Nouvelles briques de conception pour la vision infrarouge

Guillaume DRUART[1], Nicolas GUERINEAU[1], Joël Deschamps[1], Jérôme Primot[1], Sylvain ROMMELUERE[1], Florence de la BARRIERE[1], Martin PIPONNIER[1], Manuel FENDLER[2], Nicolas LHERMET[2], Gilles LASFARGUES[2], Jacques RULLIERE[2], Jean TABOURY[3], Pierre CHAVEL[3].

[1] ONERA
[2] CEA MINATEC
[3] Institut d'Optique

ONERA

Plan

- Enjeux et objectif
- Description d'une caméra infrarouge refroidie et problématique
- Présentation des différents dispositifs intégrés dans le cryostat

Enjeux et objectif

Matis LR Sagem

Micro drone Remanta
ONERA

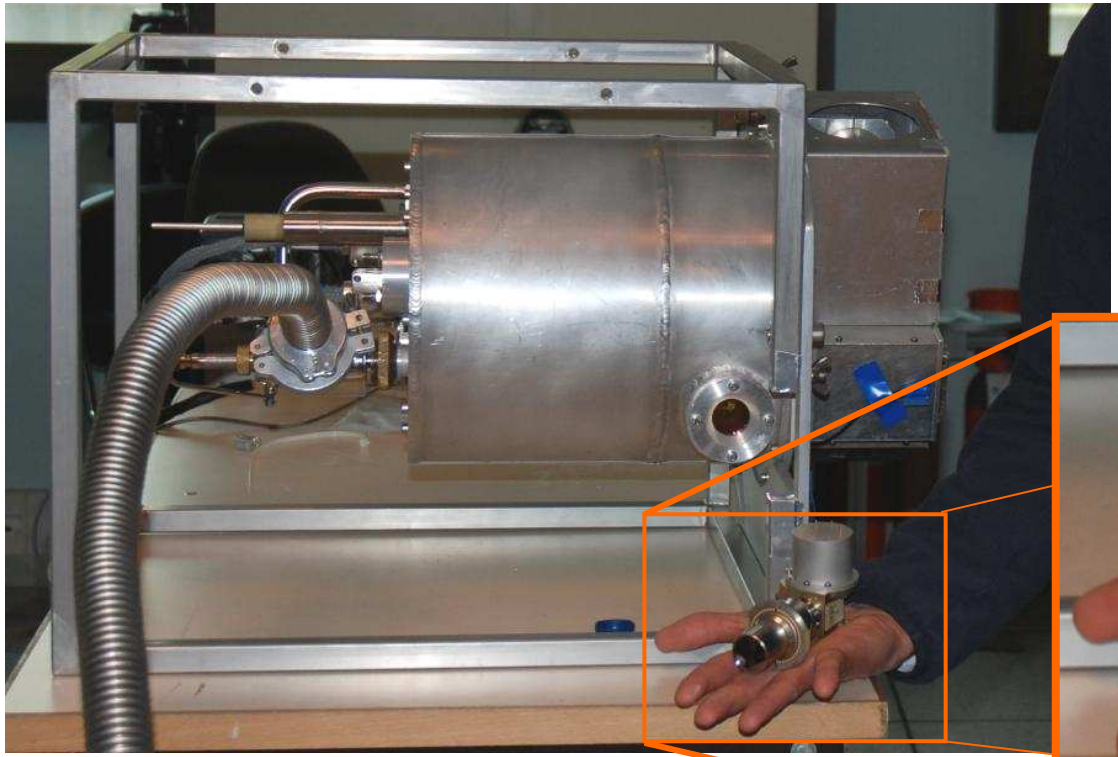
Catherine FC Thales

HGH

Conception d'instruments infrarouges miniaturisés innovants.

- ❑ Pour des applications de veille (champ d'observation autour de 180°)
- ❑ Pour des applications de pilotage (champ d'observation autour de 60°)

Miniaturisation des instruments ONERA

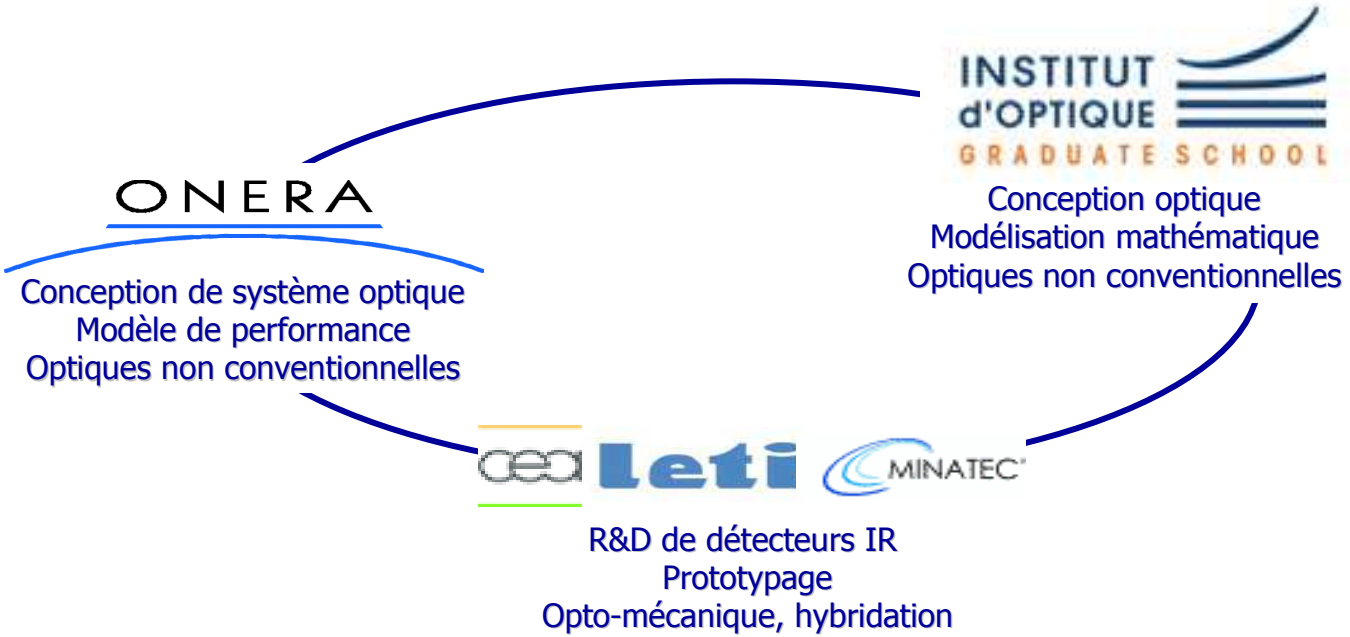


Spectro-imageur MISTERE

Futur micro-spetromètre

Collaboration

Financé par la DGA

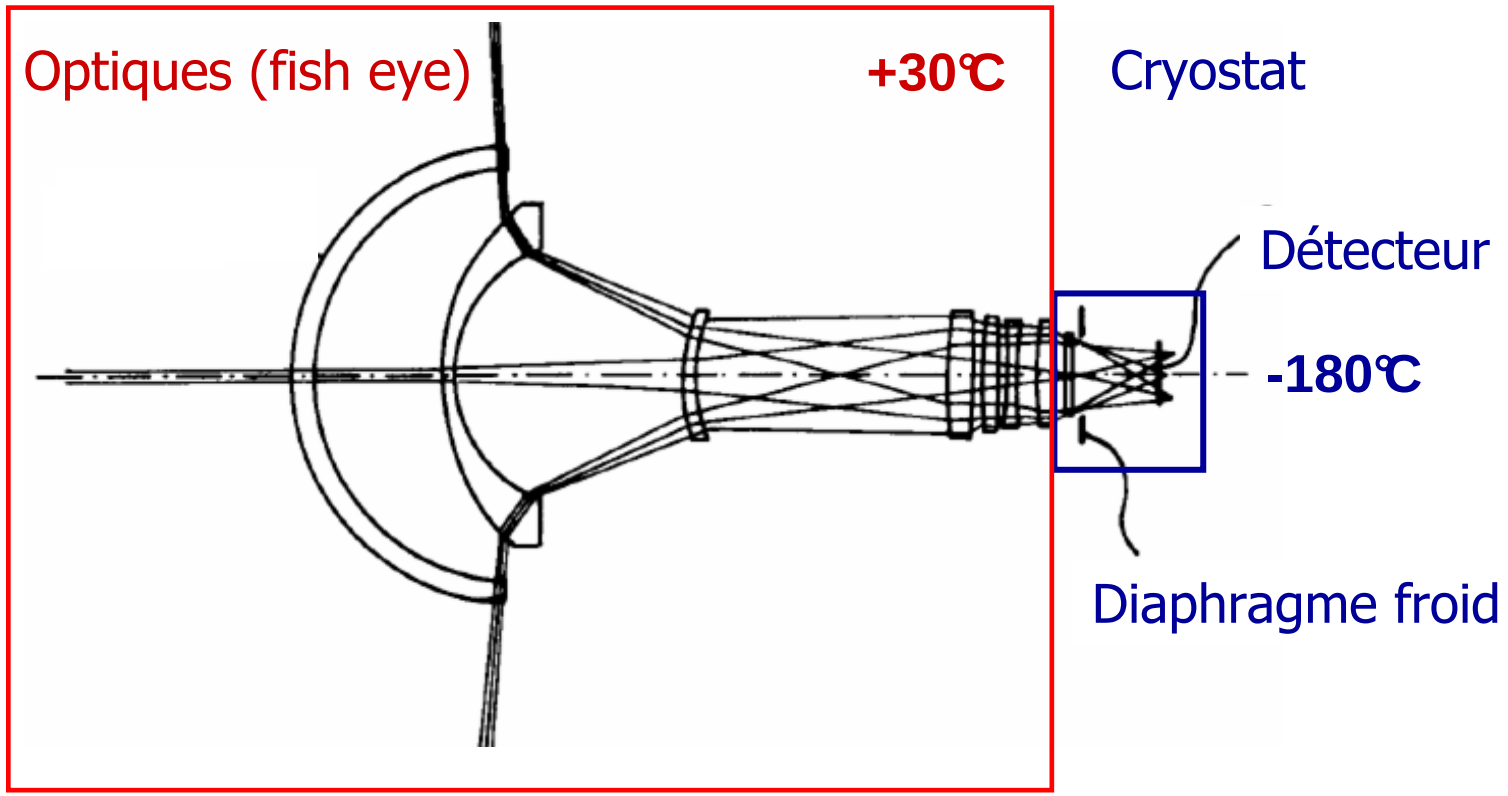


Transfert des technologies vers l'industrie

Plan

- Enjeux et objectif
- Description d'une caméra infrarouge refroidie et problématique
- Présentation des différents dispositifs intégrés dans le cryostat

Exemple d'une caméra infrarouge refroidie classique



Brevet, « Tête optique pour détecteur de départ de missile ou autre équipement de veille », FR2885702 (B1), 2006.

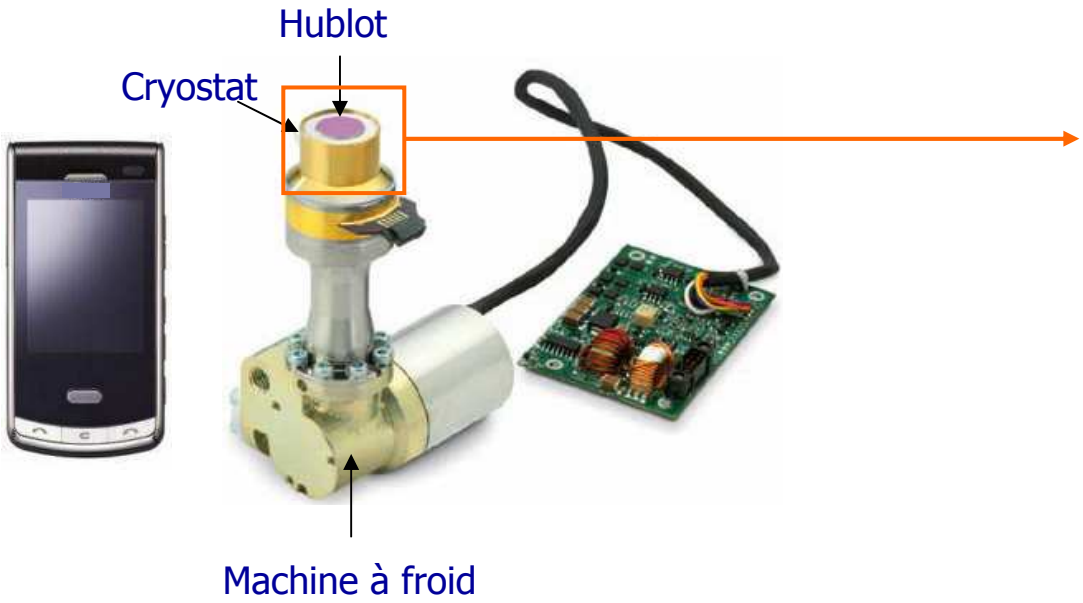
Description d'un cryostat

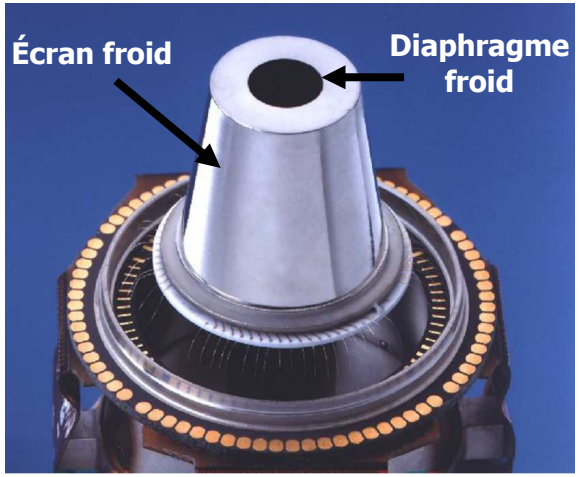
Cryostat Epsilon (SOFRADIR)

+30℃

A l'intérieur du cryostat

-180℃

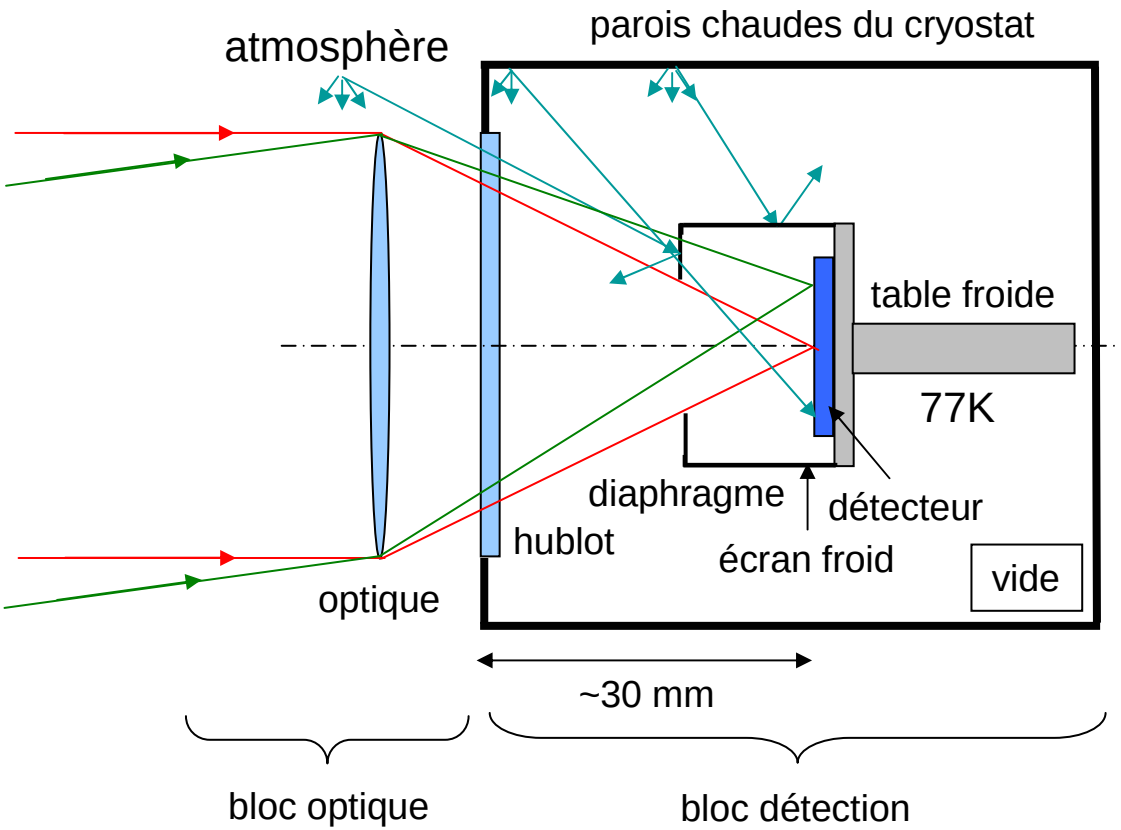


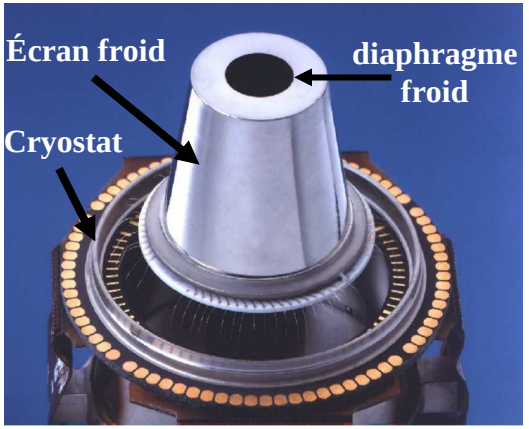


Rôle de l'écran froid

Limitation de flux : détecteur placé dans une enceinte froide

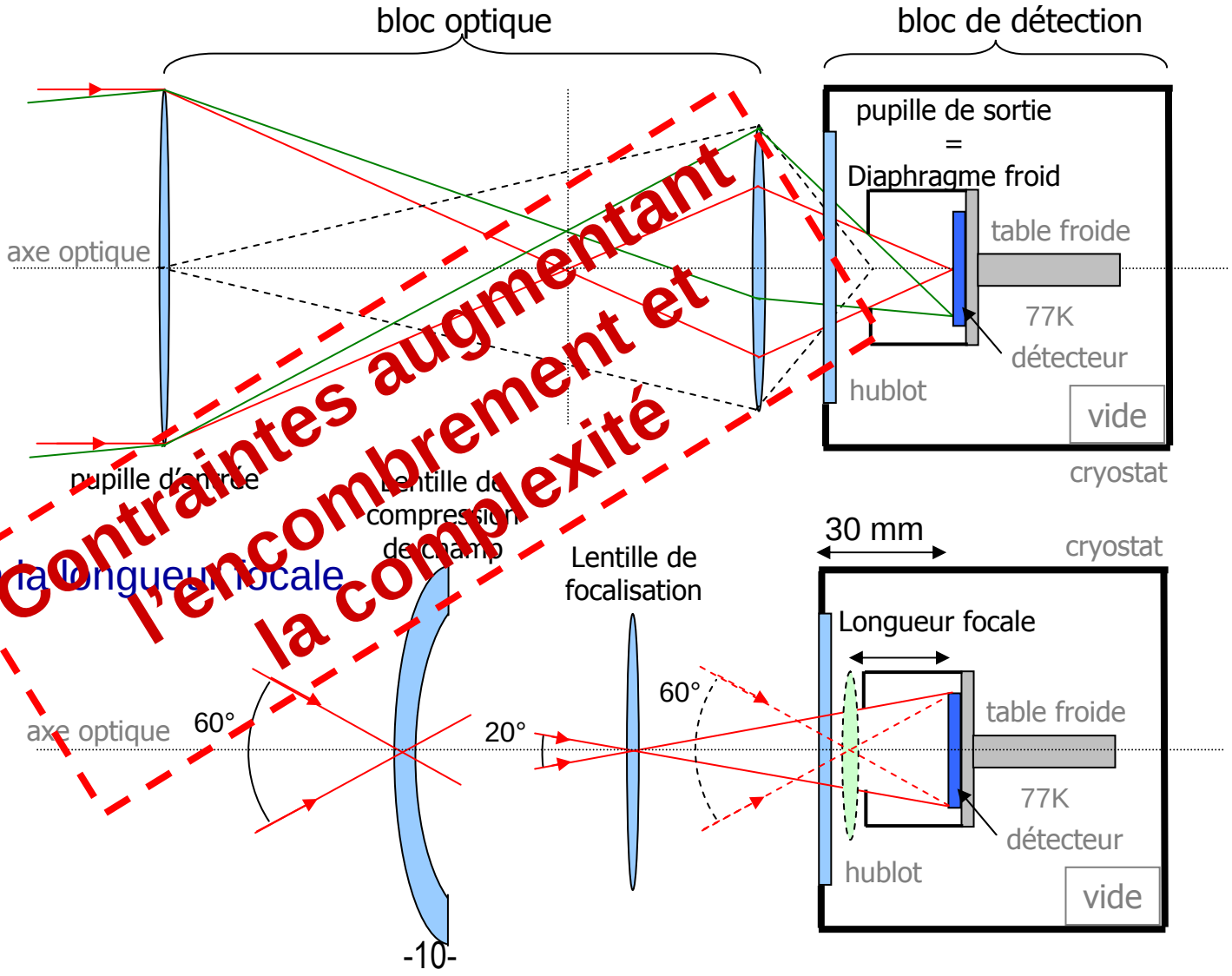
Problème lié au champ d'observation : le détecteur voit le fond environnement





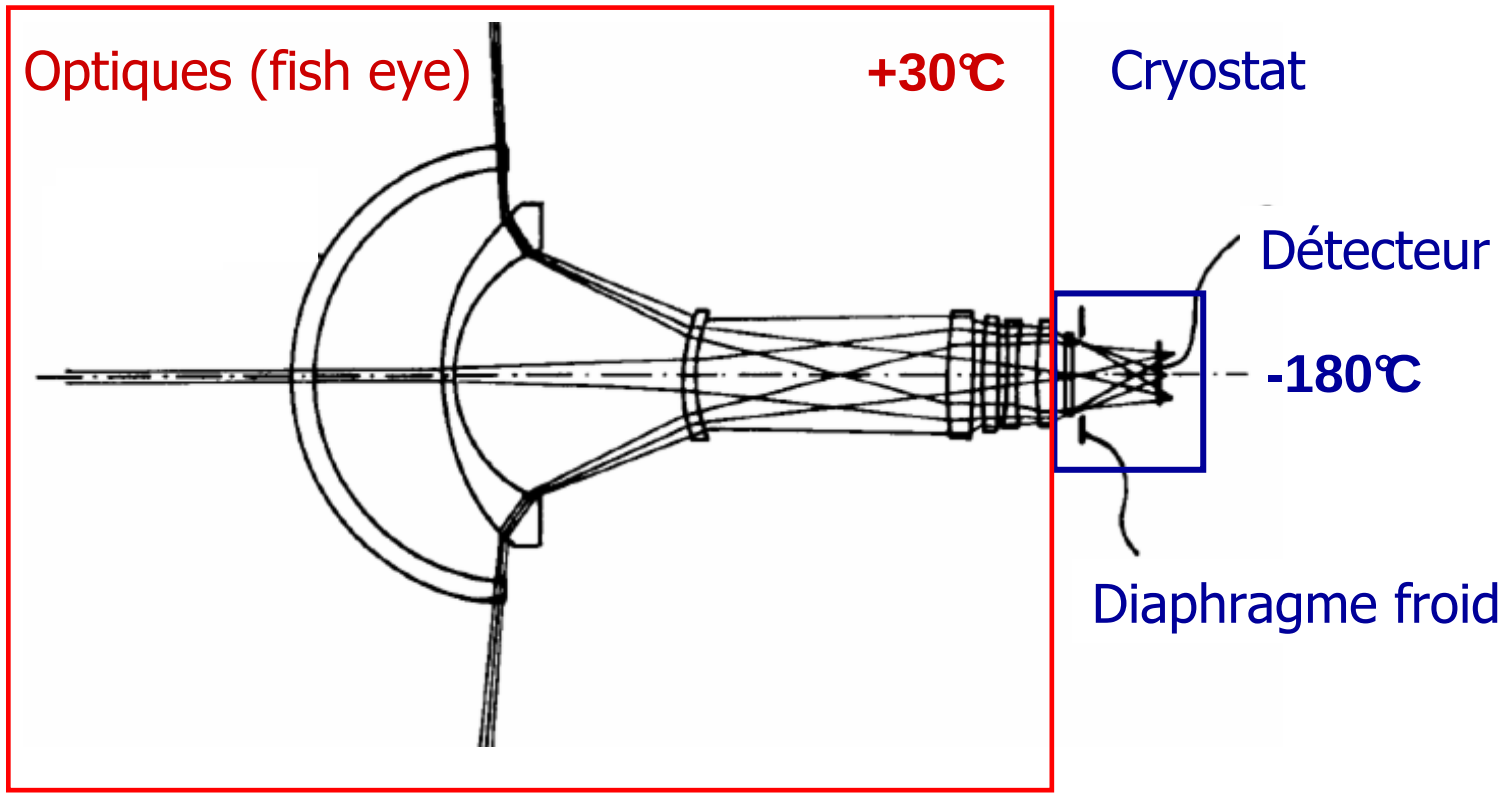
Contraintes liées au bloc de détection

- Conjugaison pupille d'entrée avec le diaphragme froid



- Tirage supérieur à la longueur focale

Exemple d'une caméra infrarouge refroidie classique

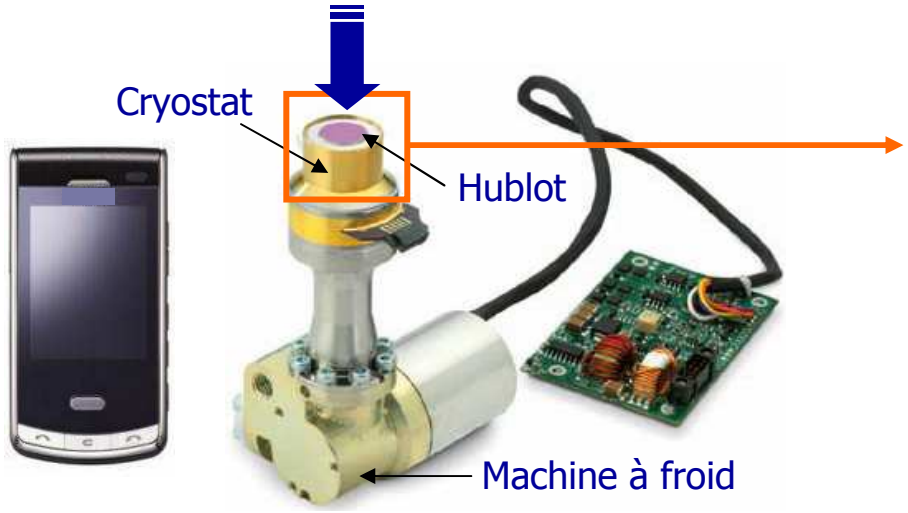


Brevet, « Tête optique pour détecteur de départ de missile ou autre équipement de veille », FR2885702 (B1), 2006.

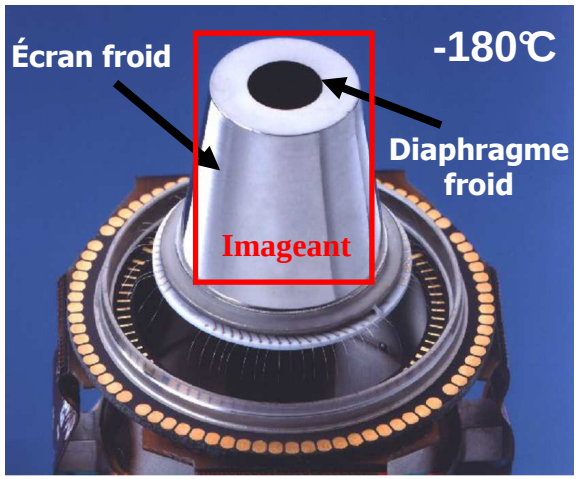
Simplification et miniaturisation des caméras infrarouges

Rendre imageant l'intérieur du cryostat

Cryostat Epsilon (SOFRADIR)



A l'intérieur du cryostat



- ✓ ❑ Encombrement minimal atteint.
- ❑ Simplifie les contraintes sur la conception optique.

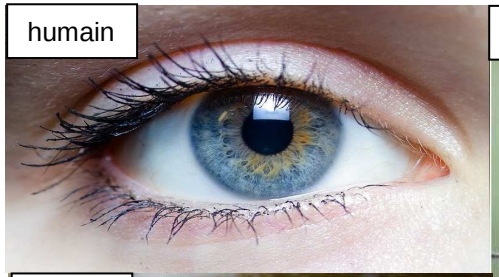
✓ Architecture optique compatible avec l'environnement cryogénique.

Plan

- Enjeux et objectif
- Description d'une caméra infrarouge refroidie et problématique
- Présentation des différents dispositifs intégrés dans le cryostat

Les systèmes bio-inspirés

humain



libellule

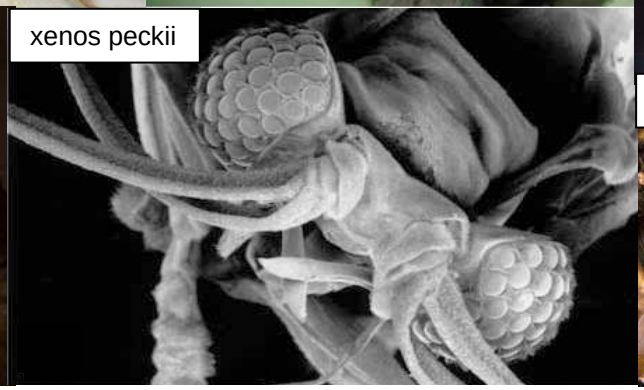
araignée (*Jumping Spider*)

nautile

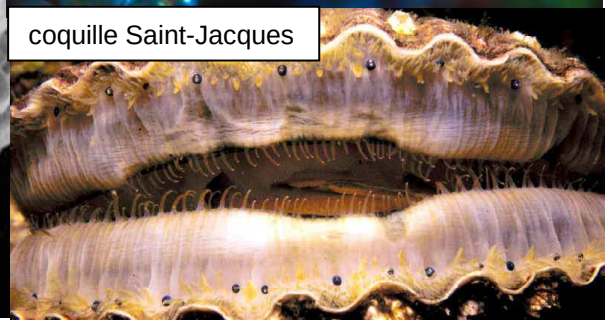
mante des mers

aigle

xenos peckii

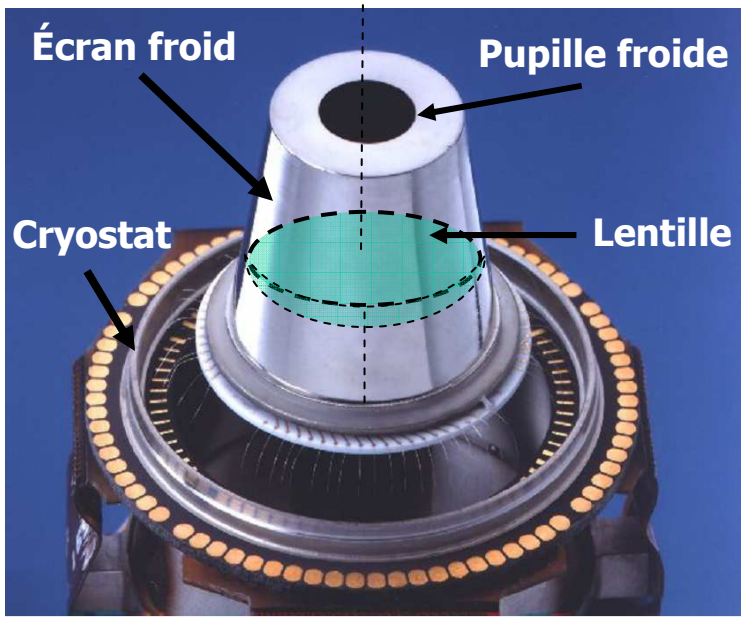


coquille Saint-Jacques

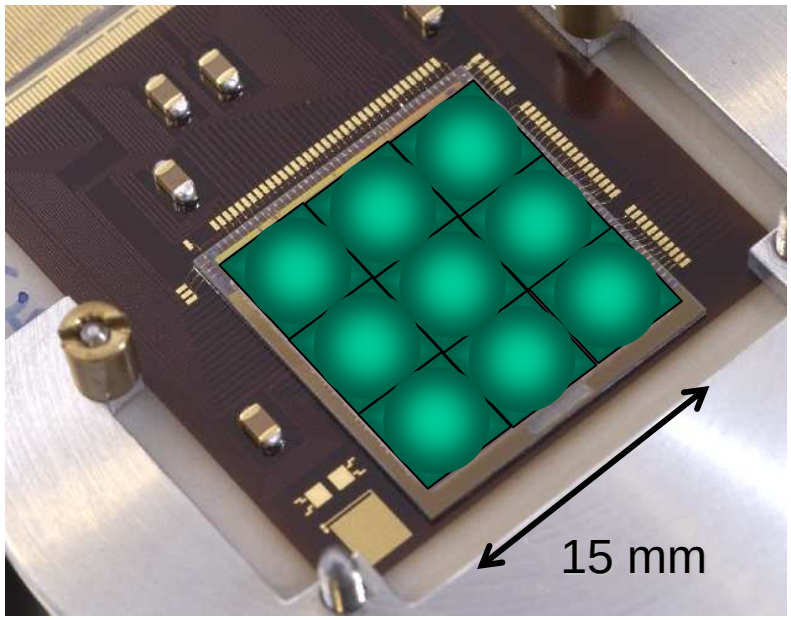


Plan

Intégration dans l'écran froid

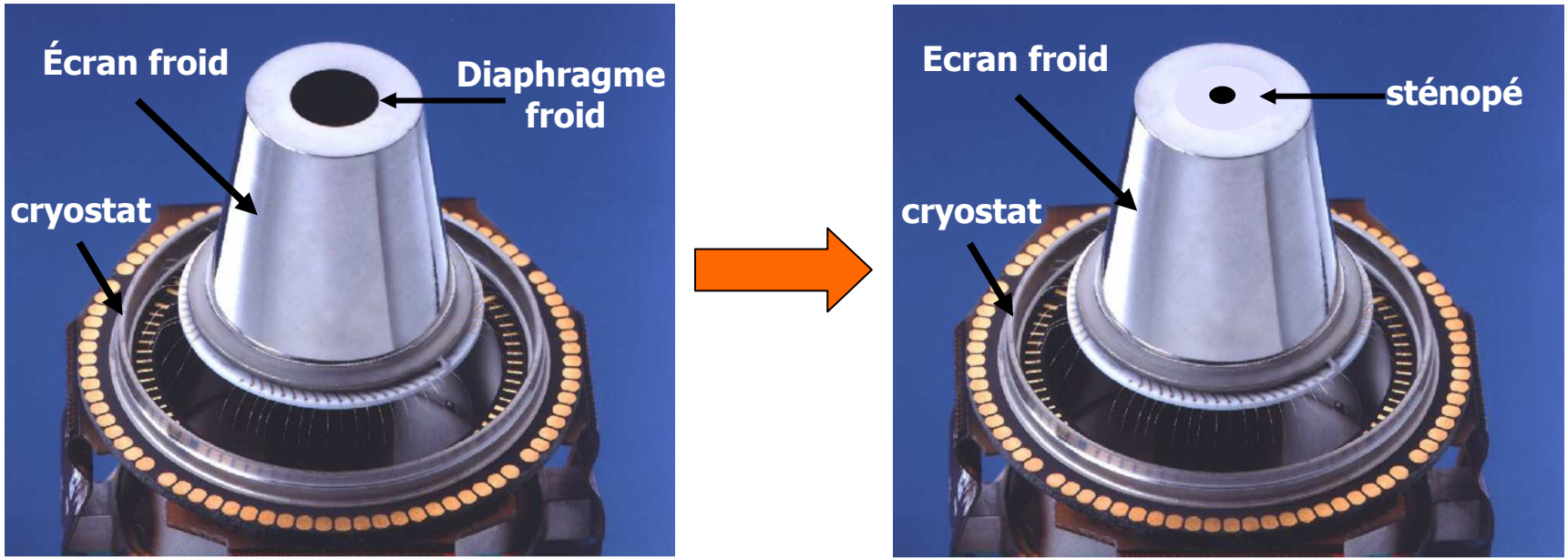


Intégration au niveau du détecteur



Approche minimaliste

Une architecture qui ne modifie pas l'architecture du cryostat



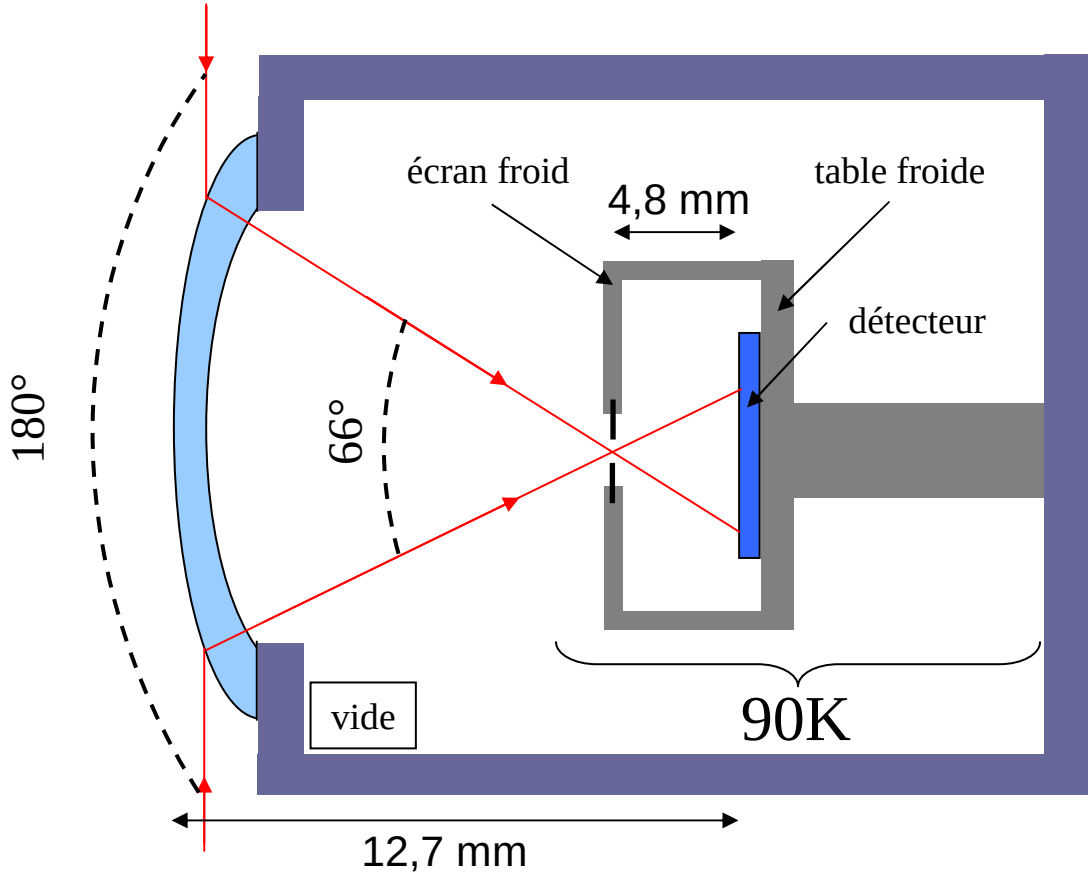
Le cryostat devient une caméra obscura

G. Druart *et al*, « Compact infrared pinhole fisheye for wide field applications, » Appl. Opt., Vol. 48, pp. 1104-1113, 2009.

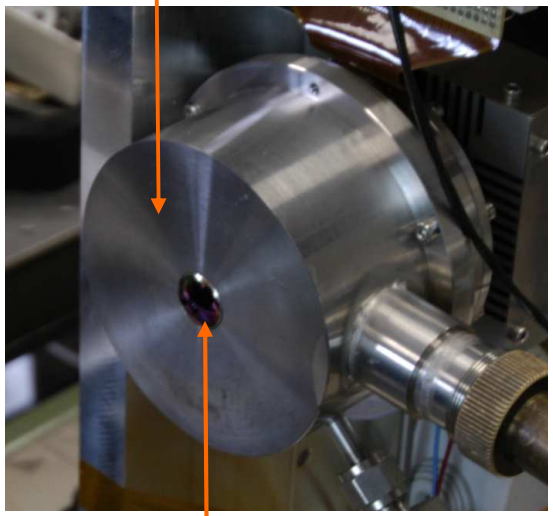
N. Guérineau, G. Druart *et al*, « Lensless infrared microcameras », SPIE Newsroom, 27 mai 2010

Augmentation du champ d'observation du sténopé

Le hublot est remplacé par une lentille de compression de champ.



Capot du cryostat



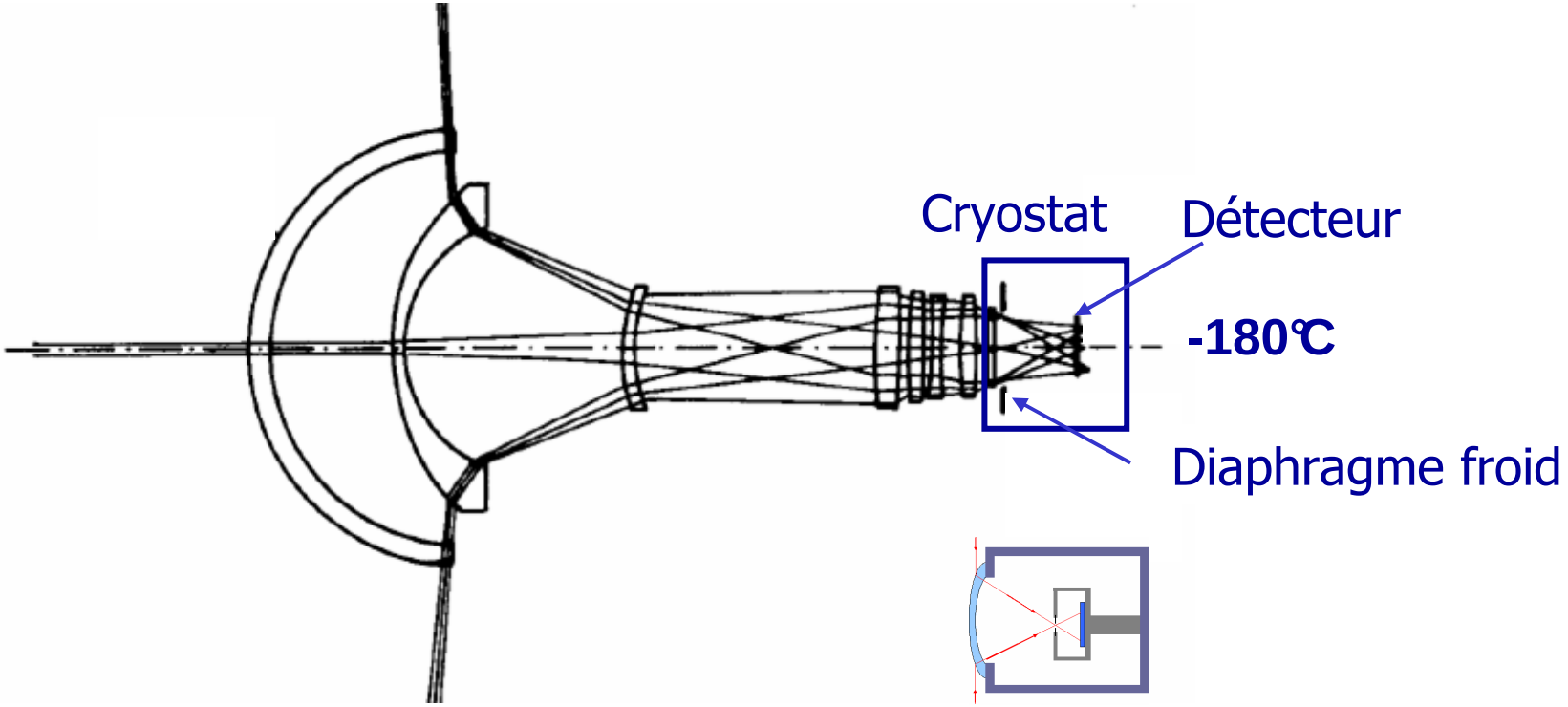
Lentille fish-eye

L'architecture est appelée *camera obscura* à lentille fish eye.

Approche minimaliste : peu de changement de l'architecture du cryostat.

La caméra obscura à lentille fish eye

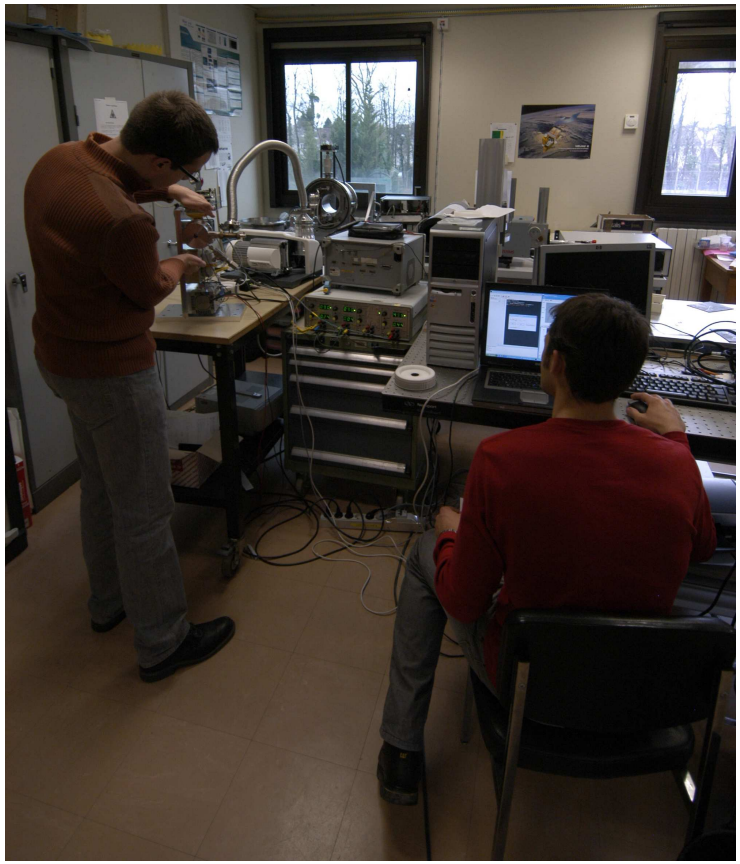
Comparaison avec un fish eye infrarouge classique

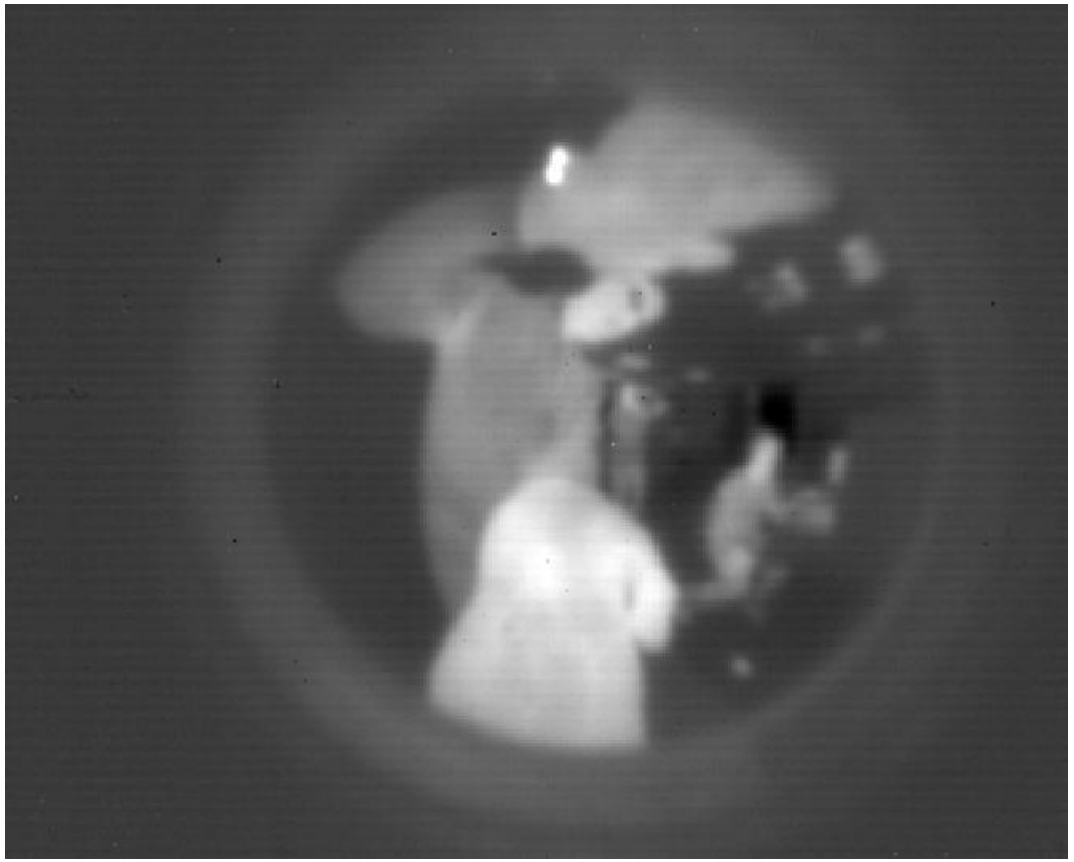


Brevet, « Tête optique pour détecteur de départ de missile ou autre équipement de veille », FR2885702 (B1), 2006.

La caméra obscura à lentille fish eye

Mise en œuvre expérimentale





G. Druart *et al*, « Compact infrared pinhole fisheye for wide field applications, » Appl. Opt., Vol. 48, pp. 1104-1113, 2009.

Bilan sur le sténopé

Limitations

faible résolution angulaire

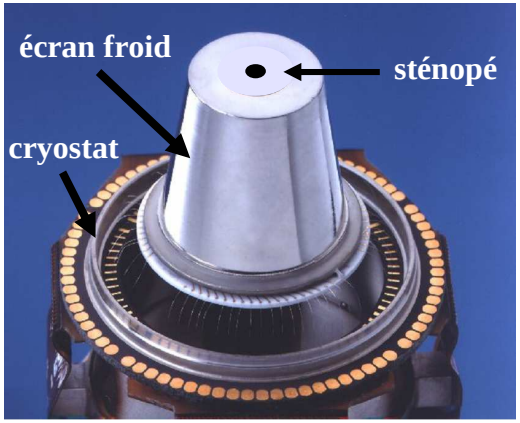
un bilan radiométrique médiocre

Avantages

simple

très grande tolérance angulaire

possibilité d'obtenir une localisation subpixel.

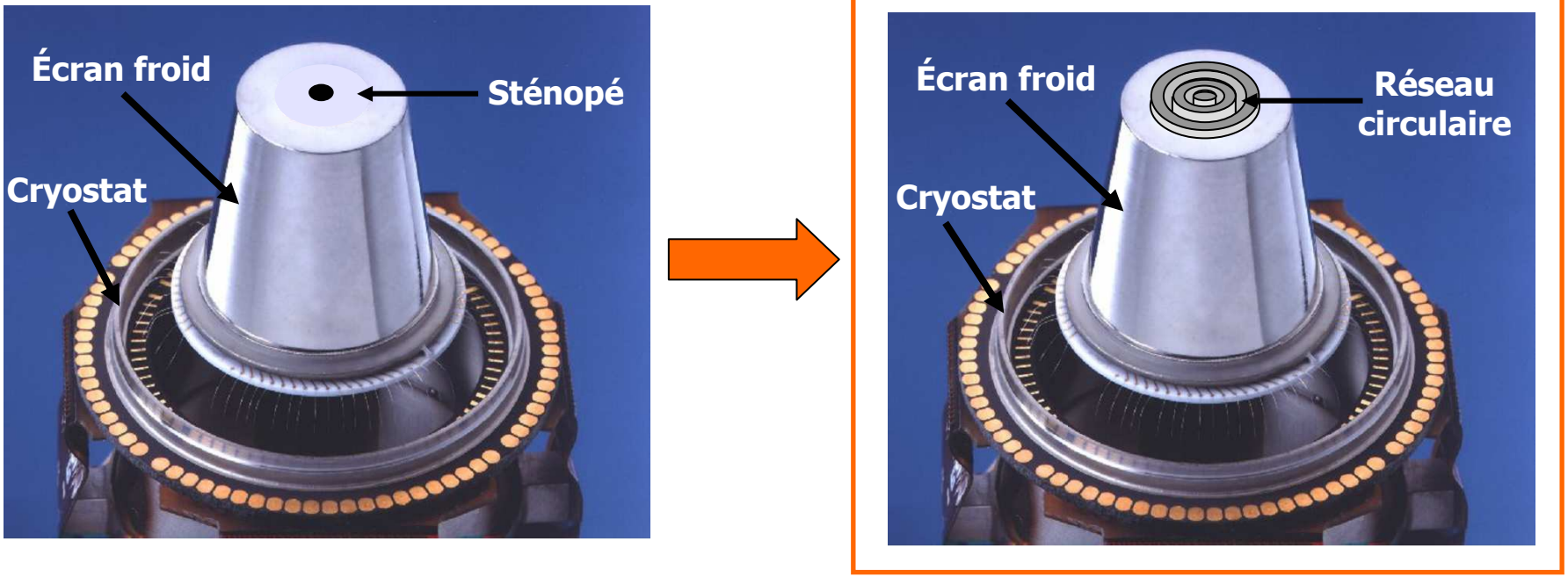


Sténopé à lentille fish eye :
Encombrement : 13mm
FOV=180°
N=24

Un composant plus efficace et confinant plus finement la lumière suivant une ligne focale.

Amélioration du sténopé

Intégration d'un réseau circulaire



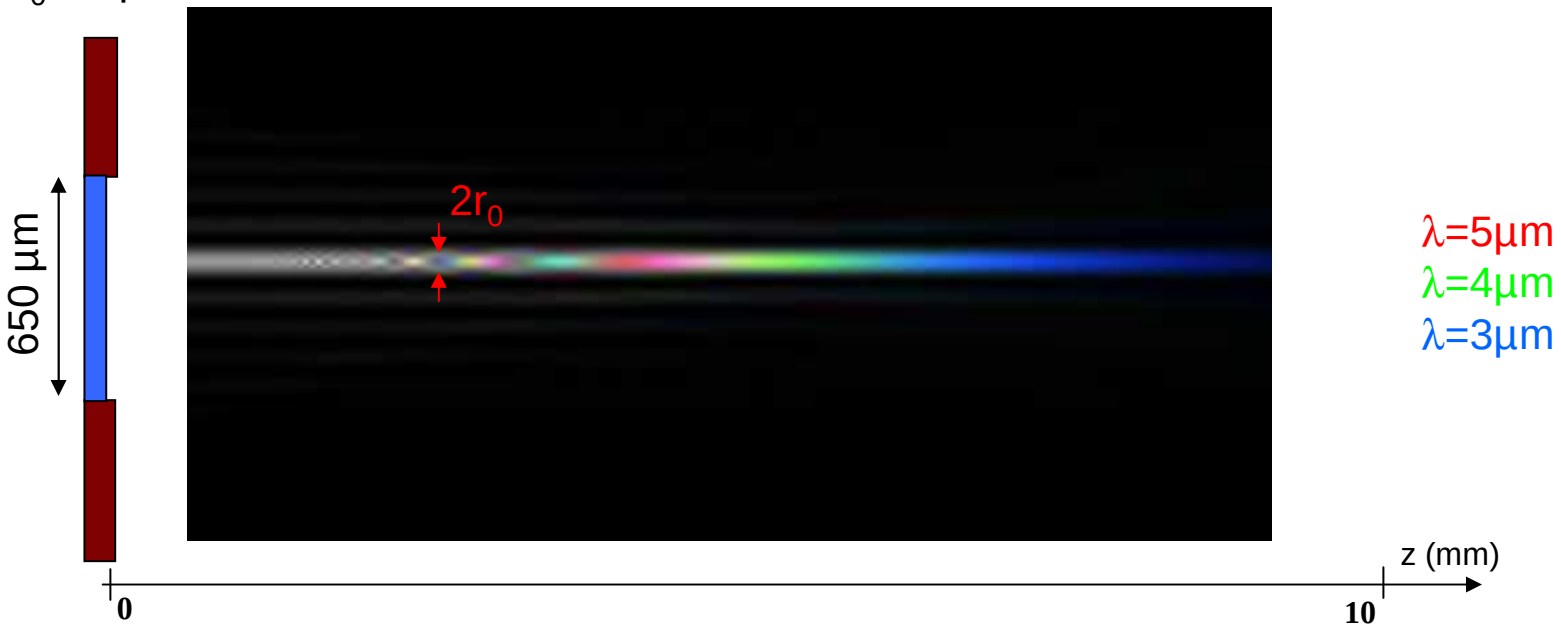
Thèse en cours (Martin Piponnier)

G. Druart *et al.* , « Nonparaxial analysis of continuous self-imaging gratings in oblique illumination », J. Opt. Soc. Am. *A.* **24**, pp. 3379-3387, 2007.

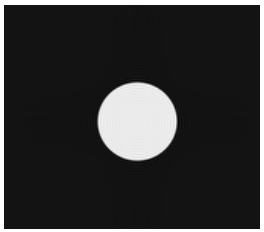
G. Druart *et al*, « Demonstration of Image-zooming capability for diffractive axicons », Opt. lett. **33**, pp. 366-368, 2008.

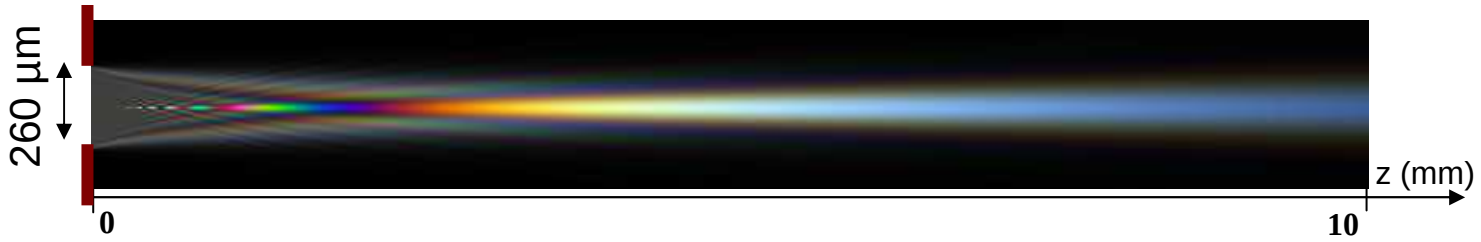
Propriété fondamentale

Réseau circulaire
r_0=45µm



sténopé



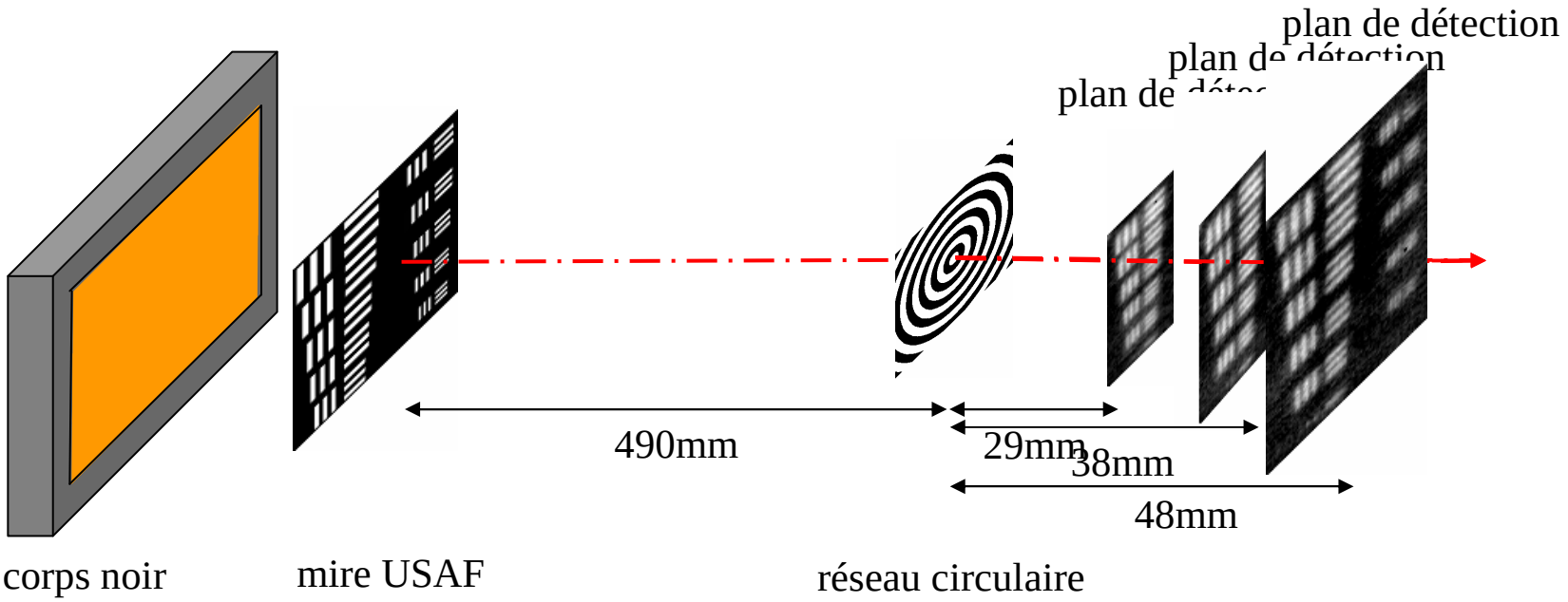


ONERA

Mise en œuvre d'un caméra utilisant un réseau circulaire

Démonstration de la propriété de zoom de l'axicon

PSF invariante suivant la ligne focale = propriété de zoom intégrée au composant !



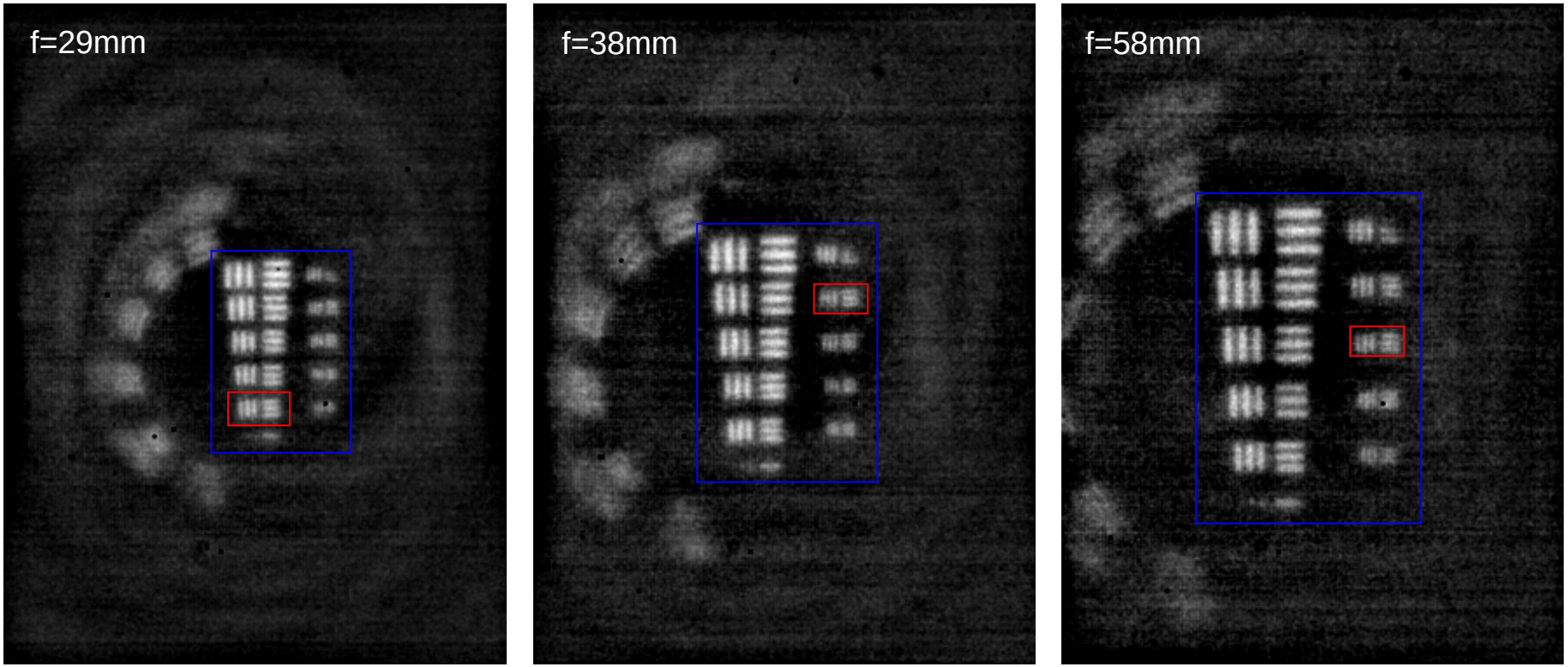
G. Druart *et al,* «Image formation by use of continuously self-imaging gratings and diffractive axicons, » proc. SPIE 6712, 671208, 2007.

G. Druart *et al*, « Demonstration of Image-zooming capability for diffractive axicons », Opt. lett. **33**, pp. 366-368, 2008.

G. Druart *et al*, « MICROCARD : a micro-camera based on a circular diffraction grating for MWIR and LWIR imagery, » Proc. SPIE, Vol. 7100, 71001N, 2008.

Mise en œuvre d'un caméra utilisant un réseau circulaire

Augmentation du champ d'observation



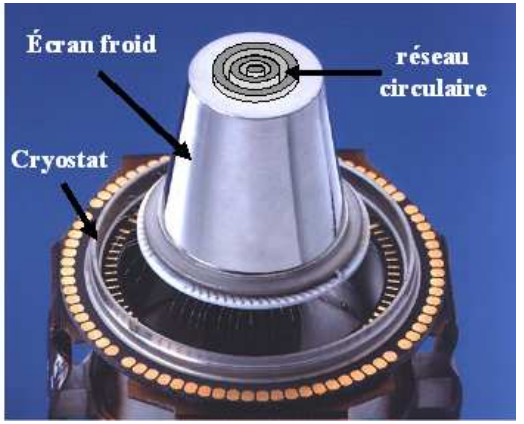
Augmentation de la résolution angulaire

Réalisation d'un zoom à partir d'un seul composant optique.

Bilan sur le réseau circulaire

Limitations

✘ un bilan radiométrique meilleur que celui du sténopé mais encore faible
faible contraste des hautes fréquences



Avantages

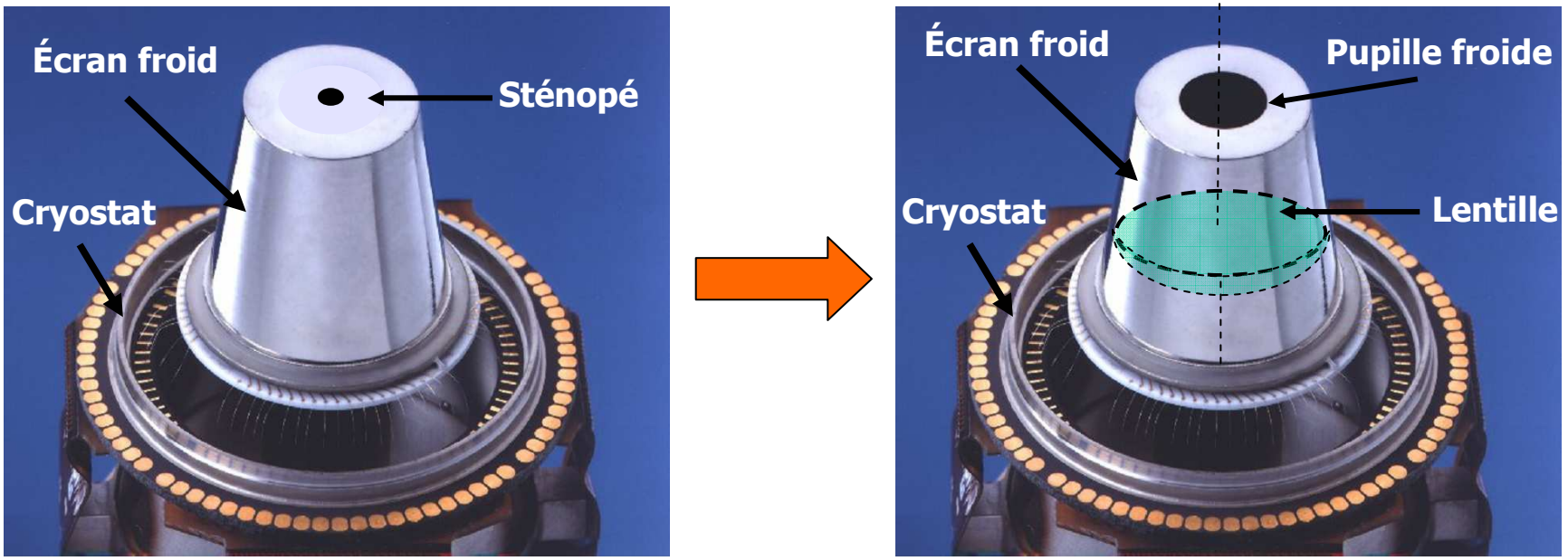
✓ bonne résolution angulaire
bonne tolérance angulaire

Réseau circulaire
FOV : 66°
Encombrement : 4,8mm
N : 9

Intégration de composants optiques supplémentaires dans le cryostat

Intégration dans l'écran froid

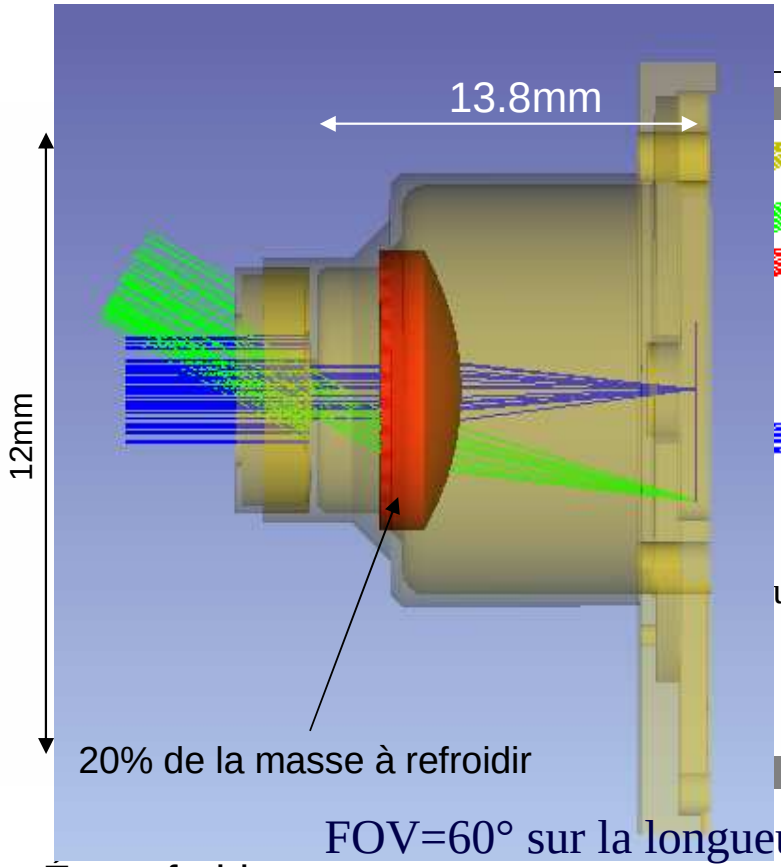
Amélioration de la résolution angulaire et de l'ouverture du système



G. Druart *et al*, « Système d'imagerie grand champ infrarouge à chambre obscure intégrant une lentille », FR 2 936 878 – A1, 2008 .

G. Druart *et al*, « Infrared wide field imaging system integrated in a vacuum housing », WO 2010/040914 A2.

La chambre obscure à lentille intégrée

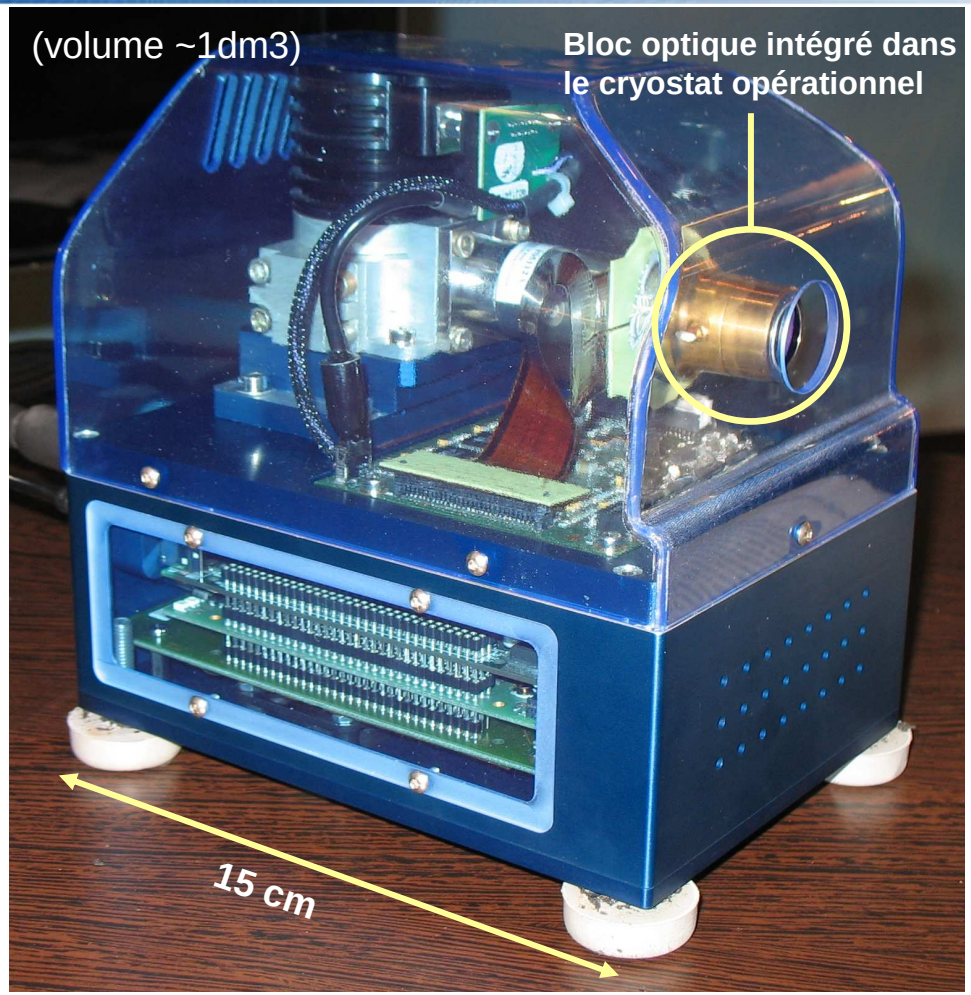


FOV=60° sur la longueur
N=4 (lentille sphérique)
N=3 (lentille DOE asphérique)

G. Druart *et al*, « Système d'imagerie grand champ infrarouge à chambre obscure intégrant une lentille », FR 2 936 878 – A1, 2008 .

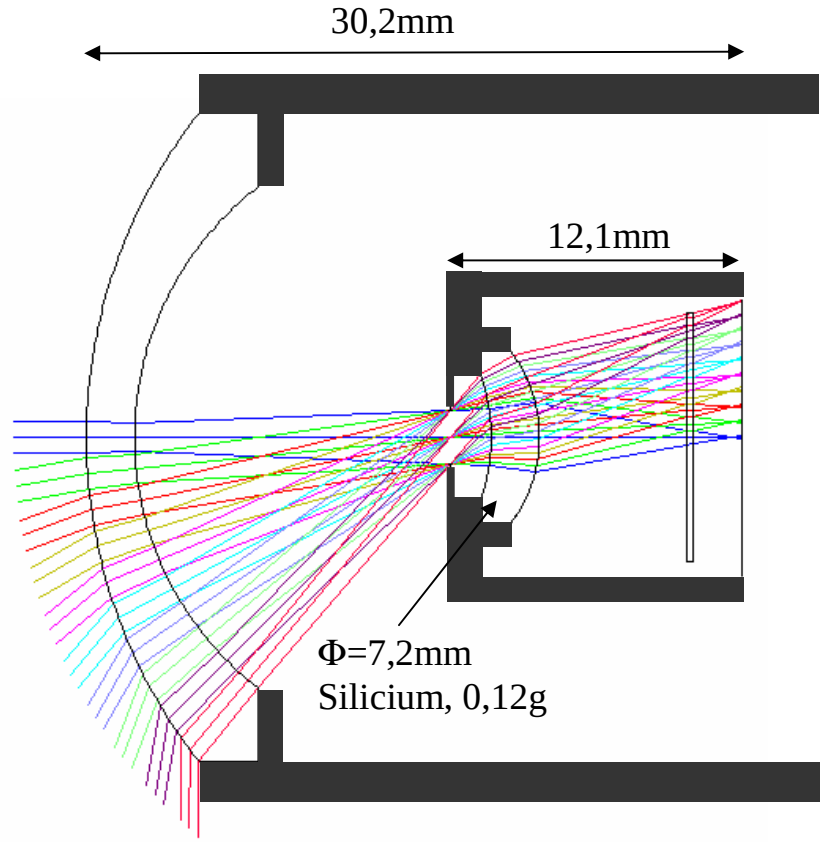
G. Druart *et al*, « Infrared wide field imaging system integrated in a vacuum housing », WO 2010/040914 A2.

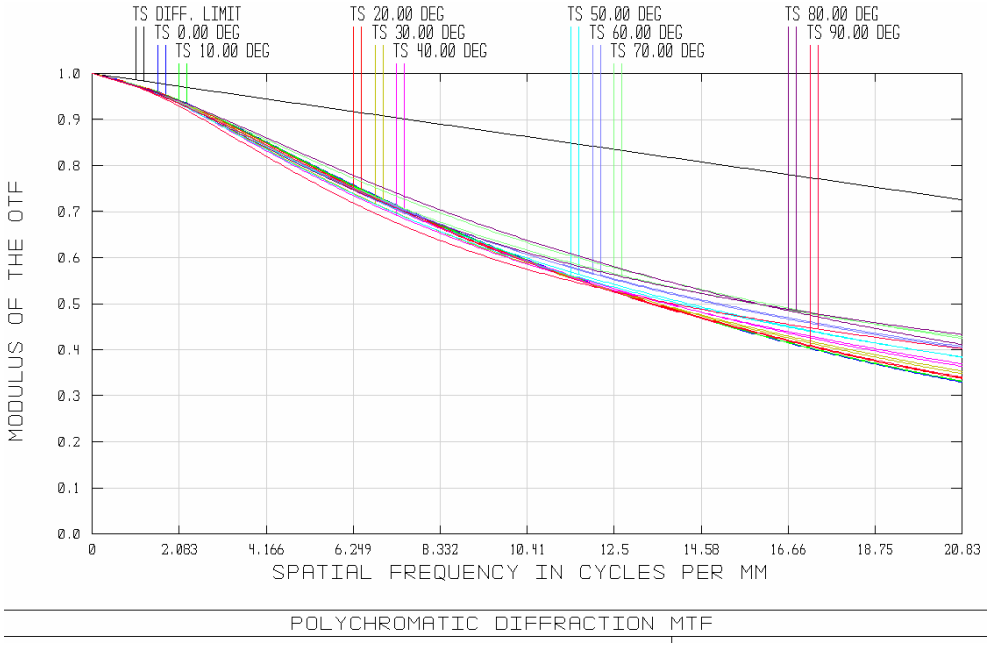
Réalisation d'un prototype



Présentation au salon SPIE Orlando 2010
Présentation au salon Eurosatory 2010

La suite : caméra FISBI





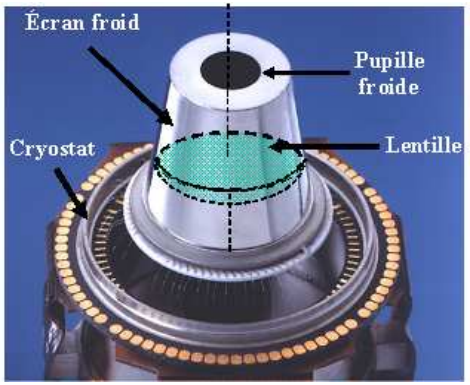
FOV=180° sur la largeur (640×480 pas de 24µm)
N=2,8 (lentille sphérique)
N=2,5 (1 lentille DOE asphérique)

Bilan sur la chambre obscure à lentille intégrée

Limitations

✗ Une optique doit être refroidie.

L'encombrement du système environ égal à deux fois la longueur focale.



Application grand champ d'imagerie

✓ bonne résolution angulaire

bonne tolérance angulaire

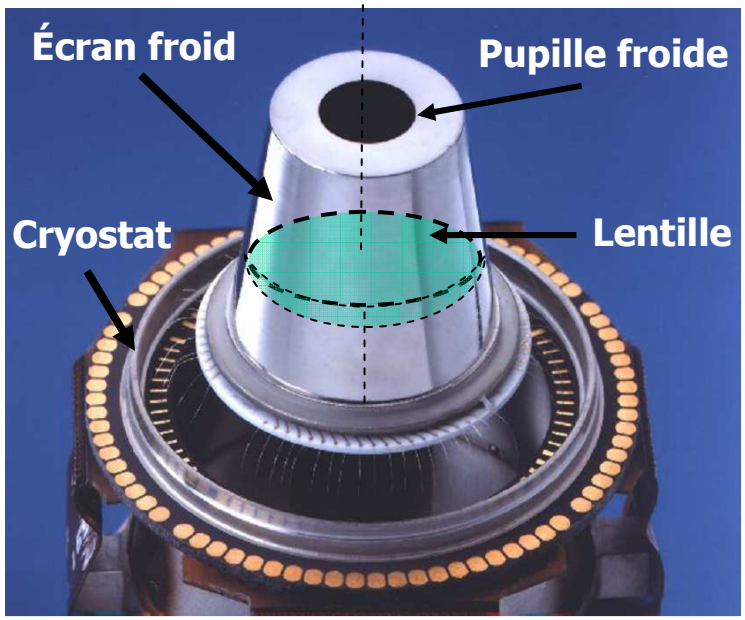
bon bilan radiométrique (système à pupille froide)

Encombrement : 13,5mm
FOV=96°
N=4

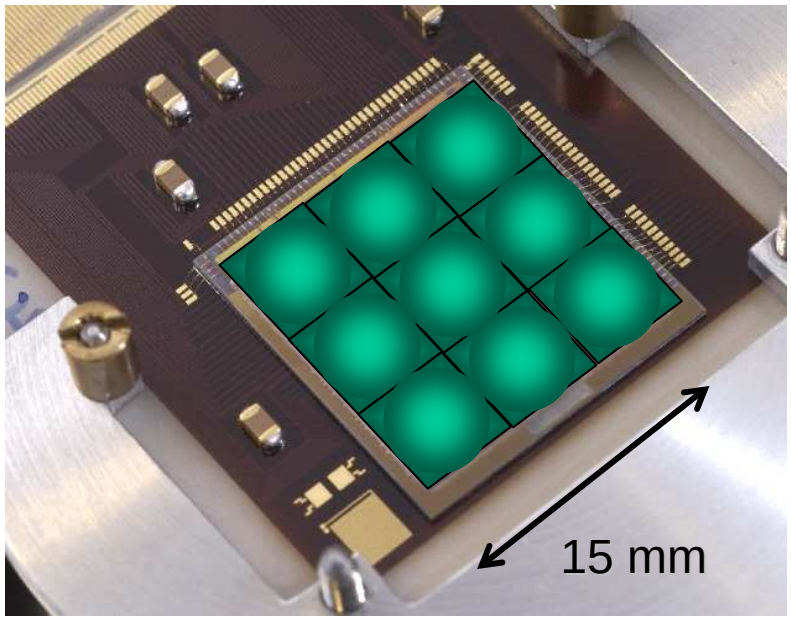
Solutions pour réduire l'encombrement

Plan

Intégration dans l'écran froid



Intégration au niveau du détecteur



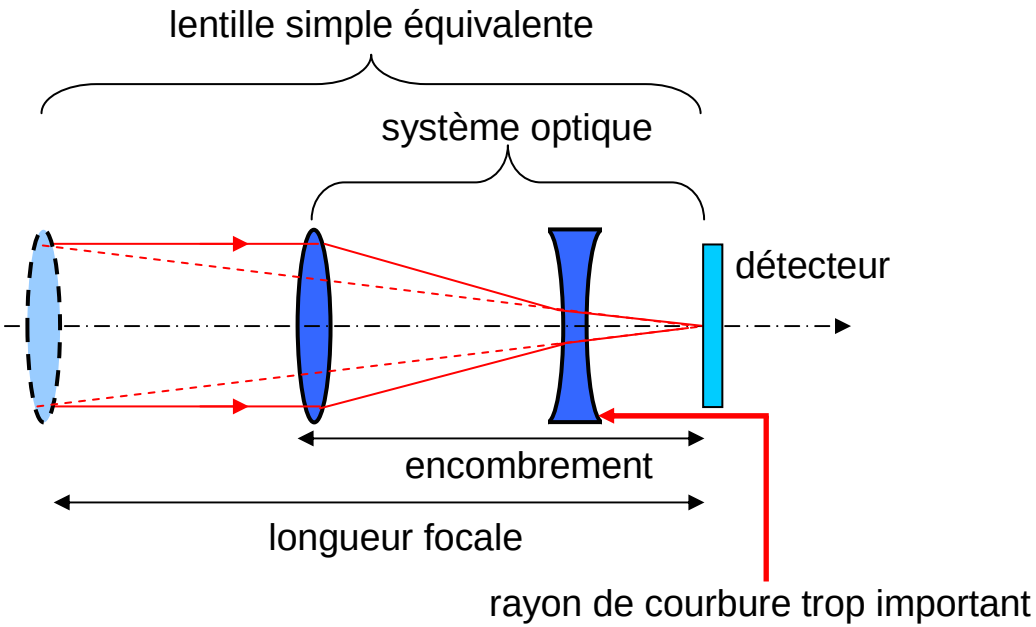
Miniaturisation des systèmes optiques.

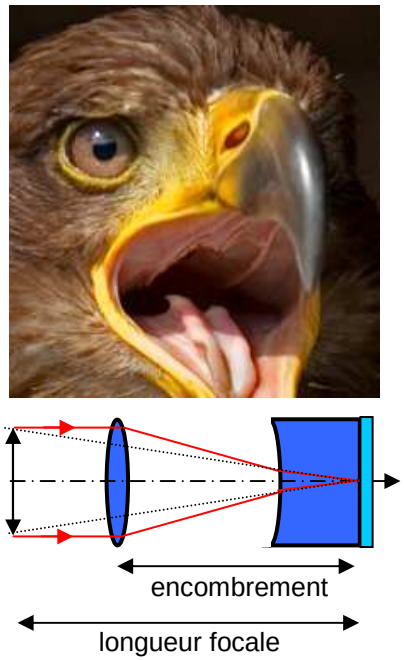
- Réaliser des systèmes dont l'encombrement est inférieur à leur longueur focale.

- Réduire la longueur focale en maintenant le champ d'observation.

Diminution de l'encombrement

Système téléobjectif





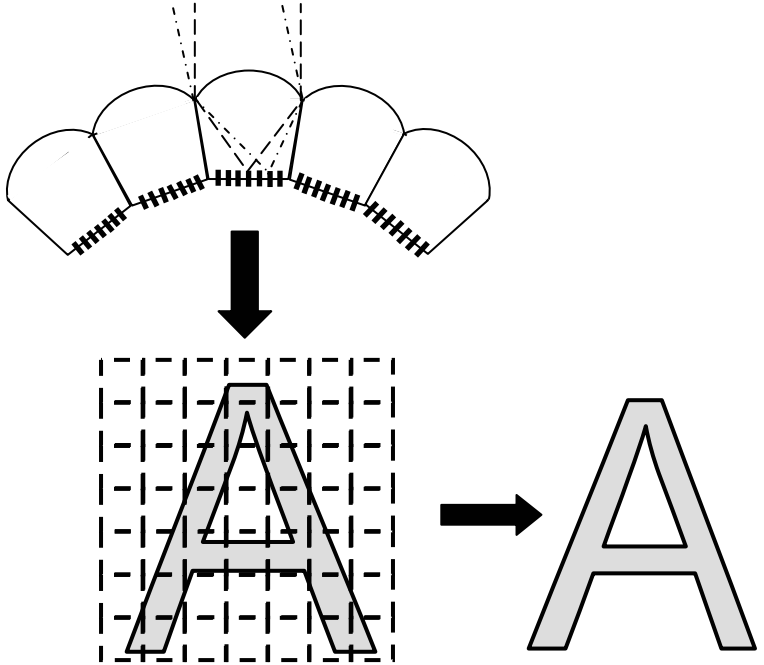
Architecture monovoie incompatible pour les systèmes grand champ (FOV>30°).

Diminution de l'encombrement

Architecture multivoie bio-inspirée

s'appuie de la vision du Xenos Peckii

chaque voie visualise une partie différente de la scène



Xenos Peckii

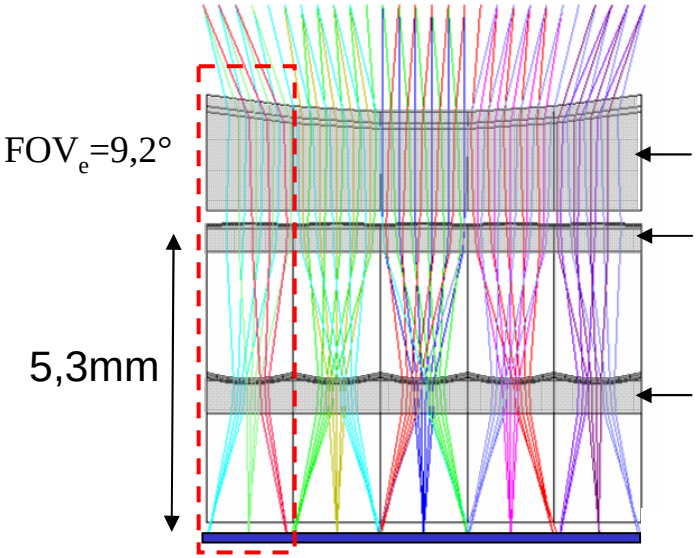
Diminution du champ d'observation

✓ effet téléobjectif à chacune des voies (miniaturisation)

correction des aberrations plus facile (simplification)

ONERA

Système multivoie téléobjectif



5x5 voies,
Champ d'observation : 46°
N=6,4

Image brute

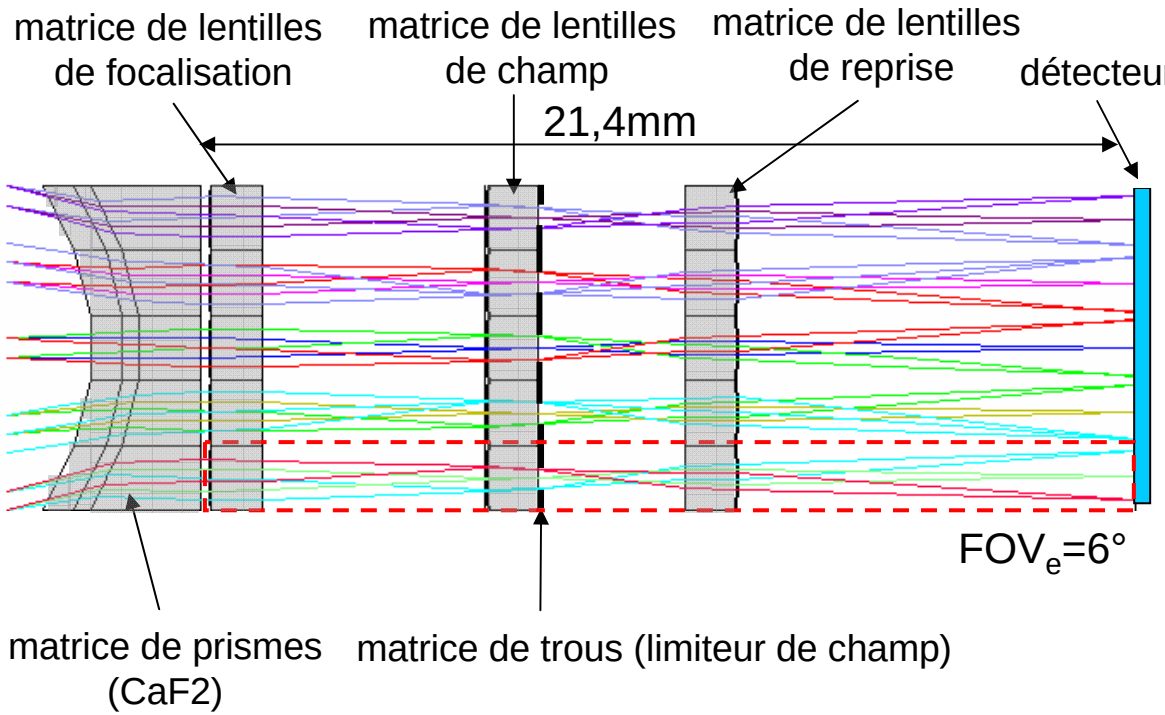
Image restaurée

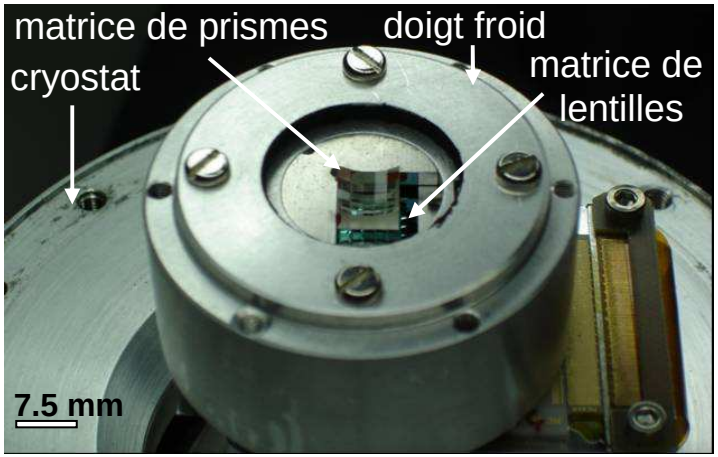
G. Druart *et al*, « Demonstration of an infrared micro-camera inspired by Xenos-peckii vision, » Appl. Opt. **48**, pp. 3368-3374, 2009.

G. Druart *et al*, « Les multiples facettes des imageurs multivoies, » Photoniques, No 48, septembre/octobre, pp.46-49, 2010.

Prototype multivoie réalisé

MULTICAM (FOV_t=30°, N=8,6)





G. Druart *et al*, « Demonstration of an infrared micro-camera inspired by Xenos-peckii vision, » Appl. Opt. **48**, pp. 3368-3374, 2009.

ONERA

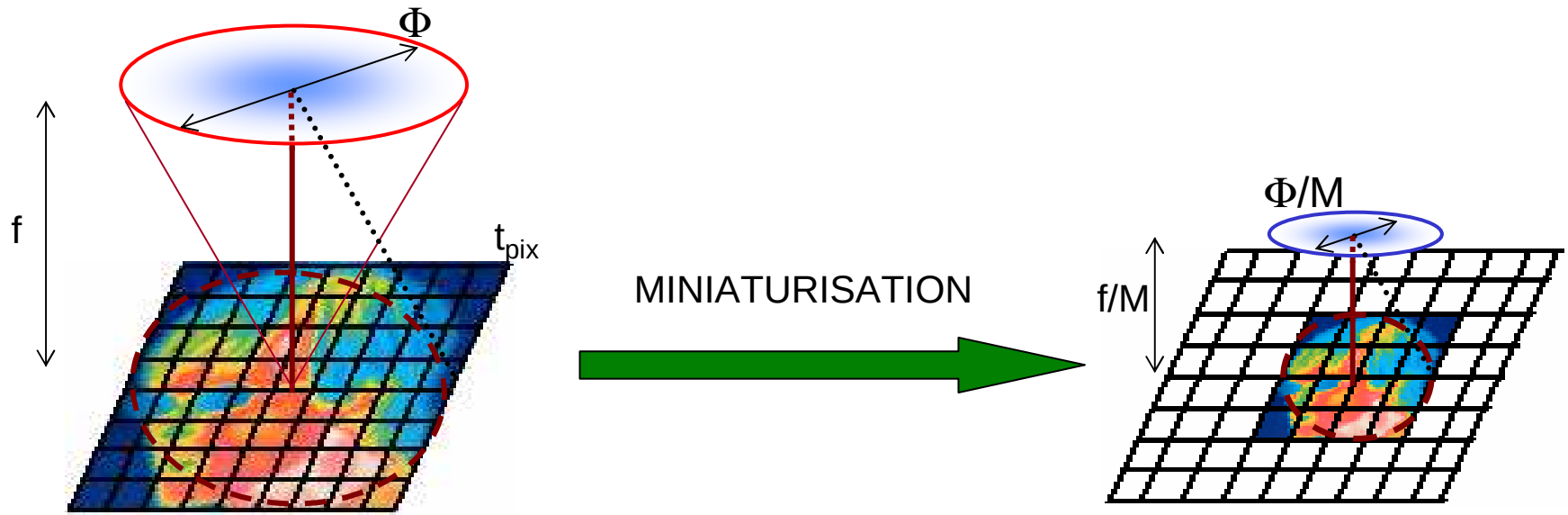
Miniaturisation des systèmes optiques.

- Réaliser des systèmes dont l'encombrement est inférieur à leur longueur focale.

- Réduire la longueur focale en maintenant le champ d'observation.

Réduction de la longueur focale

Miniaturisation en maintenant N et FOV constant

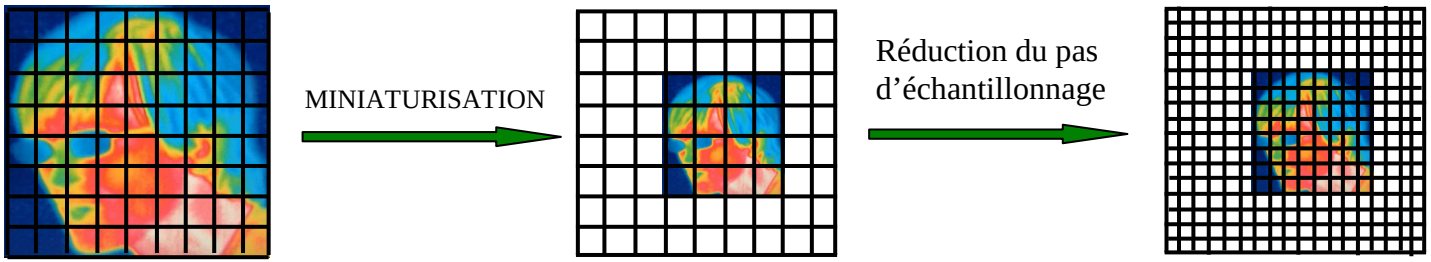


Diminution du nombre de points résolus.

A. W. Lohmann, «Scaling laws for lens systems, » Appl. Opt. **28**, pp. 4996-4998,1989.

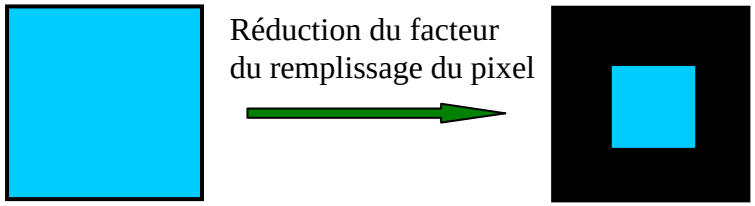
Réduction de la longueur focale

Réduction du pas d'échantillonnage et de la tache de diffraction.

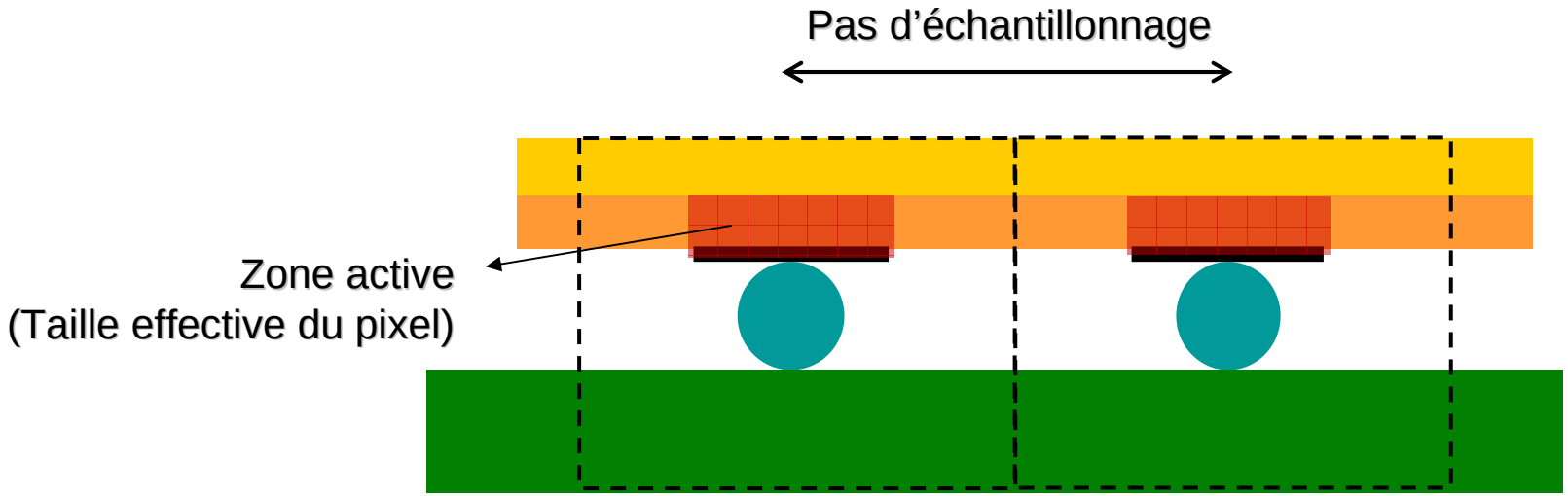


La diminution du pas pixel rencontre des limites technologiques (15 µm pour l'infrarouge)

Réduction du facteur de remplissage



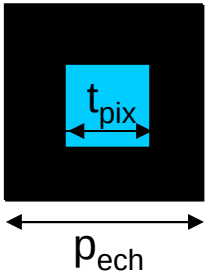
Réduction des pixels d'un FPA IR

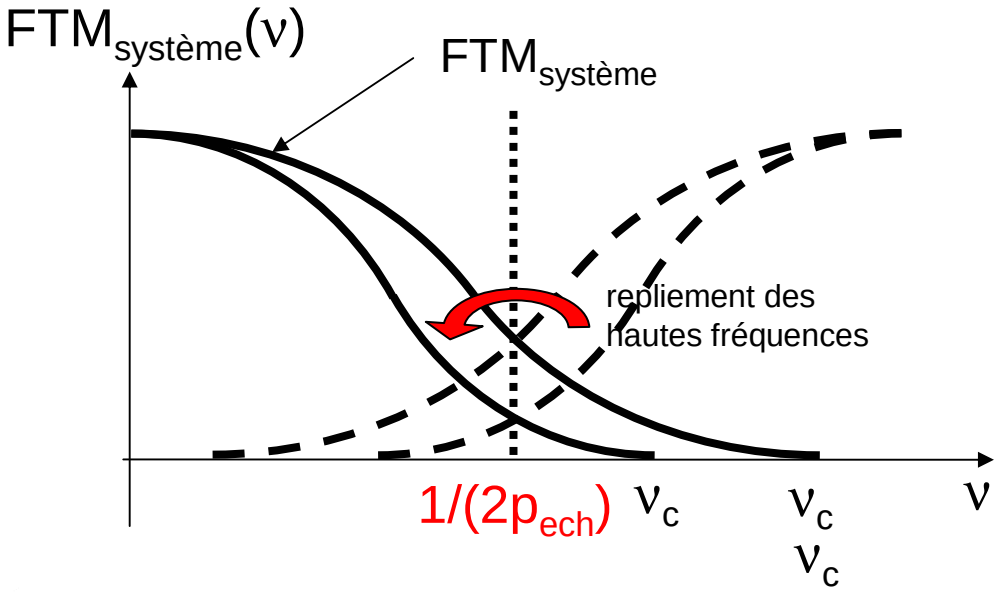


Taille effective du pixel <~ 10 µm
Pas d'échantillonnage > 15 µm

Réduction de la longueur focale

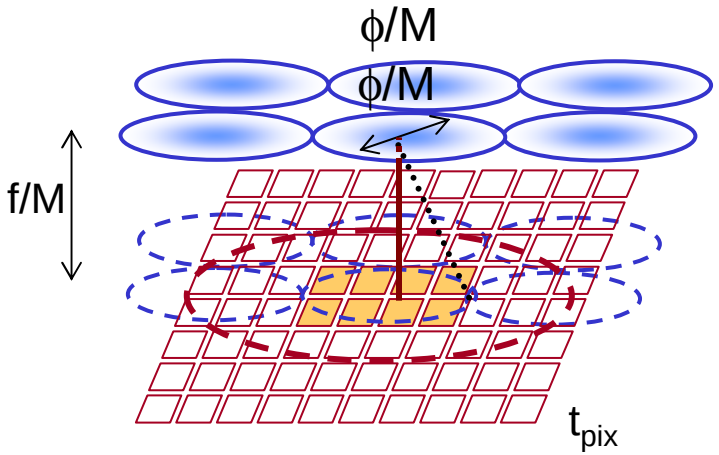
Réduction du facteur de remplissage

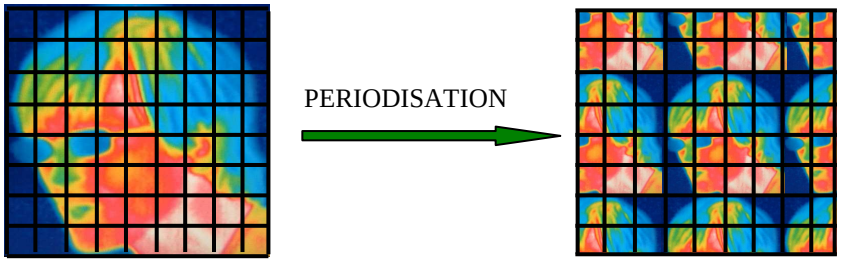




Réduction de la longueur focale

Périodisation des voies optiques





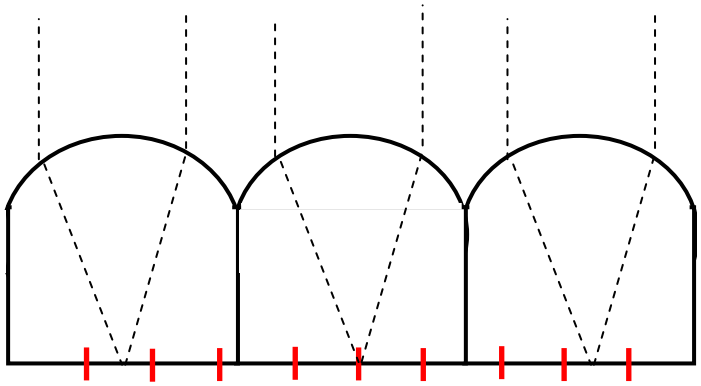
Obtenir un échantillonnage adapté au facteur de remplissage des pixels

Périodisation des voies

Plusieurs pixels réduits par voie

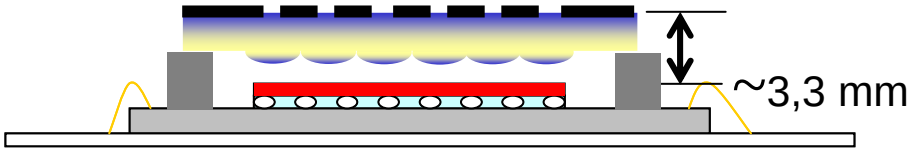
Chaque pixel réduit visualise un point différent de la scène.

Chaque voie visualise la même scène.



Combine l'acquisition rapide des détecteurs matriciels avec la capacité d'échantillonnage des détecteurs mono-pixel.

Système multivoie avec détecteur petit pixel



6x6 voies,
Champ d'observation : 120°
N=3

Image brute

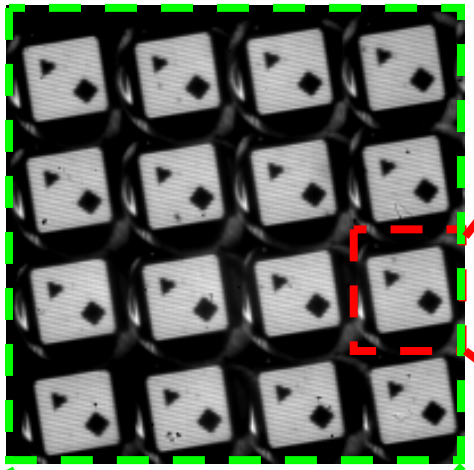


Image sous échantillonnée

Image super résolue

F. de la Barrière, G. Druart et al, Appl. Opt., « Modulation transfer function measurement of a multichannel optical system », Appl. Opt., Vol. 49, No. 15, 2010.

G. Druart *et al*, « Les multiples facettes des imageurs multivoies, » Photoniques, No 48, septembre/octobre, pp.46-49, 2010.

Bilan sur les systèmes multivoies

Limitations

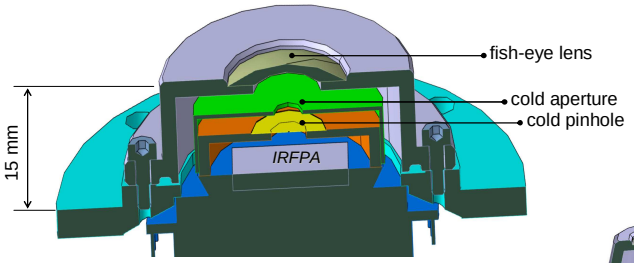
- Architectures plus complexes que la chambre obscure à lentille
- La limitation du champ de chaque voie est délicate
- Bilan radiométrique un peu moins bon que la chambre obscure à lentille intégrée

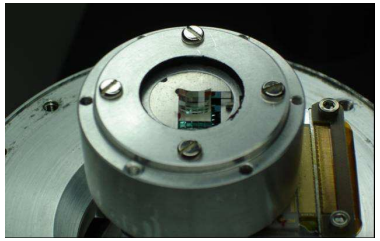
Application grand champ d'imagerie

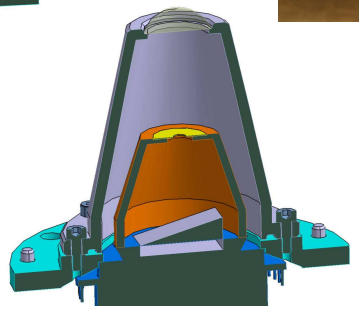
- bonne résolution angulaire
- bonne tolérance angulaire
- 4 fois plus compactes que la chambre obscure à lentille intégrée

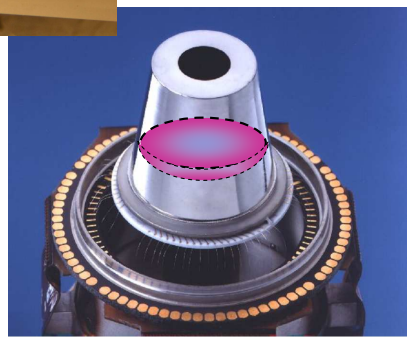
Conclusion

Aujourd'hui : des démonstrateurs de micro-caméras et de micro-spectromètres disponibles en laboratoire







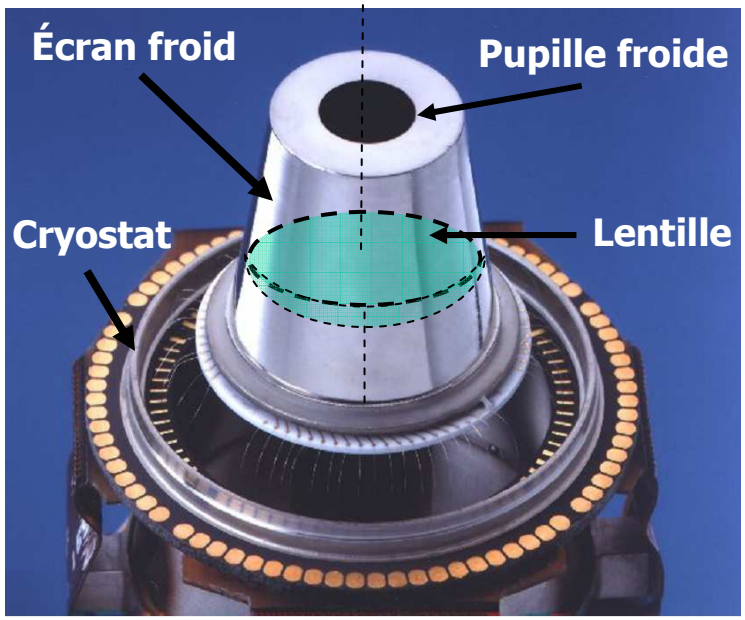


Future : des cryostats avec le label *OPTICS INSIDE* disponible sur le plan industriel.

Conclusion

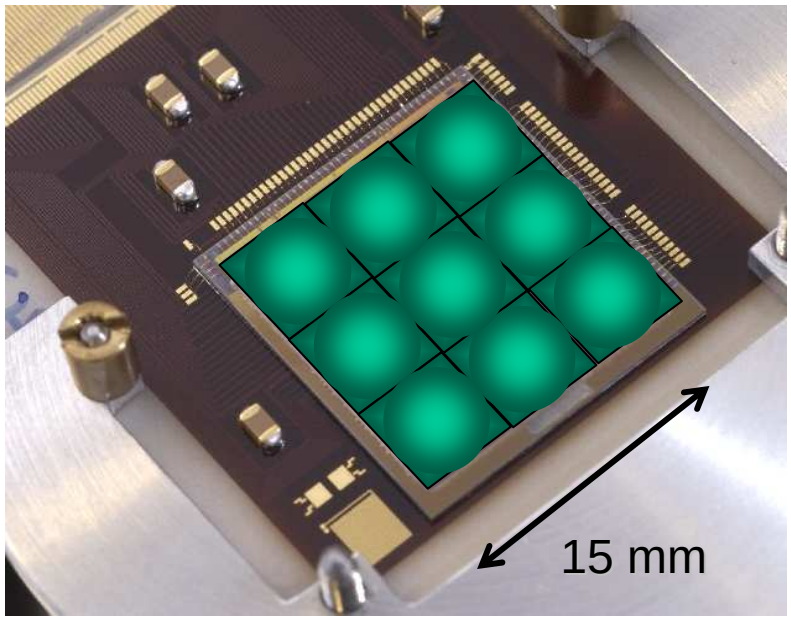
Une nouvelle stratégie de conception de caméras infrarouges compactes

Intégration dans l'écran froid



Valorisations

Intégration au niveau du détecteur

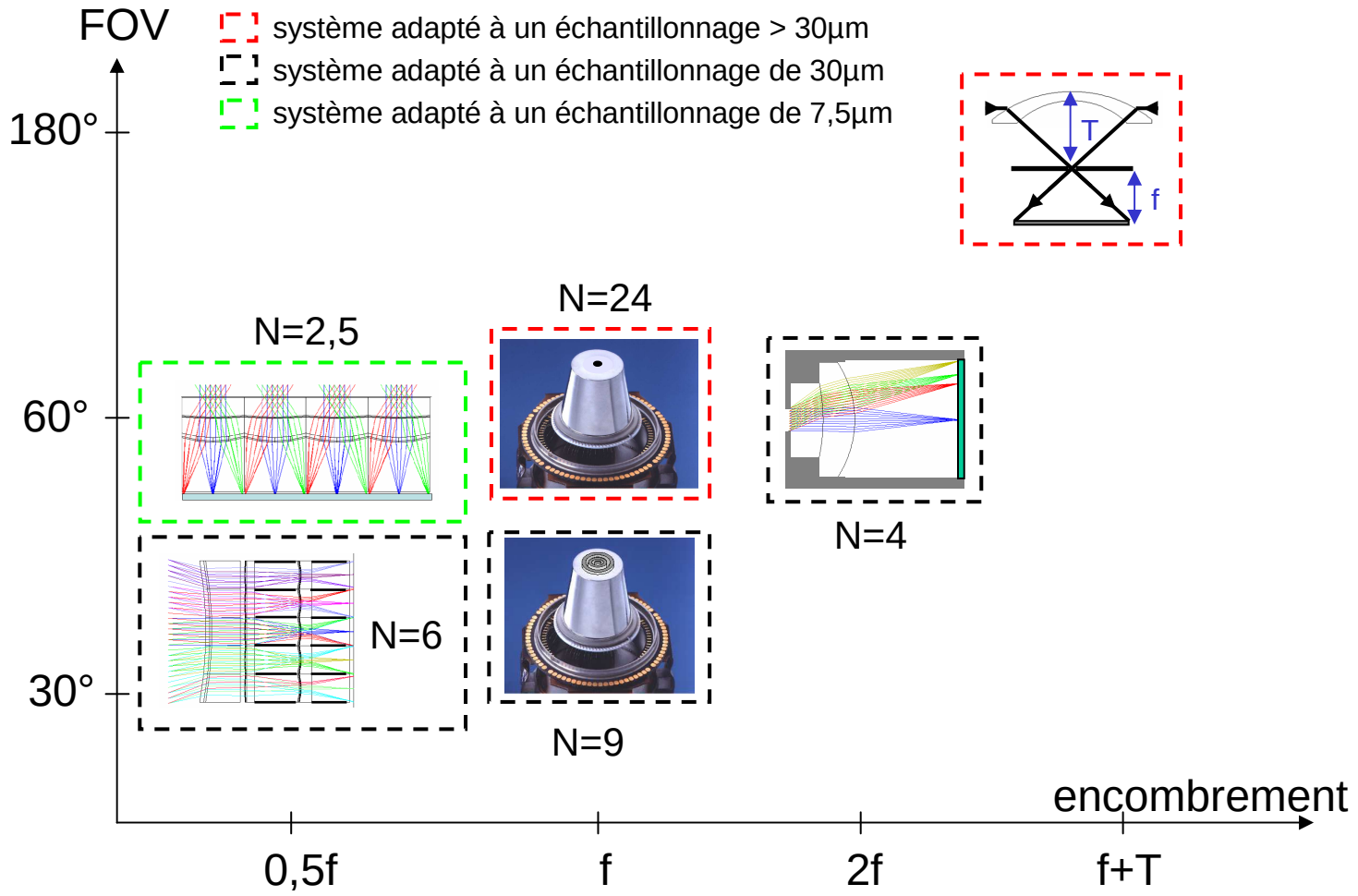


Réalisations

Explorations

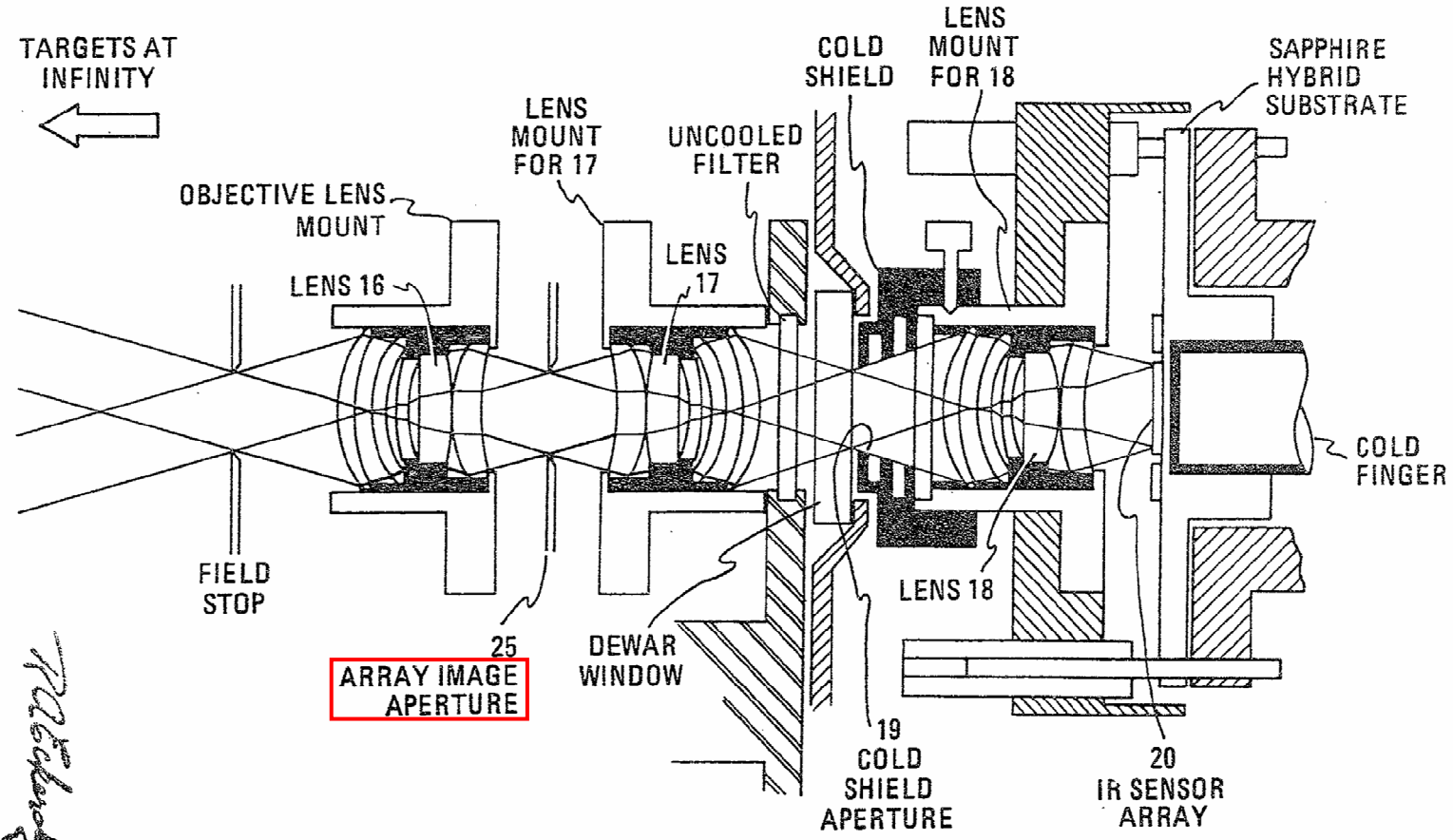
Thèse en cours (Florence De La Barrière)

Bilan des réalisations



Concepts étrangers

Brevet “Optical system for wide angle IR imager” US Patent 4783593 (1991)



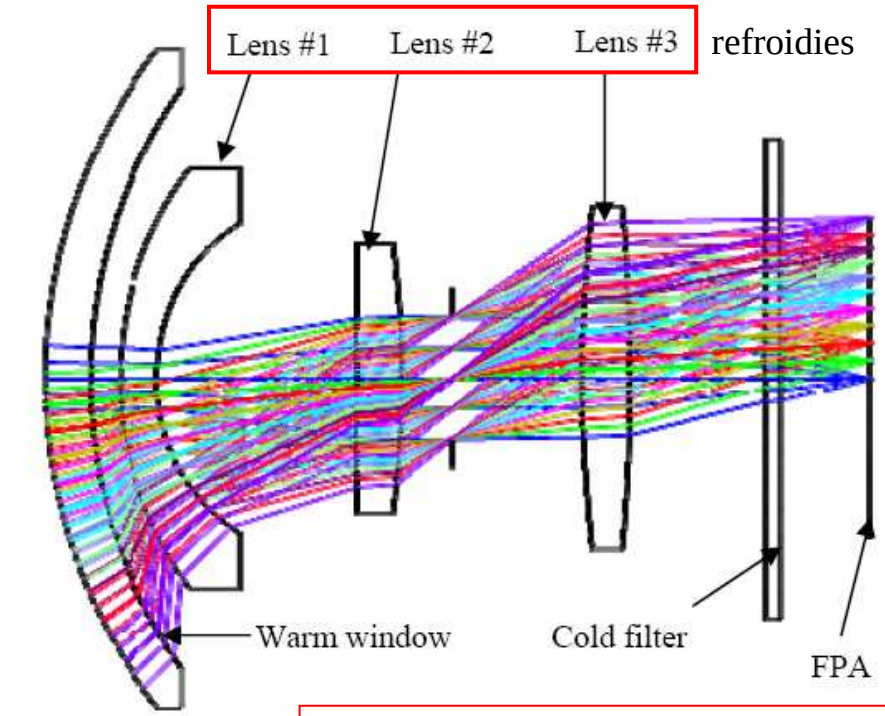
PATENT AGENT

1288623

6-6

Concepts étrangers

Concept présenté à SPIE Orlando 2010



MCT bispectral 480×384 pas 20µm
FOV=105°×135°
N=2
Masse supplémentaire à refroidir : autour de 5g

Brevet ONERA/Institut Optique antérieur à ce brevet !

D. Oster, M. Singer, A. Koifman, T. Markovitz "INFRA-RED IMAGER", U.S. Provisional Patent Application No. 61/249,320 (SCD)