

**Mesure de la WFE à chaud et à froid d'un télescope en cordiérite**

# Résultats des mesures optiques de WFE à chaud et à froid



**Mesure de la WFE à chaud et à froid d'un télescope en cordiélite**

Rédigé par	Fonction	Date	Visa
Johan Floriot	LAM - Responsable Plateforme POLARIS	07//2024	
Vérifié par	Fonction	Date	Visa
Kjetil Dohlen	LAM - Chef de service Optique		
Patrick Lanzoni	Responsable d'ESSAI V-T LAM		
Michael Carle	LAM - Responsable Plateforme SPATIAL		
Approuvé par	Fonction	Date	Visa
Christophe Fabron	LAM - Chef de service CQS		
Frédéric Zamkotsian	LAM – Responsable Scientifique du moyen		
Christian Surace	LAM - Directeur Technique		
Diego Le Gouz De Saint Seine	Bertin Technologies – Chef de Projet		

**Liste de distribution**

Nom		Entreprise / Laboratoire	Edition / Révision						
			Draft 1						
Emmanuel Grassi	EG	LAM SCQS	X						
Patrick Vors	VP	LAM SCQS							
Anne-Sophie Hutter	ASH	LAM SCQS							
Rudy Barette	RB	LAM SCQS							
Mickael Carle	MC	LAM SCQS	X						
Christophe Fabron	CF	LAM SCQS	X						
Johan Floriot	JF	LAM SO	X						
José Garcia	JG	LAM BE/mécanique							
Patrick Lanzoni	PL	LAM SCQS	X						
Kjetil Dohlen		LAM SO							
Christian Surace	CS	LAM DT							
Diego Le Gouz De Saint Seine		Bertin Technologies							
Frédéric Zamkotsian		LAM GRD							

## Mesure de la WFE à chaud et à froid d'un télescope en cordiérite

### Sommaire

1. DOCUMENTS .....	5
1.1 ..... Document applicables .....	5
2. OBJECTIF .....	6
3. CONFIGURATION OPTIQUE.....	6
3.1 ..... Configuration matérielle .....	6
3.2 ..... Configuration logicielle .....	7
4. RAPPEL DE LA SEQUENCE DE MESURES OPTIQUES.....	7
5. WFE DE REFERENCE.....	8
6. 1 <sup>ER</sup> PALIER A -10°C .....	10
7. 1 <sup>ER</sup> PALIER A +30°C .....	12
8. 2 <sup>EME</sup> PALIER A -10°C .....	13
9. 2 <sup>EME</sup> PALIER A +30°C .....	14
10. 3 <sup>EME</sup> PALIER A -10°C .....	15
11. 3 <sup>EME</sup> PALIER A +30°C .....	16
12. PALIER FINAL A -30°C .....	18
13. REMONTEE A L'AMBIANTE, SOUS VIDE.....	19
14. SYNTHESE DES RESULTATS ET CONCLUSION .....	20
15. DISCUSSION ET INTERPRETATION DES RESULTATS (PAR BERTIN TECHNOLOGIES).....	23

**Mesure de la WFE à chaud et à froid d'un télescope en cordiérite**

**1. DOCUMENTS**

**1.1 Document applicables**

[DA1] *Prestation R&D CNES-Bertin COL LAM.SCQS.COL.procedure 1*

[DA2] *2024 Prestation CNES-BT LAM.SCQS.COL.Compte Rendu d'essai 1\_0*

[DA3] *BERTIN Technologies Réf 011301-610-SP003-B*

## Mesure de la WFE à chaud et à froid d'un télescope en cordiérite

### 2. OBJECTIF

La description de l'essai et ses résultats en termes de vide thermique sont détaillés dans DA1 et DA2. Le besoin de Bertin technologies est exposé dans DA3.

L'objectif est de mesurer la WFE (Wavefront Error) en double passage du télescope en cordiérite de Bertin/Winlight à l'ambient (+20°C), à froid (-10°C et -30°C), à chaud (+30°C).

La mesure de la WFE est faite à l'aide d'un interféromètre de Fizeau placé à l'extérieur du COL.

### 3. CONFIGURATION OPTIQUE

#### 3.1 Configuration matérielle

La WFE est mesurée à l'aide d'un interféromètre de Fizeau H1000 de 102mm de pupille et équipé d'un calibre plan de planéité  $\lambda/40$  RMS à 633nm.

L'interféromètre est positionné à l'extérieur du COL devant le hublot (Figure 1). Le faisceau émis est collimaté (102mm de diamètre) et monochromatique (633nm).

L'interféromètre est positionné sur un système à 5 degrés de liberté pour pouvoir ajuster sa position en XYZ et son tip/tilt. Le blank test a montré sur un miroir témoin placé dans le COL que la variation de température introduisait principalement du tip/tilt. Il a été démontré que ce tip/tilt pouvait être compensé par l'ajustement du tip/tilt de l'interféromètre.

Le hublot a été préalablement qualifié en termes de qualité de front d'onde transmis (15nm RMS).

La WFE du télescope est mesurée en double passage à l'aide d'un miroir sphérique non traité ouvert à f/5 (fourni avec sa monture et préalablement monté sur le télescope par Bertin) placé dans le plan focal du télescope pour réaliser l'autocollimation.

Remarque : la position optimale le long de l'axe optique de ce miroir s'est avérée être inaccessible avec la platine de translation montée. Le système a été modifié avec l'insertion de plusieurs rondelles d'épaisseur afin d'amener le miroir dans une position adéquate. Cette modification a été acceptée et validée par Bertin (notamment sa dépendance thermique).



Mesure de la WFE à chaud et à froid d'un télescope en cordiérite



Figure 1: Photos de la configuration optique. En haut: télescope devant interféromètre; en bas: interféromètre devant le hublot d'entrée du COL

### 3.2 Configuration logicielle

L'interféromètre est piloté par le logiciel Intellwave qui réalise les mesures de front d'onde par décalage de phase.

Dans la suite, chaque WFE montrée est le résultat d'un moyennage de 5 mesures. La répétabilité des mesures est de l'ordre de quelques nm RMS.

La WFE est décomposée suivant la base classique de 36 polynômes de Zernike normalisés (RMS).

Remarque sur l'orientation des axes : les axes X (horizontal) et Y (vertical) du télescope correspondent aux axes X (horizontal) et Y (vertical) de l'interféromètre. Leurs sens sont également identiques (haut-bas et droite-gauche).

### 4. RAPPEL DE LA SEQUENCE DE MESURES OPTIQUES

La séquence de mesures optiques est la suivante les étapes 1 à 7 sont réalisées à la température ambiante de +20°C) :

1. Alignement de l'interféromètre avec les taps avant et arrière de l'écran interne. Cet écran a des taps de 100mm de diamètre qui définissent donc la dimension de la pupille mesurable. Cette étape permet de définir l'axe optique.
2. Alignement du télescope en XYZ et de son ouverture d'entrée avec l'interféromètre.

## Mesure de la WFE à chaud et à froid d'un télescope en cordiérite

3. Alignement de la sphere autocollimatrice en tirage (ou defocus) et en tip/tilt (obtention de la teinte plate); mesure de la WFE et validation par Bertin; (cf slides présentées lors des points clés).
4. Mise en place de l'écran externe et de la virole (avec le hublot); ajustement de la position du télescope et de la sphere (à travers les taps laissées ouvertes à cet effet). Mesure de la WFE et validation par Bertin; (cf slides présentées lors des points clés).
5. Réouverture et connexion de l'instrumentation pour le suivi de l'essai (capteurs...)
6. Remise en place des écrans interne et externe et de la virole. Mesure de la WFE et validation par Bertin; (cf slides présentées lors des points clés).
7. Descente en vide à  $10^{-6}$  mbar. Mesure de la WFE et validation par Bertin; (cf slides présentées lors des points clés). Cela constitue la mesure WFE de référence.
8. Descente au 1er palier à  $-10^{\circ}\text{C}$ ; réalignement de l'interféromètre et mesure de la WFE
9. Montée au 1er palier à  $+30^{\circ}\text{C}$ ; réalignement de l'interféromètre et mesure de la WFE
10. Descente au 2ème palier à  $-10^{\circ}\text{C}$ ; réalignement de l'interféromètre et mesure de la WFE
11. Montée au 2ème palier à  $+30^{\circ}\text{C}$ ; réalignement de l'interféromètre et mesure de la WFE
12. Descente au 3ème palier à  $-10^{\circ}\text{C}$ ; réalignement de l'interféromètre et mesure de la WFE
13. Montée au 2ème palier à  $+30^{\circ}\text{C}$ ; réalignement de l'interféromètre et mesure de la WFE
14. Descente au palier de  $-30^{\circ}\text{C}$ ; réalignement de l'interféromètre et mesure de la WFE
15. Remontée à l'ambiante ( $+20^{\circ}\text{C}$ ); réalignement de l'interféromètre et mesure de la WFE
16. Remontée à la pression atmosphérique; pas de mesure de WFE
17. Réouverture et fin de l'essai; pas de mesure de WFE

### 5. WFE DE REFERENCE

La Figure 2 donne les WFE mesurée à l'ambient à  $20^{\circ}\text{C}$  après fermeture du COL, à la pression atmosphérique et à  $10^{-6}$  mbar respectivement.

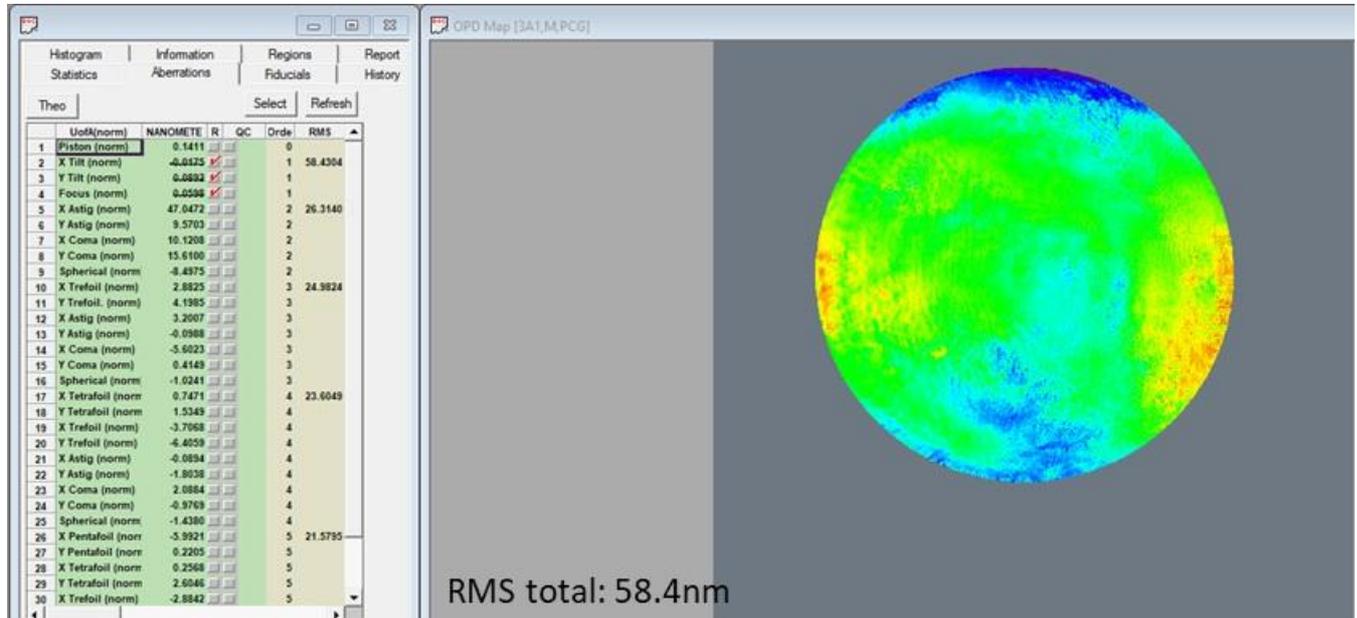
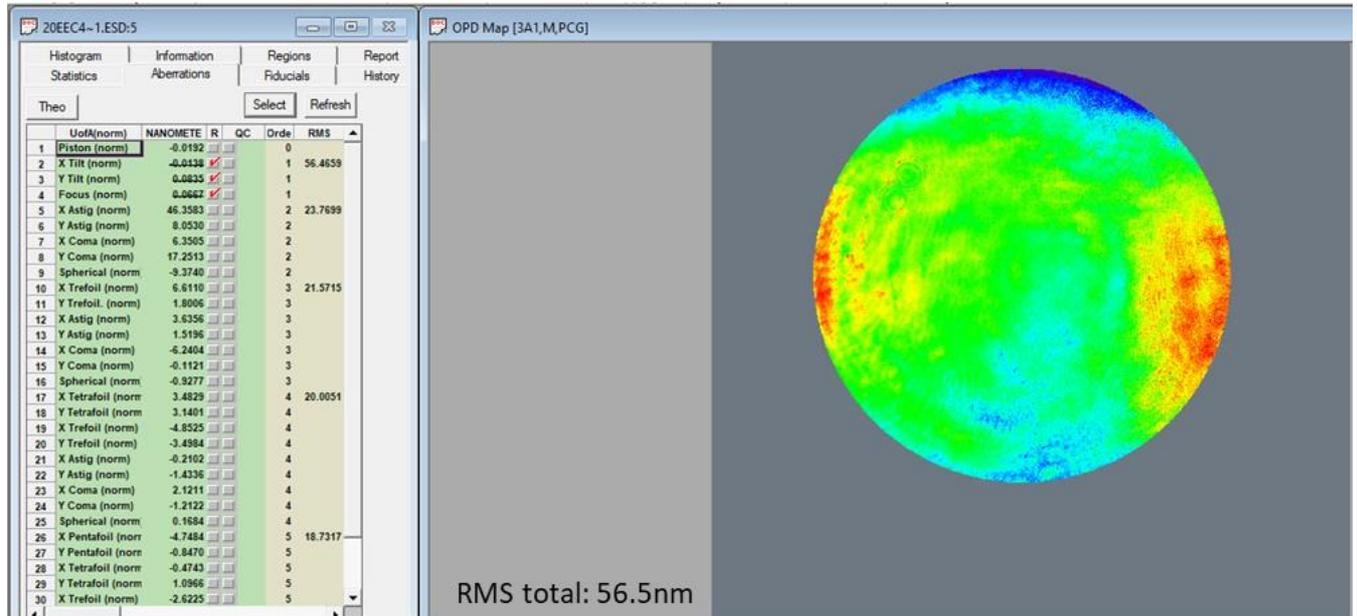
Ces mesures montrent l'influence négligeable de la mise sous vide du télescope ainsi que la qualité optique du télescope à l'ambient.

La WFE du télescope est de 56.5nm RMS à la pression atmosphérique et de 58.4nm RMS à  $10^{-6}$  mbar. La WFE est dominée par le terme d'astigmatisme X (46 et 47nm RMS), de coma Y (15 et 17nm RMS), d'aberration sphérique (9nm RMS); Les termes d'ordre supérieurs sont très faibles (quelques nm RMS au plus). Le télescope a une WFE à l'ambient de typiquement 57nm RMS, soit  $\lambda/11$  RMS à 633nm.

L'écart entre les 2 WFE est de 22.2nm RMS. Ce plateau (répétable) quantifie le bruit de mesure, i.e. la contribution non répétable sur la WFE. Pour des WFE typiques de 55nm RMS (voire plus), 22nm RMS de stabilité contribue pour environ 5nm RMS sur la WFE mesurée. En conclusion, nous pouvons dire que la mesure de WFE totale est précise à typiquement 5nm RMS près.

La WFE à l'ambient à  $10^{-6}$  mbar constitue la mesure de référence, pont de comparaison pour toutes les WFE mesurées par la suite.

Mesure de la WFE à chaud et à froid d'un télescope en cordiérite



Mesure de la WFE à chaud et à froid d'un télescope en cordiérite

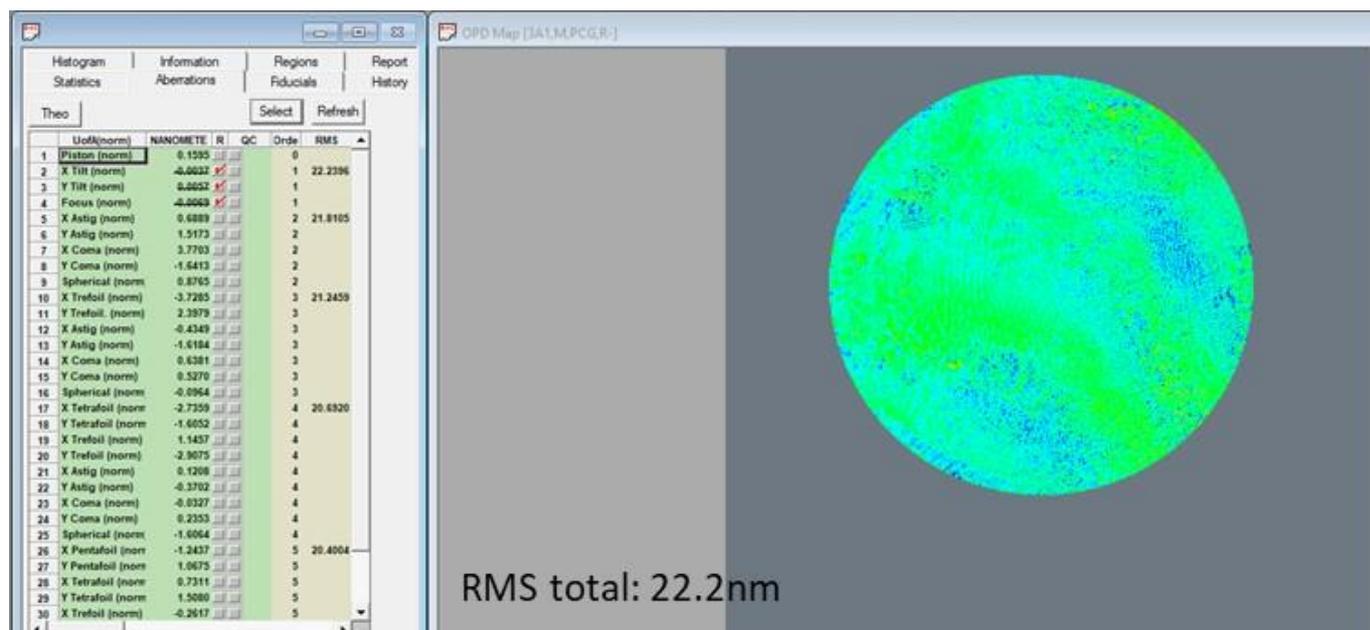


Figure 2: WFE à l'ambient (+20°C). En haut: à la pression atmosphérique; au milieu: à 10<sup>-6</sup> mbar; en bas: écart entre les 2 WFE

## 6. 1<sup>ER</sup> PALIER A -10°C

La Figure 3 donne la WFE mesurée au 1<sup>er</sup> palier à -10°C.

La WFE est dégradée entre l'ambient et -10°C (variation de température de -30°C). Elle atteint 123.7nm RMS, soit  $\lambda/5$  RMS à 633nm.

Les variations des principaux termes d'aberrations sont les suivantes (variations supérieures à 5nm RMS) :

- +31nm RMS d'astigmatisme X et Y
- +12nm de coma Y
- -21nm RMS d'aberration sphérique
- -12nm RMS de trefoil X et +50nm RMS de trefoil Y (terme dominant clairement visible sur l'écart de WFE avec l'ambient)
- -28nm RMS de trefoil Y d'ordre 5.
- La variation totale est de 84.8nm RMS.

Les variations de coma sont peut-être dues à un léger désalignement du télescope. L'astigmatisme et le trefoil peuvent également être dues à un désalignement mais aussi à des effets de supportage des miroirs (notamment les collages). Il est difficile de séparer les contributions des différents contributeurs.

Mesure de la WFE à chaud et à froid d'un télescope en cordiérite

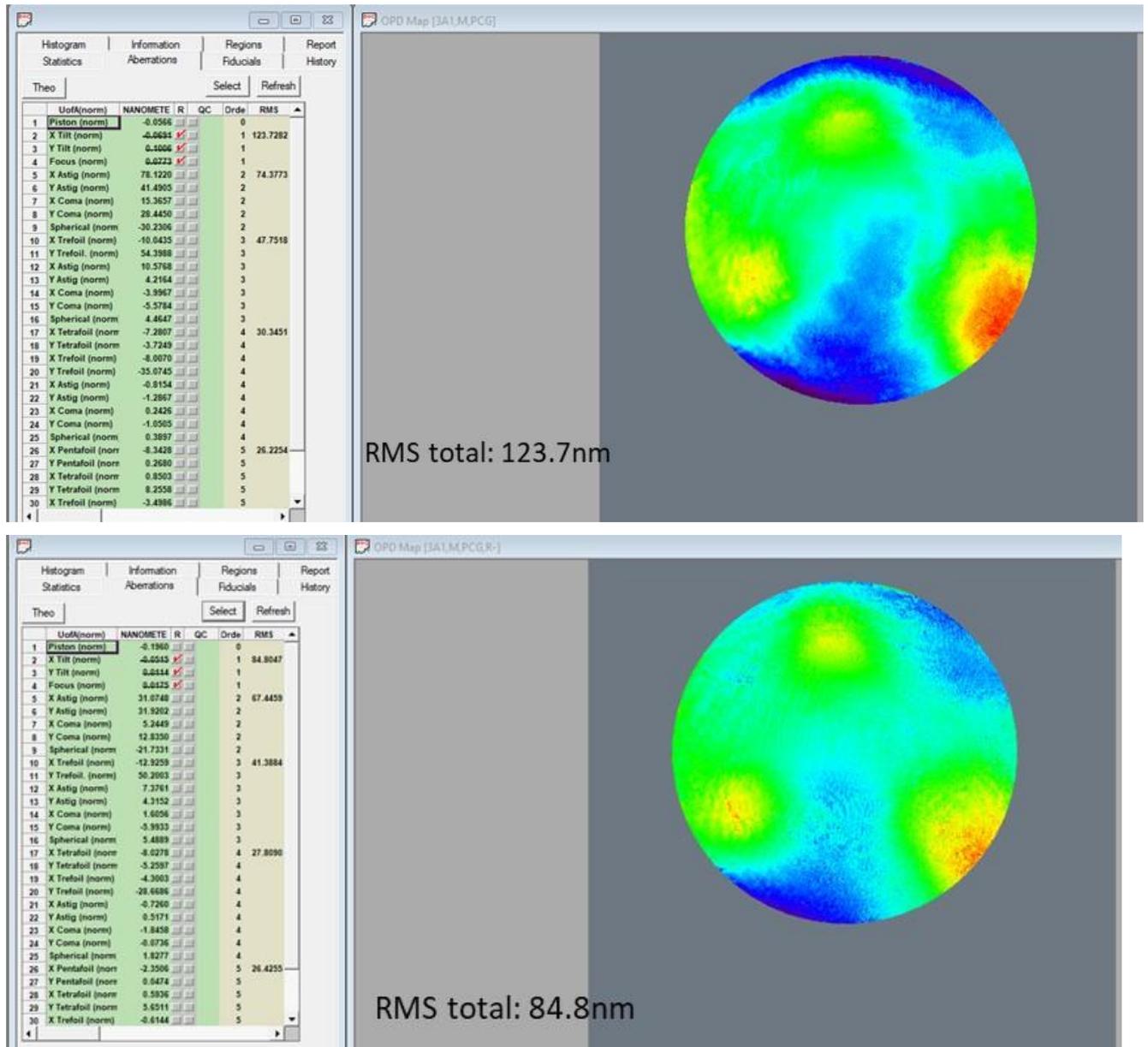


Figure 3: WFE au 1er palier à -10°C. En haut: WFE; en bas: écart avec la mesure de référence

Mesure de la WFE à chaud et à froid d'un télescope en cordiérite

7. 1<sup>ER</sup> PALIER A +30°C

La Figure 4 donne la WFE mesurée au 1<sup>er</sup> palier à +30°C.

La WFE à +30°C retrouve à la fois qualitativement et quantitativement un comportement proche de celle mesurée à l'ambiant. Cela semble raisonnable étant donné le faible écart (10°C) entre les 2 températures et cela est confirmé par l'écart de WFE entre les 2 températures (24.8nm RMS, principalement des résidus de quelques nm RMS chacun).

La WFE atteint 51.2nm RMS, soit  $\lambda/12$  RMS à 633nm. Elle est dominée par l'astigmatisme X (40nm RMS), la coma Y (19nm RMS) et l'aberration sphérique (7nm RMS).

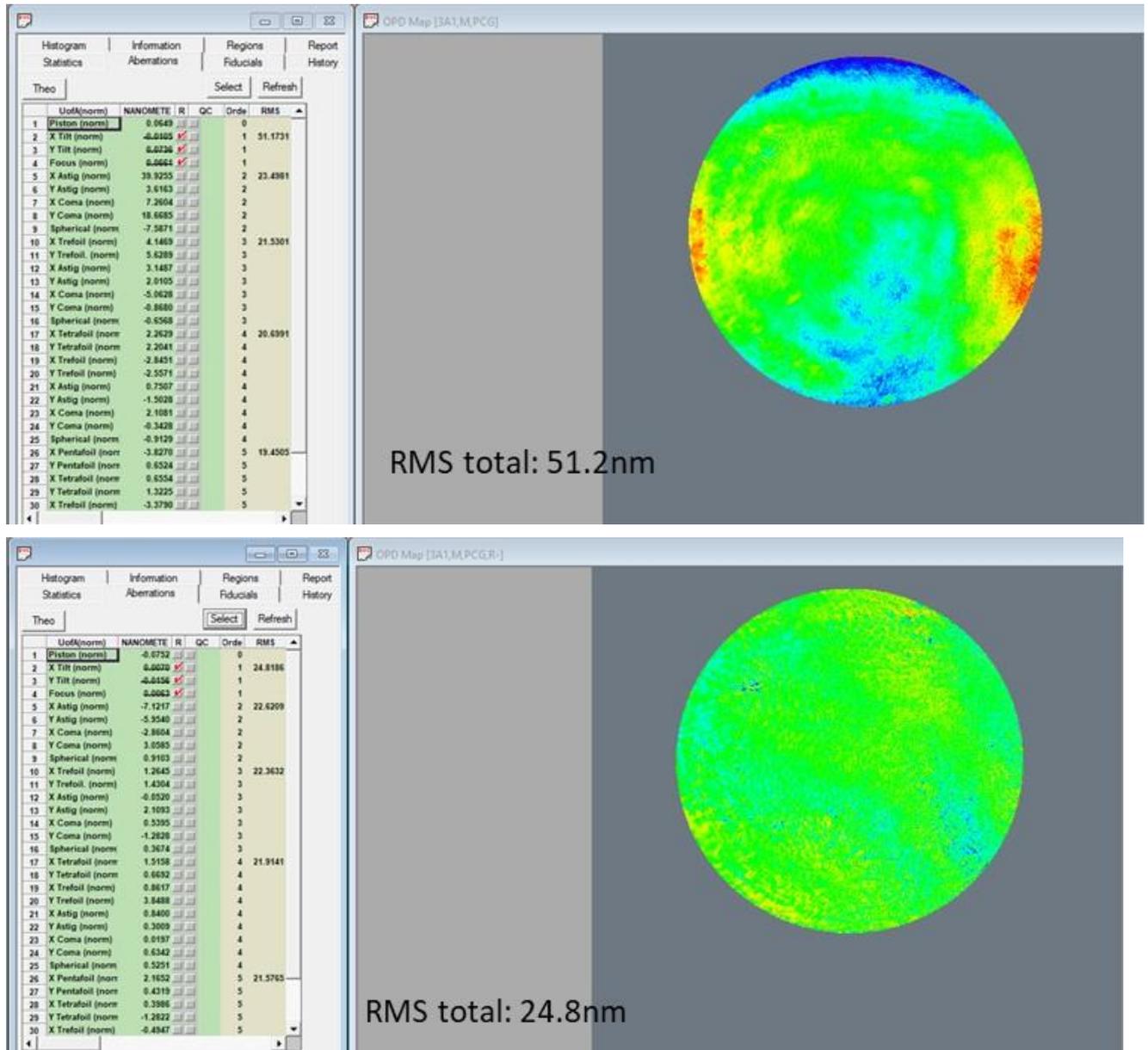


Figure 4: WFE au 1er palier à +30°C. En haut: WFE; en bas: écart avec la mesure de référence

Mesure de la WFE à chaud et à froid d'un télescope en cordiérite

8. 2<sup>EME</sup> PALIER A -10°C

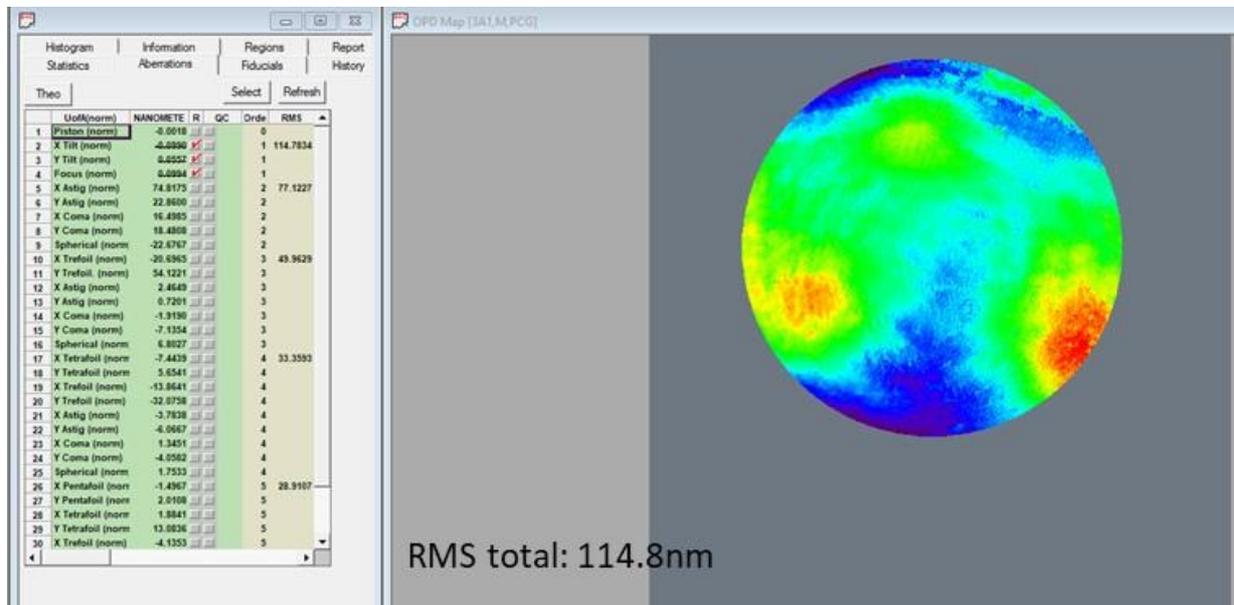
La Figure 5 donne la WFE mesurée au 2<sup>ème</sup> palier à -10°C.

La WFE est dégradée. Elle atteint 114.8nm RMS, soit  $\lambda/5.5$  RMS à 633nm.

Les variations des principaux termes d'aberrations sont les suivantes (variations supérieures à 5nm RMS) :

- +28nm RMS d'astigmatisme X et +13nm RMS d'astigmatisme Y
- +6nm RMS de coma X
- -14nm RMS d'aberration sphérique
- -23nm RMS de trefoil X et +50nm RMS de trefoil Y (terme dominant clairement visible sur l'écart de WFE avec l'ambient)
- -10nm RMS de trefoil X et -26nm RMS de trefoil Y d'ordre 5.
- Il apparaît également des termes de tetrafoil d'ordre 3 et 5.
- La variation totale est de 79.8nm RMS.

Le comportement du télescope sur ce 2<sup>ème</sup> palier à -10°C est très proche de celui du 1<sup>er</sup> palier, à la fois qualitativement et quantitativement, même si les variations de coma et d'astigmatisme sont un peu plus faibles. La WFE est ici dominée par le trefoil Y (ordre 3 et ordre 5).



Mesure de la WFE à chaud et à froid d'un télescope en cordiérite

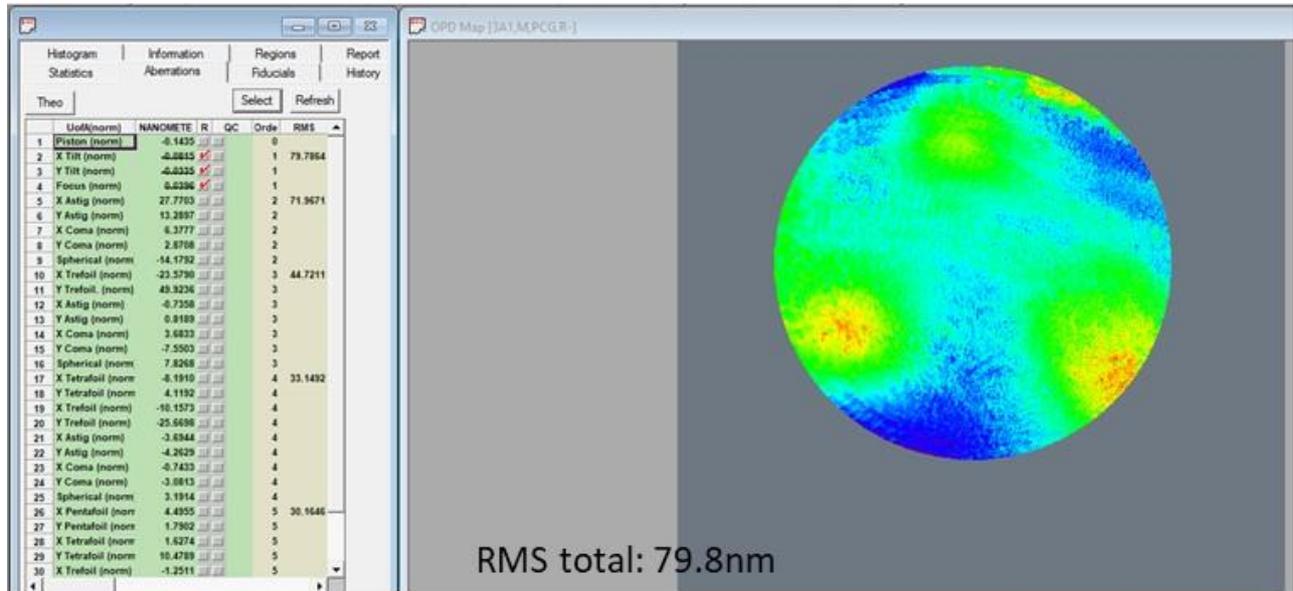


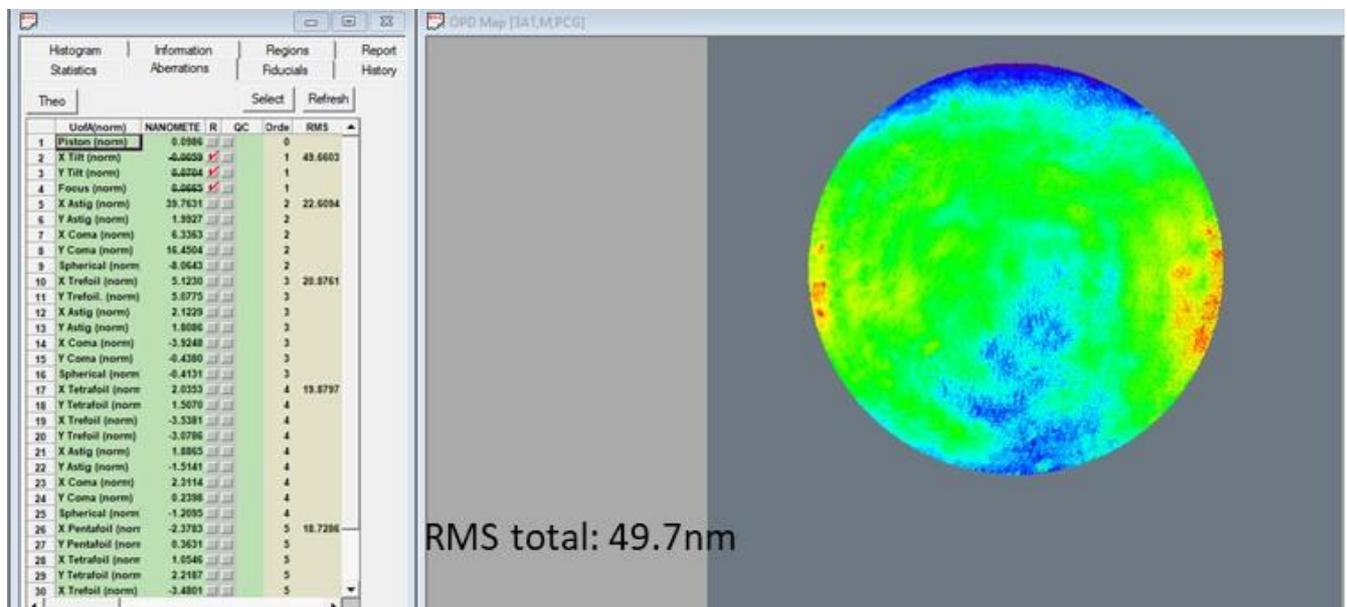
Figure 5: WFE au 2<sup>ème</sup> palier à -10°C. En haut: WFE; en bas: écart avec la mesure de référence

9. 2<sup>EME</sup> PALIER A +30°C

La Figure 6 donne la WFE mesurée au 2<sup>ème</sup> palier à +30°C.

La WFE à +30°C retrouve encore à la fois qualitativement et quantitativement un comportement proche de celle mesurée à l'ambiant. Cela est confirmé par l'écart de WFE entre les 2 températures (25.0nm RMS, principalement des résidus de quelques nm RMS chacun).

La WFE atteint 49.7nm RMS, soit  $\lambda/13$  RMS à 633nm. Elle est toujours dominée par l'astigmatisme X (40nm RMS), la coma Y (16nm RMS) et l'aberration sphérique (8nm RMS).



Mesure de la WFE à chaud et à froid d'un télescope en cordiérite

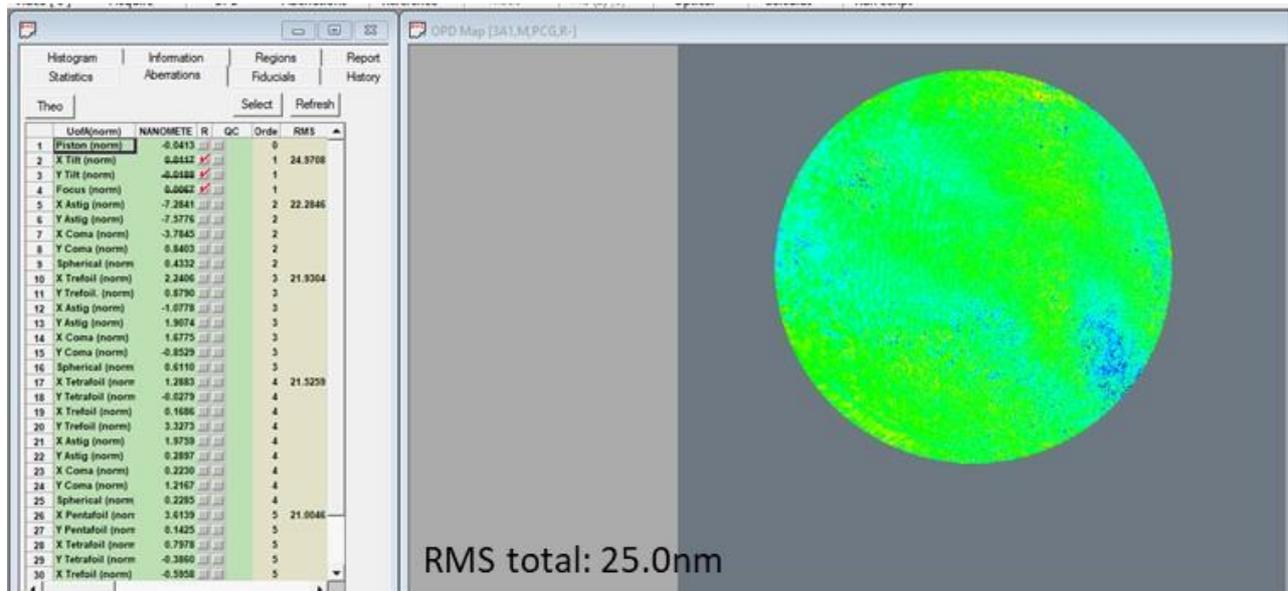


Figure 6: WFE au 2<sup>ème</sup> palier à +30°C. En haut: WFE; en bas: écart avec la mesure de référence

### 10. 3<sup>EME</sup> PALIER A -10°C

La Figure 7 donne la WFE mesurée au 3<sup>ème</sup> palier à -10°C.

La WFE est dégradée toujours dans les proportions. Elle atteint 120.8nm RMS, soit  $\lambda/5.2$  RMS à 633nm.

Les variations des principaux termes d'aberrations sont les suivantes (variations supérieures à 5nm RMS) :

- +40nm RMS d'astigmatisme X et +21nm RMS d'astigmatisme Y
- +9nm RMS de coma X
- -17nm RMS d'aberration sphérique
- -27nm RMS de trefoil X et +44nm RMS de trefoil Y (terme dominant clairement visible sur l'écart de WFE avec l'ambient)
- -28nm RMS de trefoil Y d'ordre 5.
- La variation totale est de 79.4nm RMS.

Le comportement du télescope sur ce 3<sup>ème</sup> palier à -10°C est très proche de celui des 2 paliers précédents à -10°C. Le comportement du télescope est essentiellement répétable et réversible dans les « basses » températures. La WFE est ici dominée par le trefoil Y (ordre 3 et ordre 5).

Mesure de la WFE à chaud et à froid d'un télescope en cordiérite

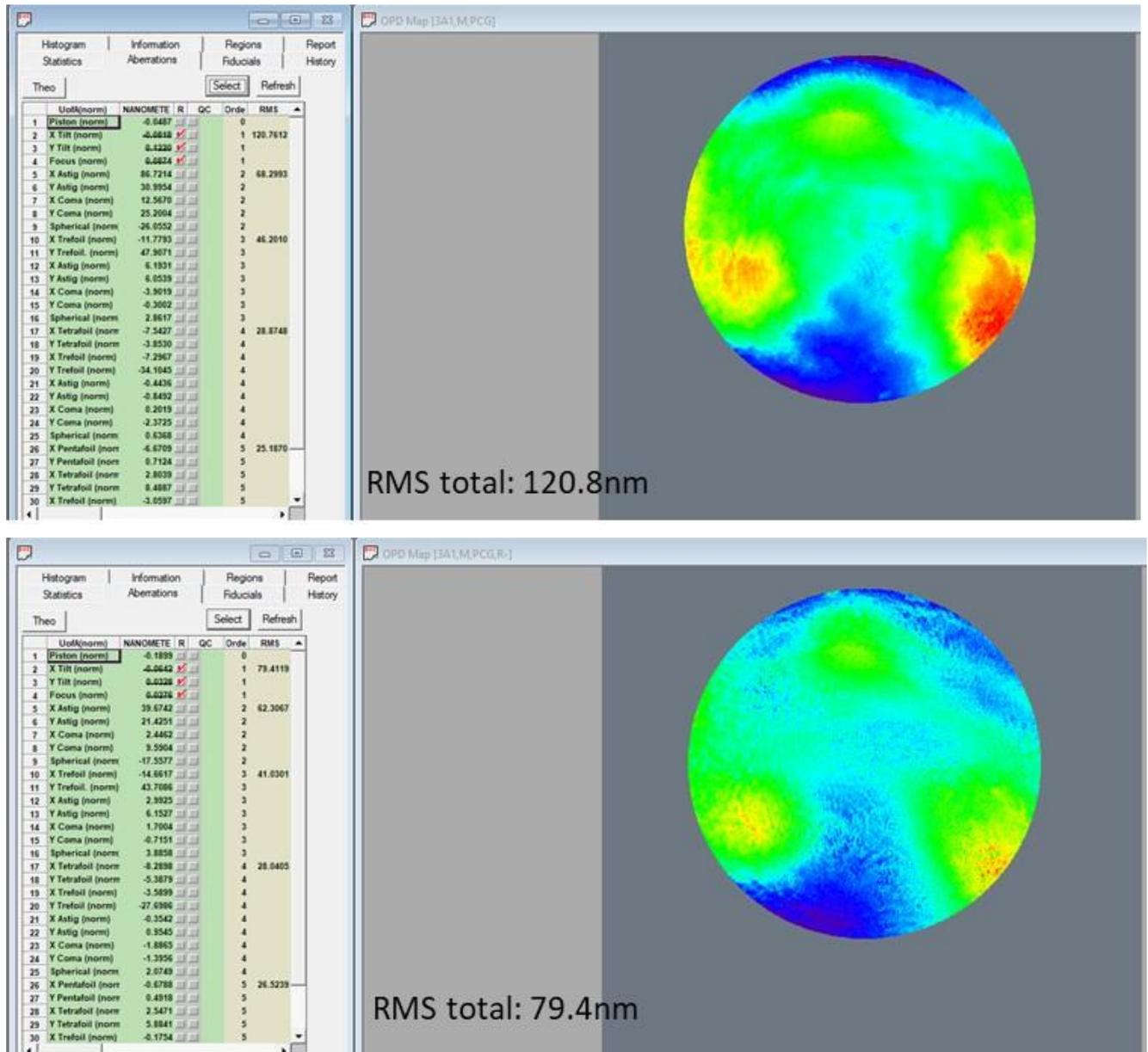


Figure 7: WFE au 3<sup>ème</sup> palier à -10°C. En haut: WFE; en bas: écart avec la mesure de référence

### 11. 3<sup>EME</sup> PALIER A +30°C

La Figure 8 donne la WFE mesurée au 3<sup>ème</sup> palier à +30°C.

La WFE à +30°C retrouve encore à la fois qualitativement et quantitativement un comportement proche de celle mesurée à l'ambiant. Cela est confirmé par l'écart de WFE entre les 2 températures (23.7nm RMS, principalement des résidus de quelques nm RMS chacun).

La WFE atteint 53.5nm RMS, soit  $\lambda/12$  RMS à 633nm. Elle est toujours dominée par l'astigmatisme X (42nm RMS), la coma Y (16nm RMS) et l'aberration sphérique (9nm RMS).

Le comportement du télescope sur ce 3<sup>ème</sup> palier à +30°C est très proche de celui des 2 paliers précédents à +30°C. Le comportement du télescope est essentiellement répétable et réversible dans les « hautes » températures. La WFE est ici dominée par le trefoil Y (ordre 3 et ordre 5).

Mesure de la WFE à chaud et à froid d'un télescope en cordiérite

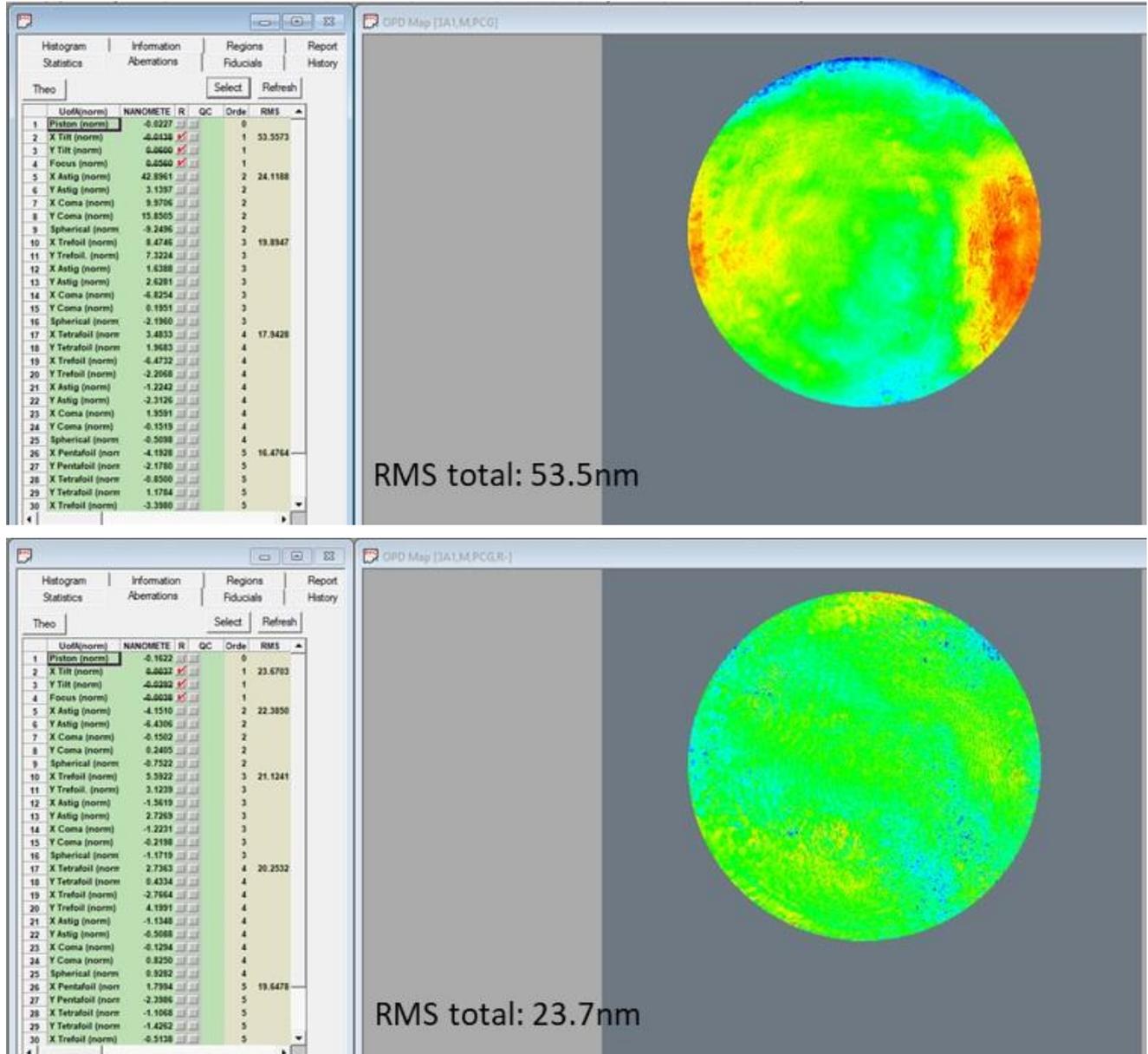


Figure 8: WFE au 3<sup>ème</sup> palier à +30°C. En haut: WFE; en bas: écart avec la mesure de référence

Mesure de la WFE à chaud et à froid d'un télescope en cordiérite

12. PALIER FINAL A -30°C

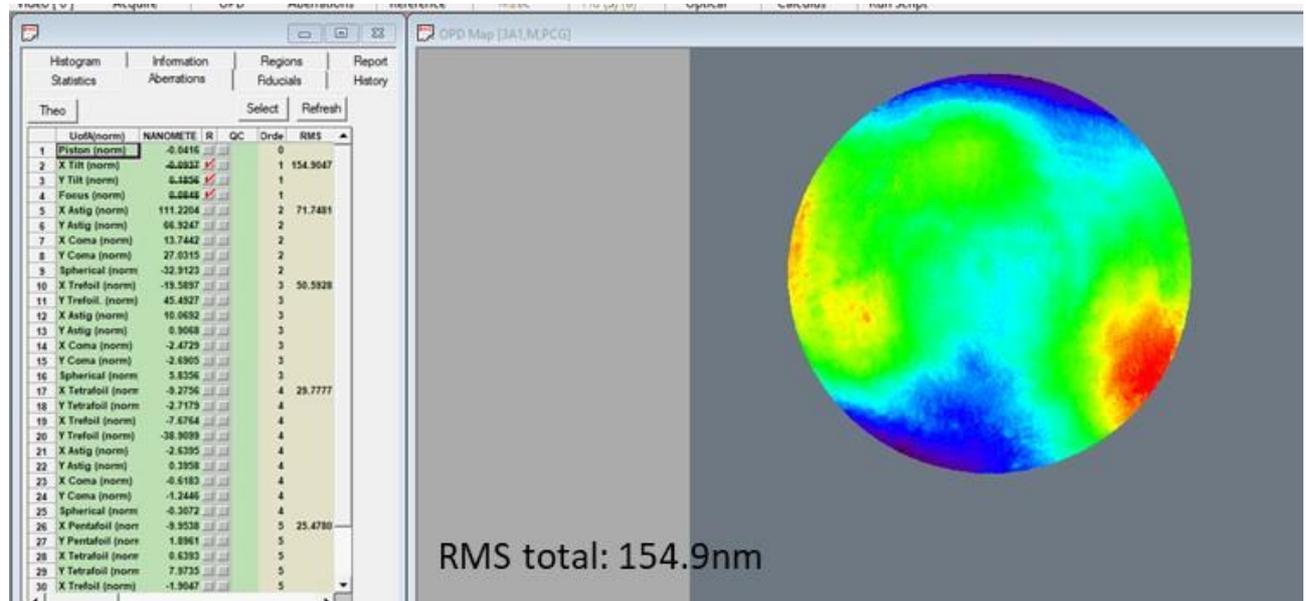
La Figure 7 donne la WFE mesurée au palier final à -30°C.

La WFE est par rapport à -10°C. Elle atteint 154.9nm RMS, soit  $\lambda/4$  RMS à 633nm.

Les variations des principaux termes d'aberrations sont les suivantes (variations supérieures à 5nm RMS) :

- +64nm RMS d'astigmatisme X et +57nm RMS d'astigmatisme Y
- +11nm RMS de coma X
- -24nm RMS d'aberration sphérique
- -22nm RMS de trefoil X et +41nm RMS de trefoil Y (terme dominant clairement visible sur l'écart de WFE avec l'ambient)
- -28nm RMS de trefoil Y d'ordre 5.
- La variation totale est de 111.6nm RMS.

La WFE est ici dominée par l'astigmatisme et le trefoil Y (ordre 3 principalement). Il est important de noter que la dégradation par rapport à -10°C est principalement de l'astigmatisme Y. Les autres aberrations varient très peu entre -10°C et -30°C, en particulier la coma et l'aberration sphérique. Si le télescope se désalignait, il y aurait probablement de la coma. Le fait que seuls astigmatisme et trefoil apparaissent est peut-être un argument en faveur d'une contribution au niveau de la déformation des miroirs (supportages et collages) sans désalignement majeur.



Mesure de la WFE à chaud et à froid d'un télescope en cordiérite

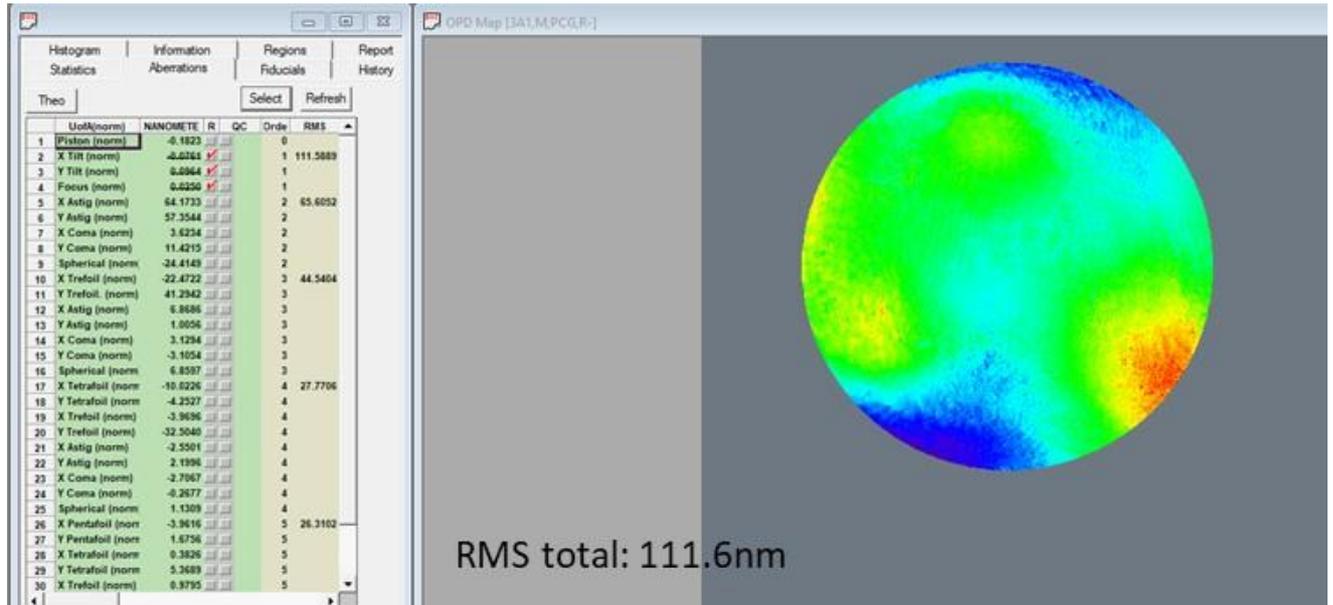
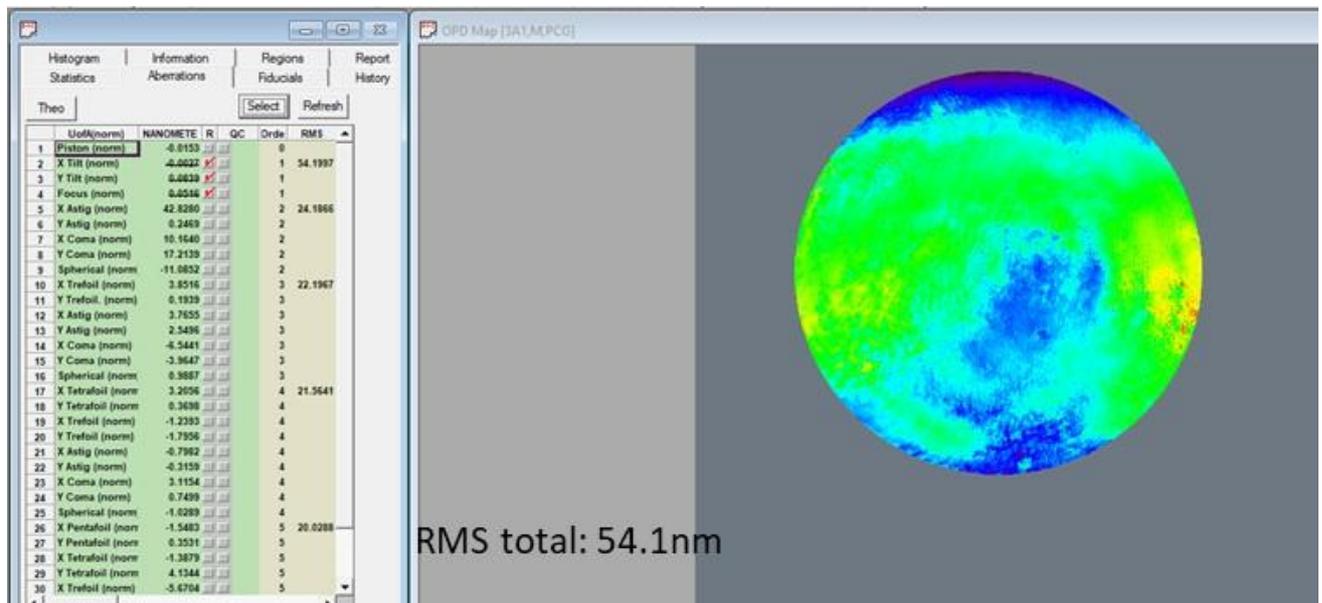


Figure 9: WFE au palier final à -30°C. En haut: WFE; en bas: écart avec la mesure de référence

### 13. REMONTEE A L'AMBIANTE, SOUS VIDE

La Figure 10 donne la WFE mesurée au retour à l'ambient (+20°C), sous vide ( $10^{-6}$  mbar).

La WFE revient RMS de manière réversible à 54.1nm, soit  $\lambda/12$  RMS à 633nm. Elle reste dominée par l'astigmatisme X (43nm RMS), la coma X (10nm RMS), la coma Y (17nm RMS) et l'aberration sphérique (11nm RMS).



Mesure de la WFE à chaud et à froid d'un télescope en cordiérite

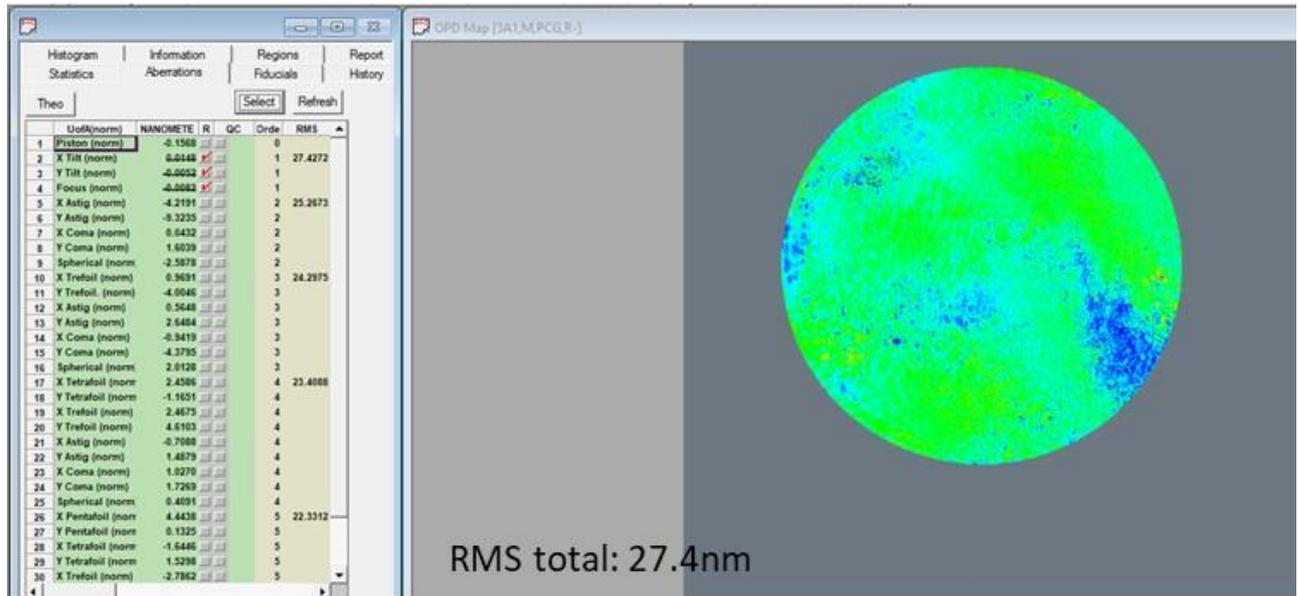


Figure 10: WFE au retour à l'ambient sous vide. En haut: WFE; en bas: écart avec la mesure de référence

#### 14. SYNTHÈSE DES RESULTATS ET CONCLUSION

La Figure 11 récapitule sous forme de graphe l'ensemble des résultats. Il visualise les variations des coefficients de Zernike principaux (ceux qui montrent des variations) en fonction des températures des différents paliers.

Ces courbes illustrent l'aspect réversible du comportement du télescope.

Il montre la dégradation (répétable) de la WFE entre l'ambient (approx. 55nm RMS, soit  $\lambda/11.5$  RMS à 633nm),  $-10^{\circ}\text{C}$  (approx. 120nm RMS, soit  $\lambda/5.2$  RMS à 633nm), puis  $-30^{\circ}\text{C}$  (approx. 155nm RMS, soit  $\lambda/4$  RMS à 633nm).

Il illustre également le fait que la WFE à  $+30^{\circ}\text{C}$  est très proche de celle à l'ambient ainsi que le bon retour final à l'ambient.

Le Tableau 1 donne les valeurs moyennes (moyenne sur les paliers identiques) des différents coefficients de Zernike.

Les principaux termes de Zernike en jeu sont l'astigmatisme, la coma, l'aberration sphérique, le trefoil pour le 3<sup>ème</sup> ordre ; le trefoil et le tetrafoil pour le 5<sup>ème</sup> ordre.

Mesure de la WFE à chaud et à froid d'un télescope en cordiérite

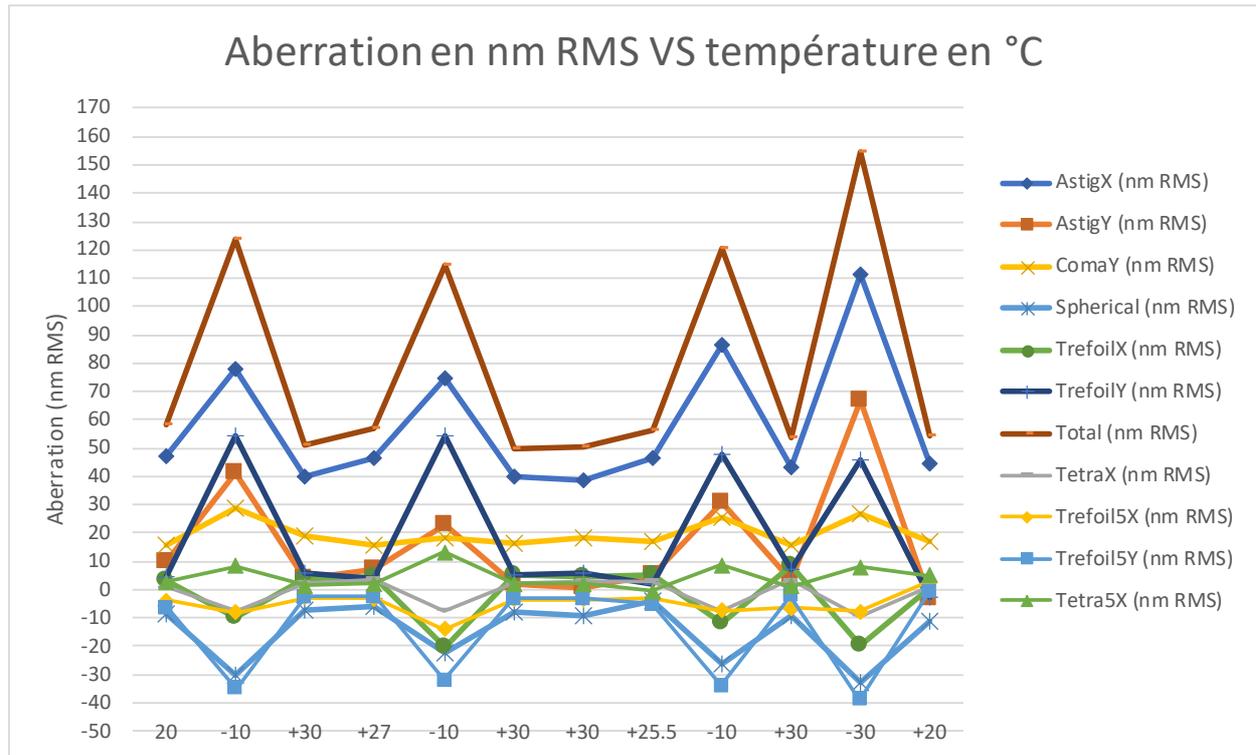


Figure 11: Synthèse des résultats. En abscisses: température des différents paliers. En ordonnées: amplitude du coefficient de Zernike.

Commentaires sur le terme de défocus:

La Figure 12 illustre la variation du terme de defocus au cours des différents paliers. Même si l'interprétation de ce terme n'est pas Claire du fait de l'existence de différents contributeurs (télescope, sphère autocollimatrice, hublot...), on observe également un comportement réversible de ce terme, ainsi que sa cohérence au niveau de son signe.

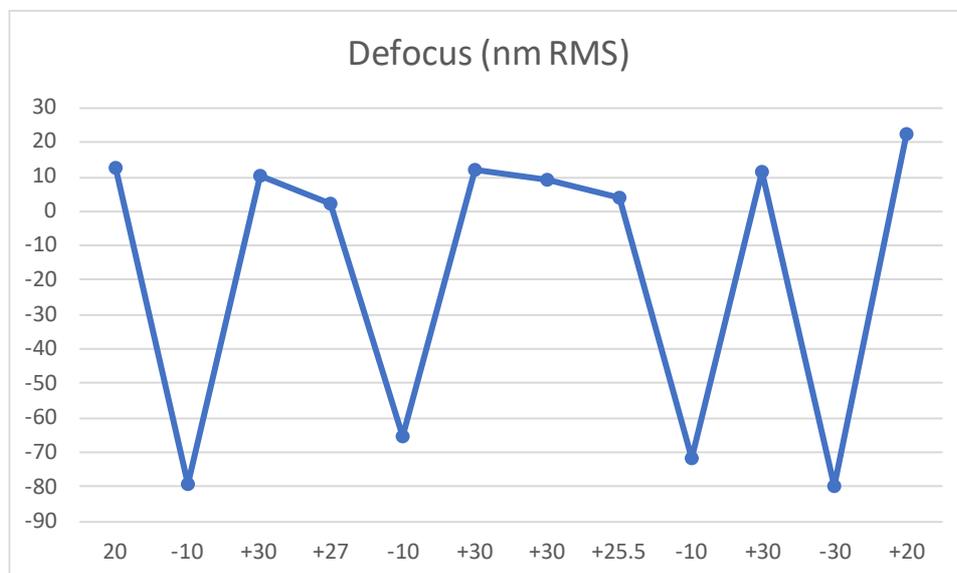


Figure 13: Variation du terme de défocus au cours des différents paliers

**Mesure de la WFE à chaud et à froid d'un télescope en cordiérite**
**Tableau 1: Valeurs moyennes des coefficients de Zernike sur les différents paliers.**

	AstigX (nm RMS)	AstigY (nm RMS)	ComaY (nm RMS)	Spherical (nm RMS)	TrefoilX (nm RMS)	TrefoilY (nm RMS)	TetraX (nm RMS)	Trefoil5X (nm RMS)	Trefoil5Y (nm RMS)	Tetra5X (nm RMS)	Total (nm RMS)
+20°C	45.9	3.1	16.2	-10.0	1.8	0.8	0.9	-0.6	-3.7	3.8	56.3
-10°C	79.9	31.8	24.0	-26.3	-14.2	52.1	-7.4	-9.7	-33.8	9.9	119.8
+30°C	42.4	3.6	16.9	-7.3	5.3	5.0	2.9	-3.7	-3.1	1.4	52.9
-30°C	111.2	66.9	27.0	-32.9	-19.6	45.5	-9.3	-7.7	-38.9	8.0	154.9

Mesure de la WFE à chaud et à froid d'un télescope en cordiérite

**15. DISCUSSION ET INTERPRETATION DES RESULTATS (PAR BERTIN TECHNOLOGIES)**

Cette section est laissée libre à Bertin pour compléter le rapport avec des éléments d'interprétation des résultats.