ *amélioration des performances en terme de portée (100 m)*

Performances expérimentales obtenues conformes à la théorie et aux simulations

- ☐ *outils théoriques pour la conception d'un télémètre laser temps de vol*

« Perspectives »

Optique

- ☒ microlaser à cavité stable (faible puissance de pompe)
- ☒ microlaser à $1,55 \mu\text{m}$ (contraintes de sécurité oculaire moins importantes)
- ☒ système de balayage du faisceau laser

Electronique

- ☒ augmenter la dynamique de l'électronique
- ☒ carte d'acquisition rapide
- ☒ implémentation des algorithmes sur une architecture dédiée

Traitements

- ☒ compenser les non-linéarités de l'électronique
- ☒ prendre en compte la réponse impulsionnelle de l'électronique