# Note importante relative au droit d'auteur :

Ce diaporama constitue le support de ma soutenance de thèse de doctorat datée du 21 mai 2008 et intitulée « Conception d'un modèle de visibilité d'étoile à l'oeil nu. Application à l'identification des décans égyptiens ».

Le contenu de ce diaporama est protégé par les droits d'auteur. Le téléchargement de ce diaporama n'est autorisé qu'à des fins de consultation privée. La reproduction ainsi que la diffusion de tout ou partie du contenu de ce diaporama sans l'autorisation préalable et écrite de son auteur sont strictement interdites.

Pour toute information complémentaire,
merci de contacter Karine Gadré :

karine.gadre@ast.obs-mip.fr

# Soutenance de thèse de Karine Gadré



Laboratoire d'Astrophysique de Toulouse-Tarbes

École Doctorale des Sciences de l'Univers, de l'Environnement et de l'Espace

# Introduction au contexte culturel (1/3)



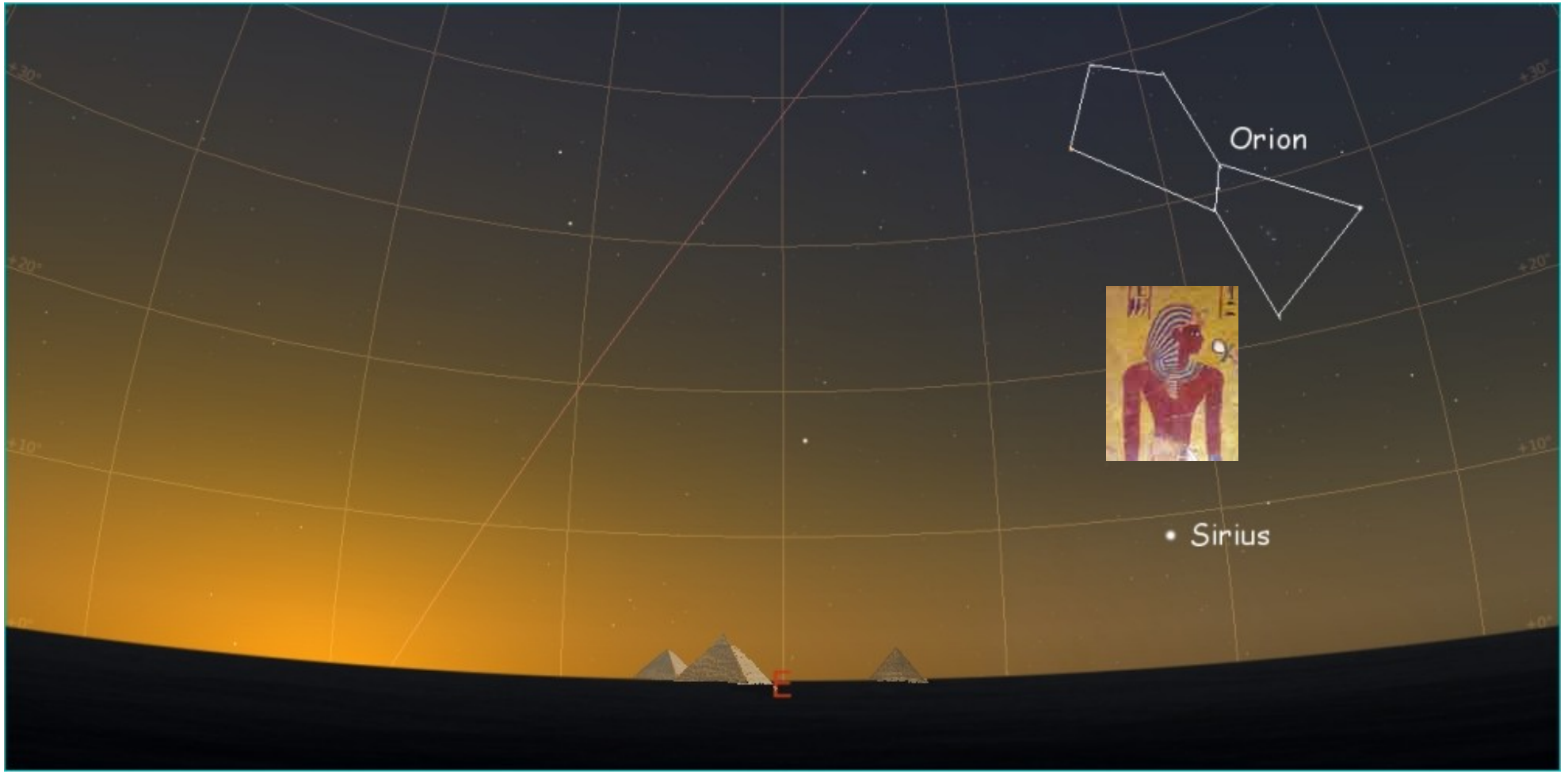
Pyramide d'*Ounas* à Saqqarah

**Période d'invisibilité annuelle : 70 jours**



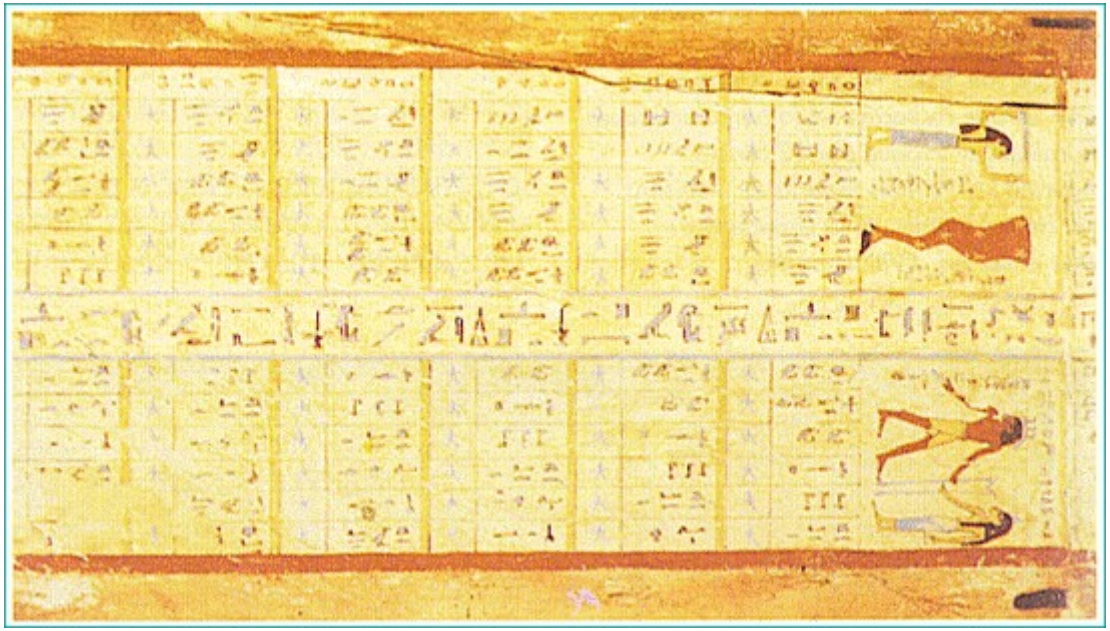
Extrait des
*Textes des Pyramides*

# Introduction au contexte culturel (2/3)

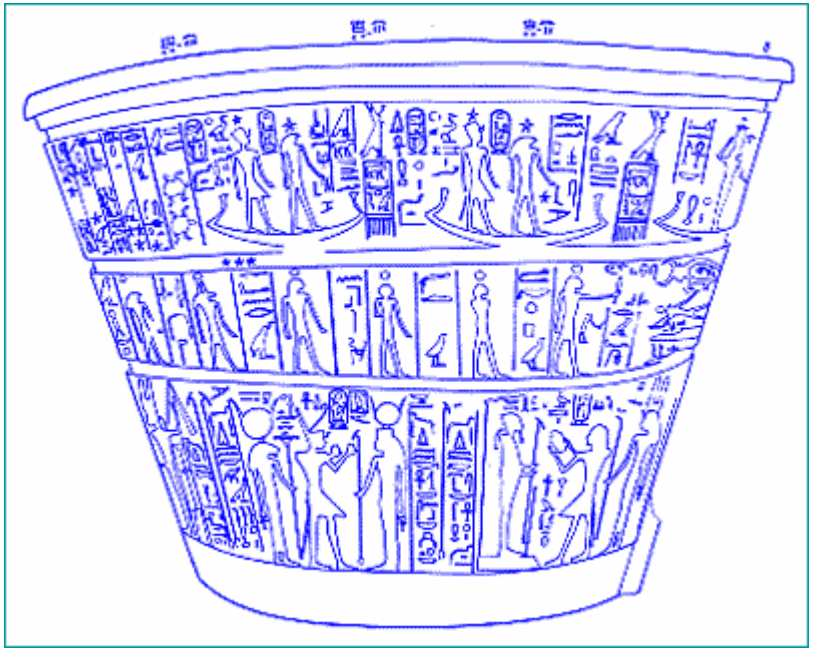



Le lever héliaque de Sirius

# Introduction au contexte culturel (3/3)



**Horloge stellaire** peinte sur l'intérieur du couvercle du sarcophage de *Idy* (Assiout)



**Liste d'étoiles** gravée sur les pourtours de la clepsydre de Karnak

(Gadré et Roques, 2008b)

# Conception d'un modèle de visibilité d'étoile à l'oeil nu. Application à l'identification des décans égyptiens



# Objectifs scientifiques

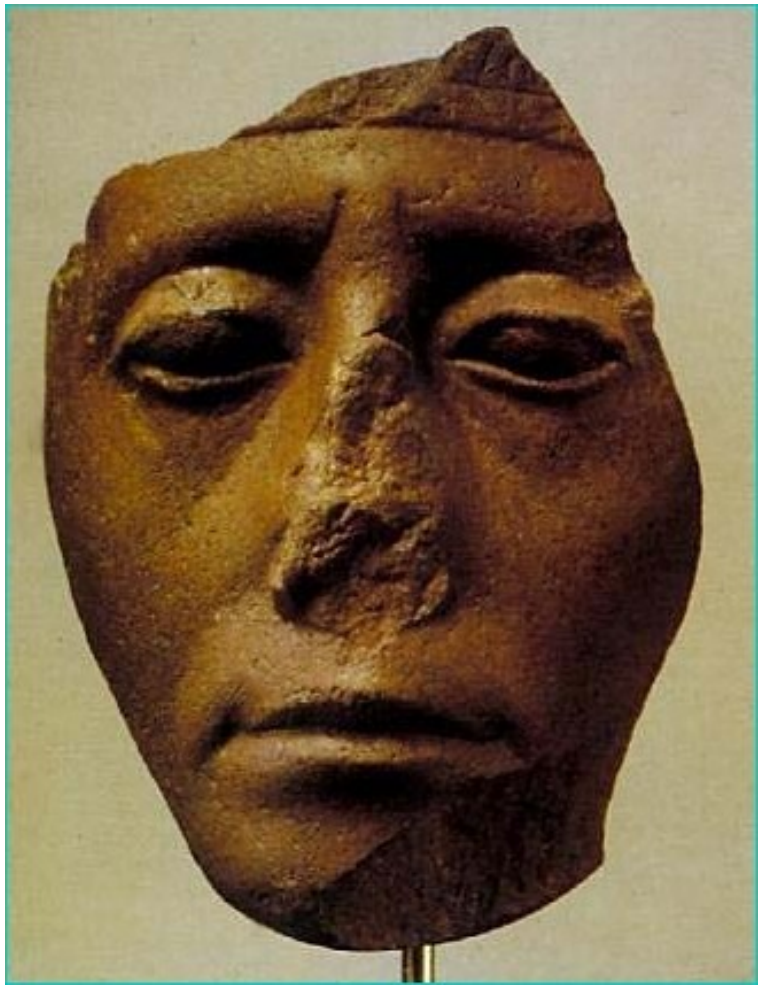
1. Dresser la **cartographie** du ciel de l'Égypte ancienne

2. Connaître le **principe de fonctionnement** des horloges stellaires

3. Estimer **le lieu et l'époque de conception** des horloges stellaires et des listes d'étoiles

4. Expliquer la **variabilité** de la durée des heures de nuit égyptienne

5. Affiner l'**époque de règne** de plusieurs pharaons



*Sésostris III*
(vers 1878 – 1842 BC)

# Principe de la démarche adoptée

1. Dresser une **liste des vestiges** archéologiques

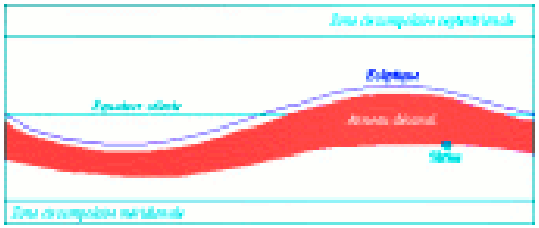
2. Déterminer les **conditions** spatiales et temporelles **d'observation** des étoiles décanales

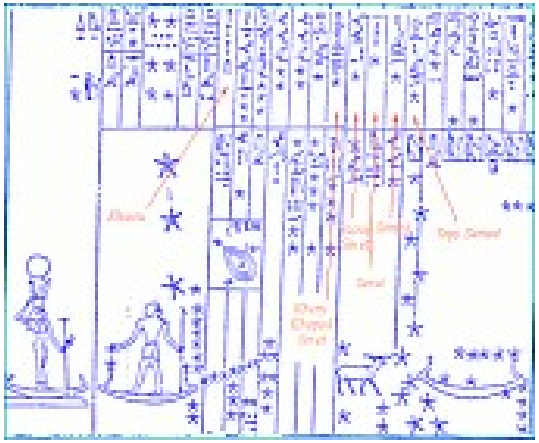
3. Concevoir un **modèle de visibilité** d'étoile à l'oeil nu dans le ciel de l'Égypte ancienne

4. Appliquer, aux résultats fournis par le modèle, divers **critères** astronomiques et égyptologiques

5. Examiner la **validité** des identifications proposées

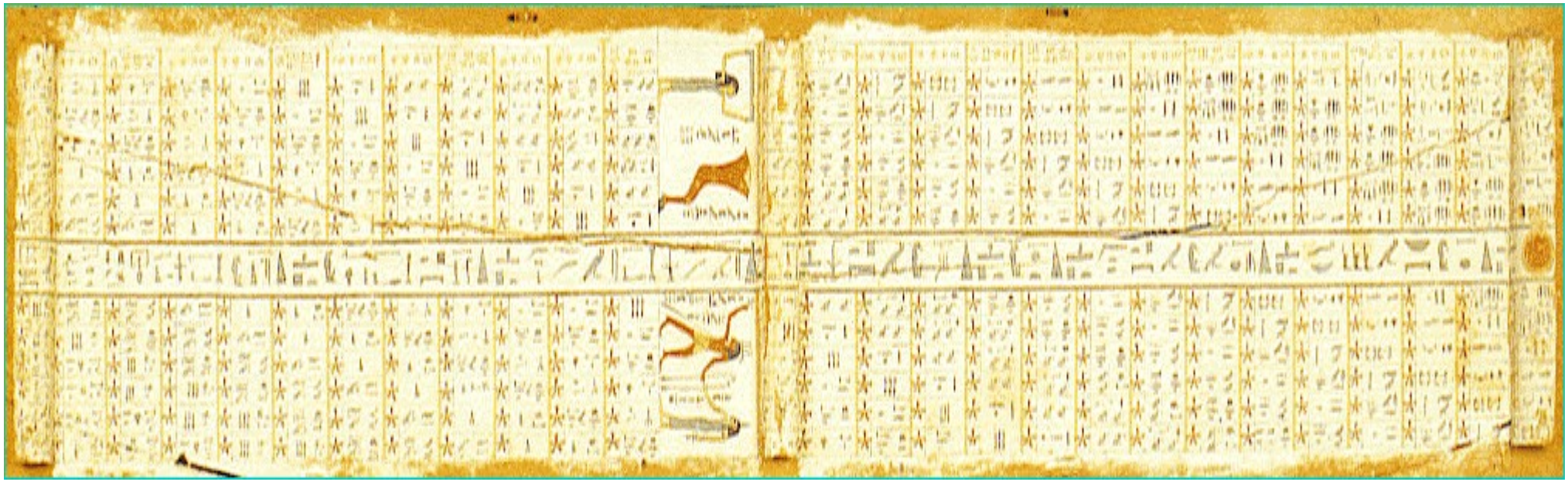






# Liste des vestiges archéologiques (1/7)

- dix-neuf horloges stellaires peintes sur l'intérieur du couvercle de sarcophages (Assiout – Thèbes – Assouan) + une horloge au plafond de l'Osiréion (Abydos)



Intérieur du couvercle du sarcophage de *Nekhet* (Assiout)

# Liste des vestiges archéologiques (2/7)

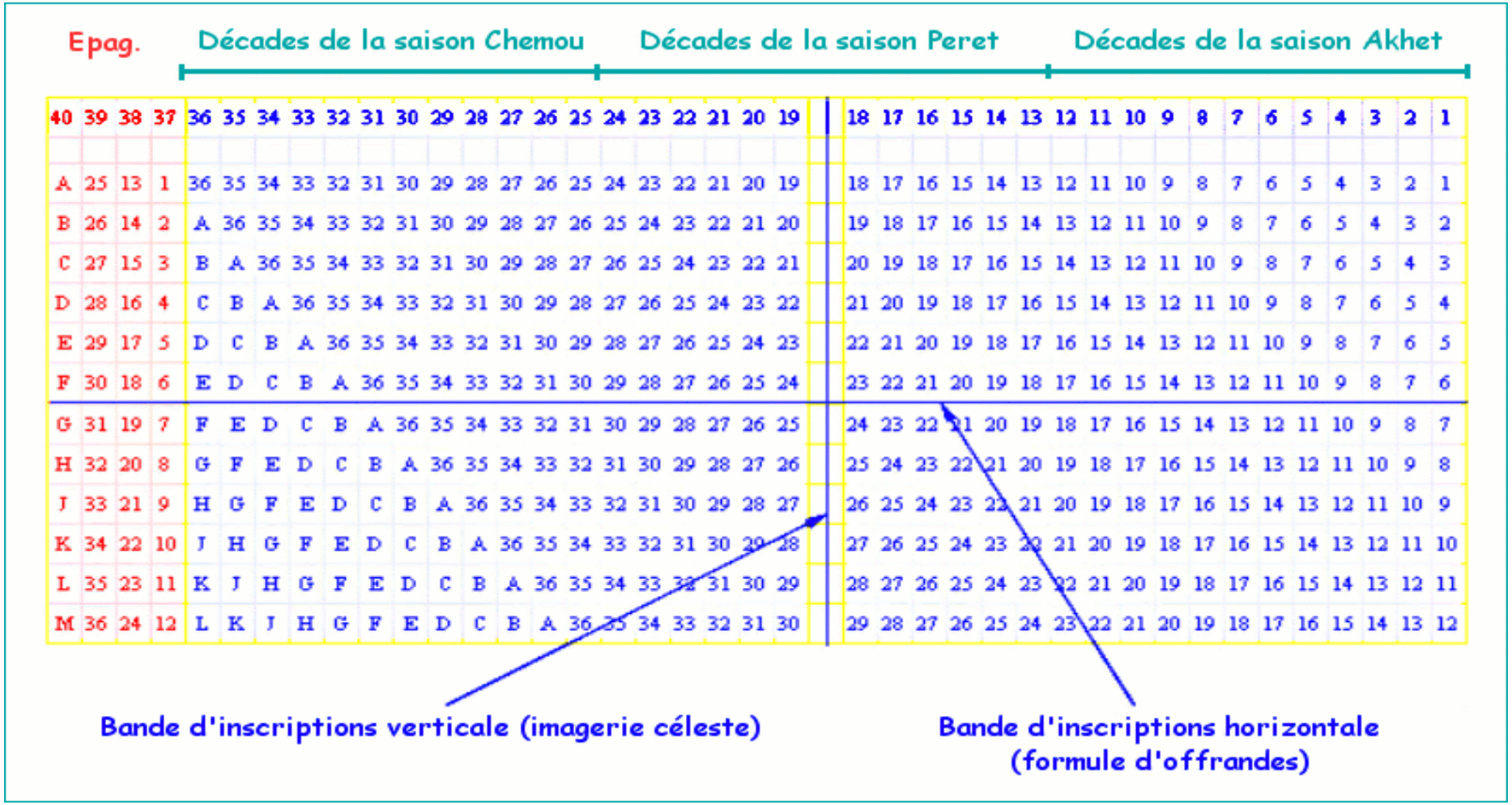



Schéma d'une horloge stellaire théorique

(Gadré et Roques, 2008c )

# Liste des vestiges archéologiques (3/7)

➢ quatre-vingt listes d'étoiles sur la surface extérieure de clepsydres,

au plafond de temples et de tombes disséminés le long de la Vallée du Nil :

- listes de type ***Senenmout***
- listes de type ***Séthi IA***
- listes de type ***Séthi IB***
- listes de type ***Séthi IC***

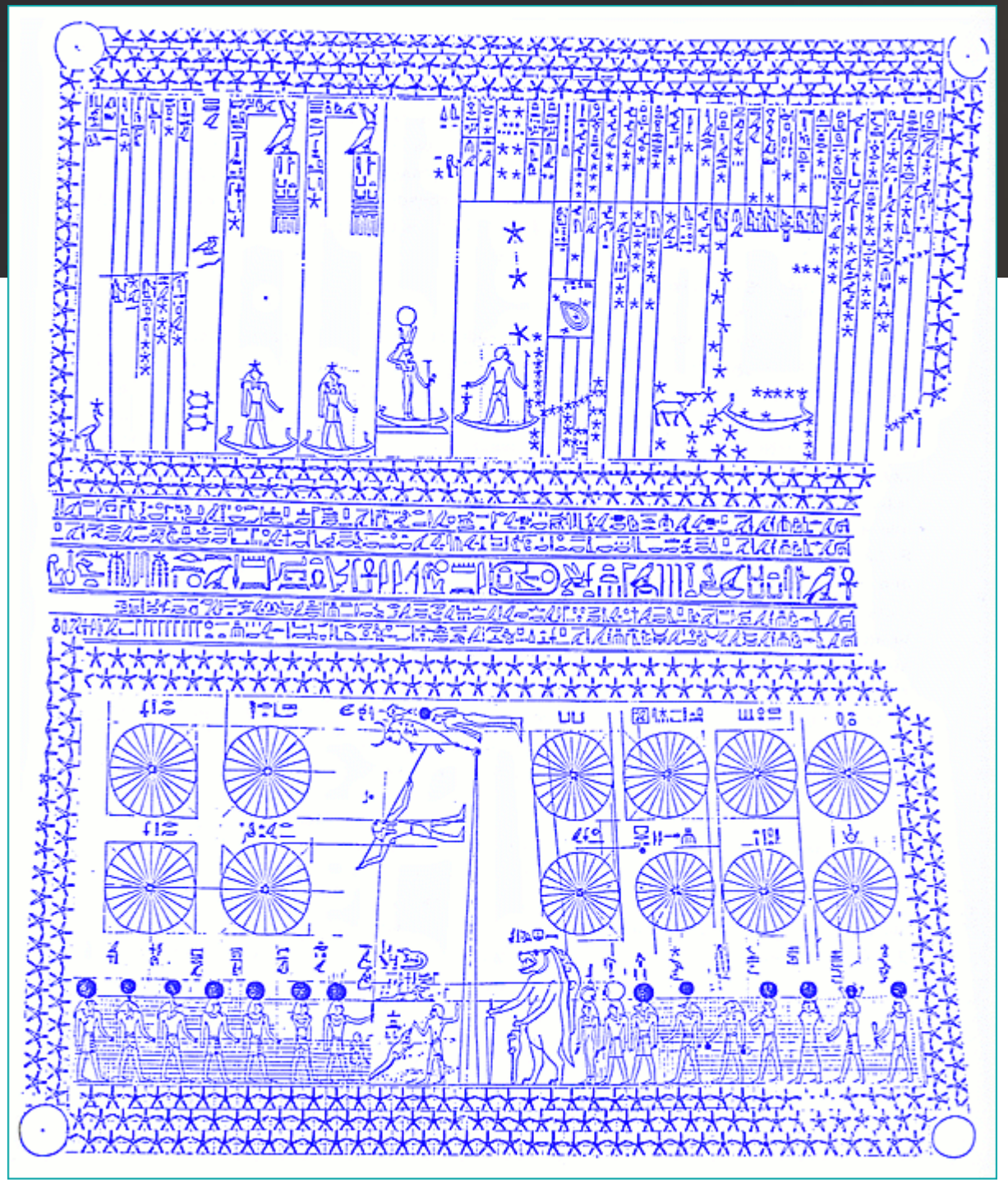


Plafond de la tombe de *Ramsès VI*
(Thèbes Ouest)

(Gadré et Roques, 2008e )

# Liste des vestiges archéologiques (4/7)

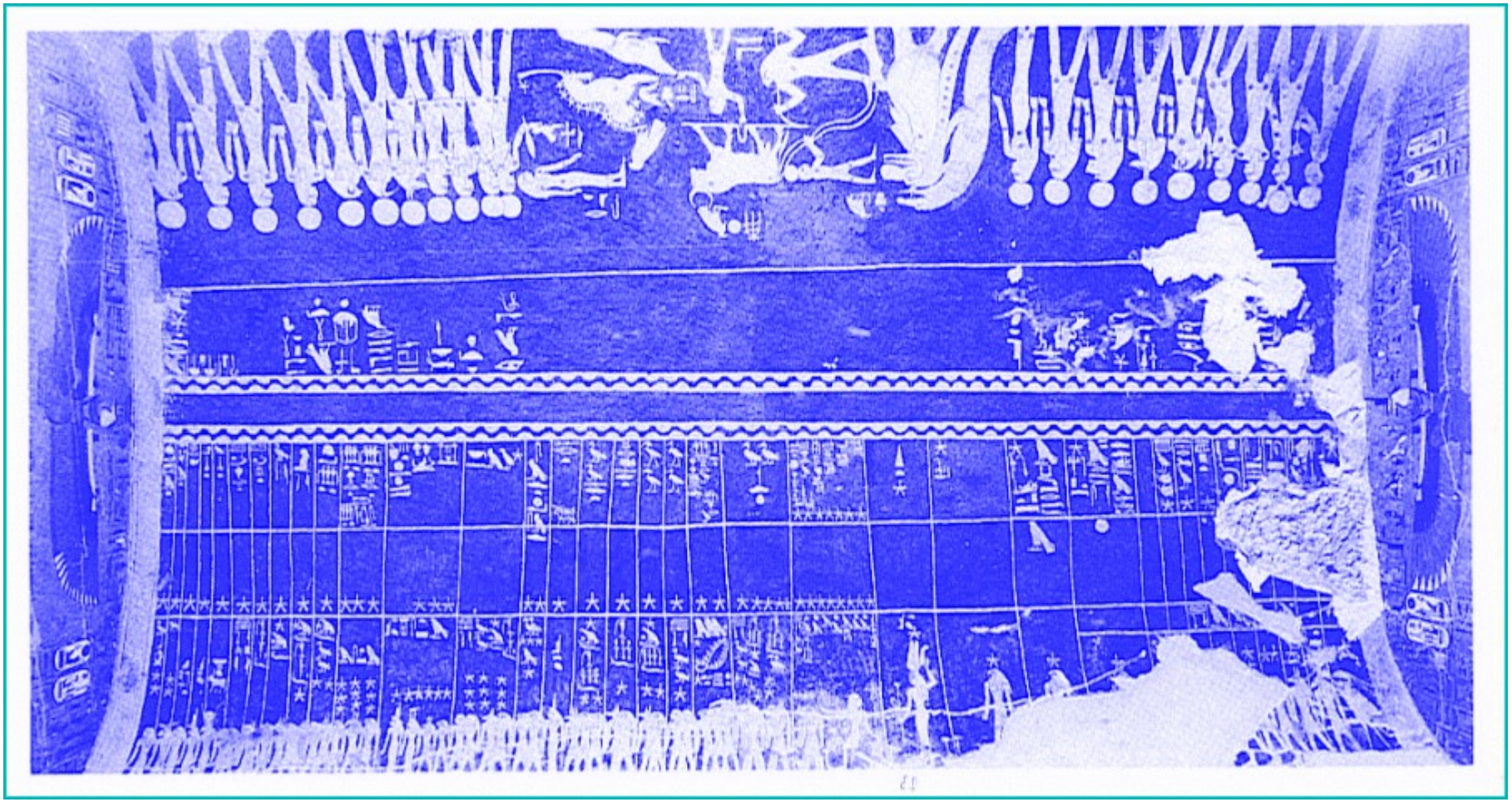
Prototype des listes de type *Senenmout*



Plafond de la tombe de *Senenmout* (Deir el-Bahari)

# Liste des vestiges archéologiques (5/7)

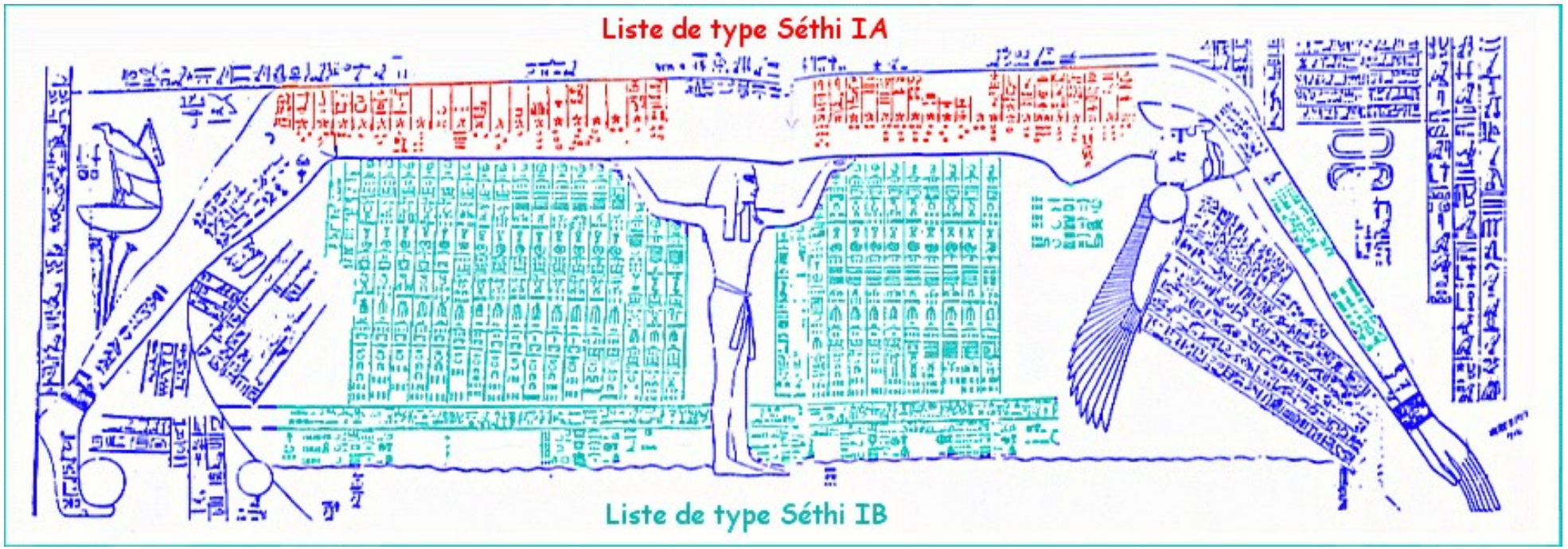
## Prototype des listes de type *Séthi IC*



Plafond de la tombe de *Séthi I* (Thèbes Ouest)

# Liste des vestiges archéologiques (6/7)

## Prototype des listes de types *Séthi IA* et *Séthi IB*

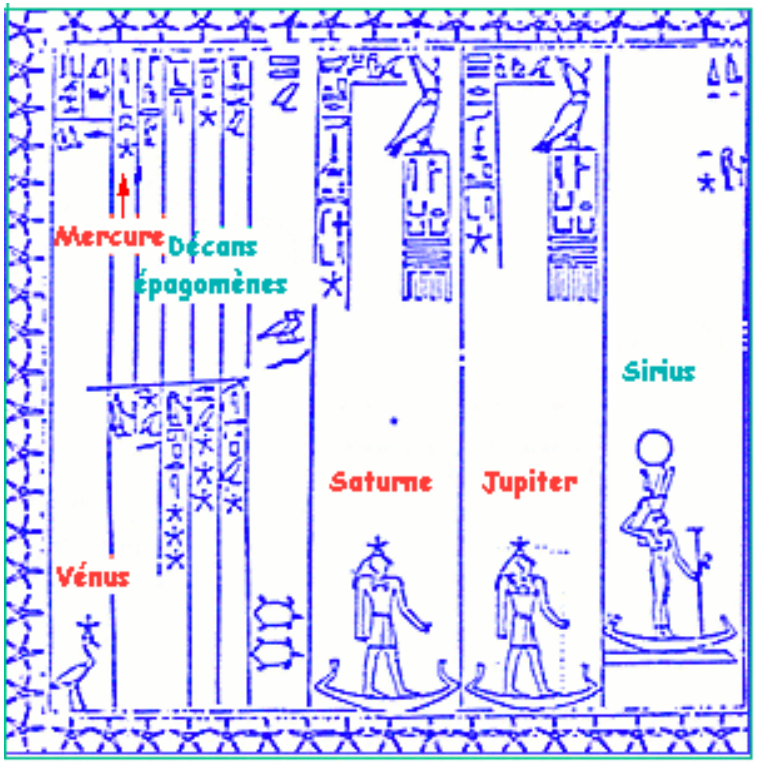



Plafond du cénotaphe de *Séthi I* (Abydos)

# Liste des vestiges archéologiques (7/7)

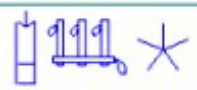
➢ Au total, **cent listes d'étoiles** dont les arrangements stellaires suggèrent de les répartir en six types de listes :

- **les listes de type *ṯ m3 t***
- **les listes de type *knmt***
- **les listes de type *Senenmout***
- **les listes de type *Séthi IC***
- **les listes de type *Séthi IA***
- **les listes de type *Séthi IB***




Les noms des planètes figurent aux côtés de ceux des décans au plafond de la tombe de *Senenmout*

# Le catalogue des décans égyptiens

| Numéro | Désignation hiéroglyphique | Translittération | Signification de l'appellation hiéroglyphique |
|---|---|---|---|
| 28a |  | *msḏr s3ḥ* | L'oreille de Sah |
| 28b |  | *iwn s3ḥ* | La colonne (vertébrale) de Sah |
| 29a |  | *wꜥrt ḫrt s3ḥ* | La jambe inférieure de Sah |
| 29b |  | *wꜥrt ḥrt s3ḥ* | La jambe supérieure de Sah |
| 30 |  | *tpy–ꜥspd* | Le prédécesseur de Soped |
| 31 |  | *spd* | Soped |
| 31a |  | *tpy–ꜥknmt* | Le prédécesseur de Kenmet |
| 31b |  | *štwy* | Les deux tortues |

Extrait du catalogue des 90 décans égyptiens

(Gadré et Roques, 2008a )

# Conditions d'observation des décans (1/4)

| Datation déduite de la position occupée par | Listes de type *ṯm3t* | Listes de type *knmt* | Listes de types *Senenmout*, *Séthi IC* et *Séthi IA* | Listes de type *Séthi IB* |
|---|---|---|---|---|
| Sirius (31) | 2101 – 2022 BC | | 1821 – 1782 BC | 1881 – 1842 BC |
| *ṯm3t* (1 et 2) | | 1941 – 1862 BC | 1901 – 1862 BC | 1881 – 1842 BC |
| | Dynastie XI | Dynastie XII | | |

Époques de conception des prototypes des six types de listes d'étoiles décanales

(Gadré et Roques, 2008d)

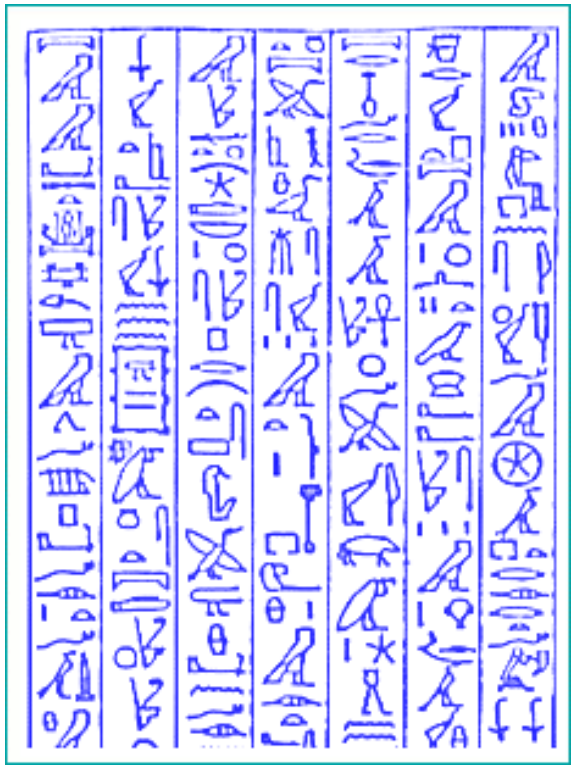
# Conditions d'observation des décans (2/4)

## Concernant nos propositions de datation :

- **Confirmation archéologique** de la datation des prototypes des listes de types *t*, *m3t* et *knmt*

- **Confirmation historique** de la datation du prototype des listes de type *Séthi IB*

- **Incertitude** sur la datation des prototypes des listes de types *Senenmout*, *Séthi IC* et *Séthi IA*



Fragment du
*Papyrus Carlsberg I*

(Gadré et Roques, 2008d et 2008e )

# Conditions d'observation des décans (3/4)

| Epoque considérée | Date de lever héliaque de Sirius (*II Peret 21*) | Site d'observation |
|---|---|---|
| 2101 - 2098 BC | 19 juillet | Alexandrie (31°) |
| 2097 - 2094 BC | 18 juillet | Memphis (30°) |
| 2093 - 2090 BC | 17 juillet | |
| 2089 - 2086 BC | 16 juillet | |
| 2085 - 2082 BC | 15 juillet | Assiout (27°) |
| 2081 - 2078 BC | 14 juillet | |
| 2077 - 2074 BC | 13 juillet | Thèbes (25°) |
| 2073 - 2070 BC | 12 juillet | |
| 2069 - 2066 BC | 11 juillet | Assouan (24°) |
| 2065 - 2062 BC | 10 juillet | |

Variation de la date de lever héliaque de Sirius avec la latitude du site d'observation

(Gadré et Roques, 2008e )

# Conditions d'observation des décans (4/4)

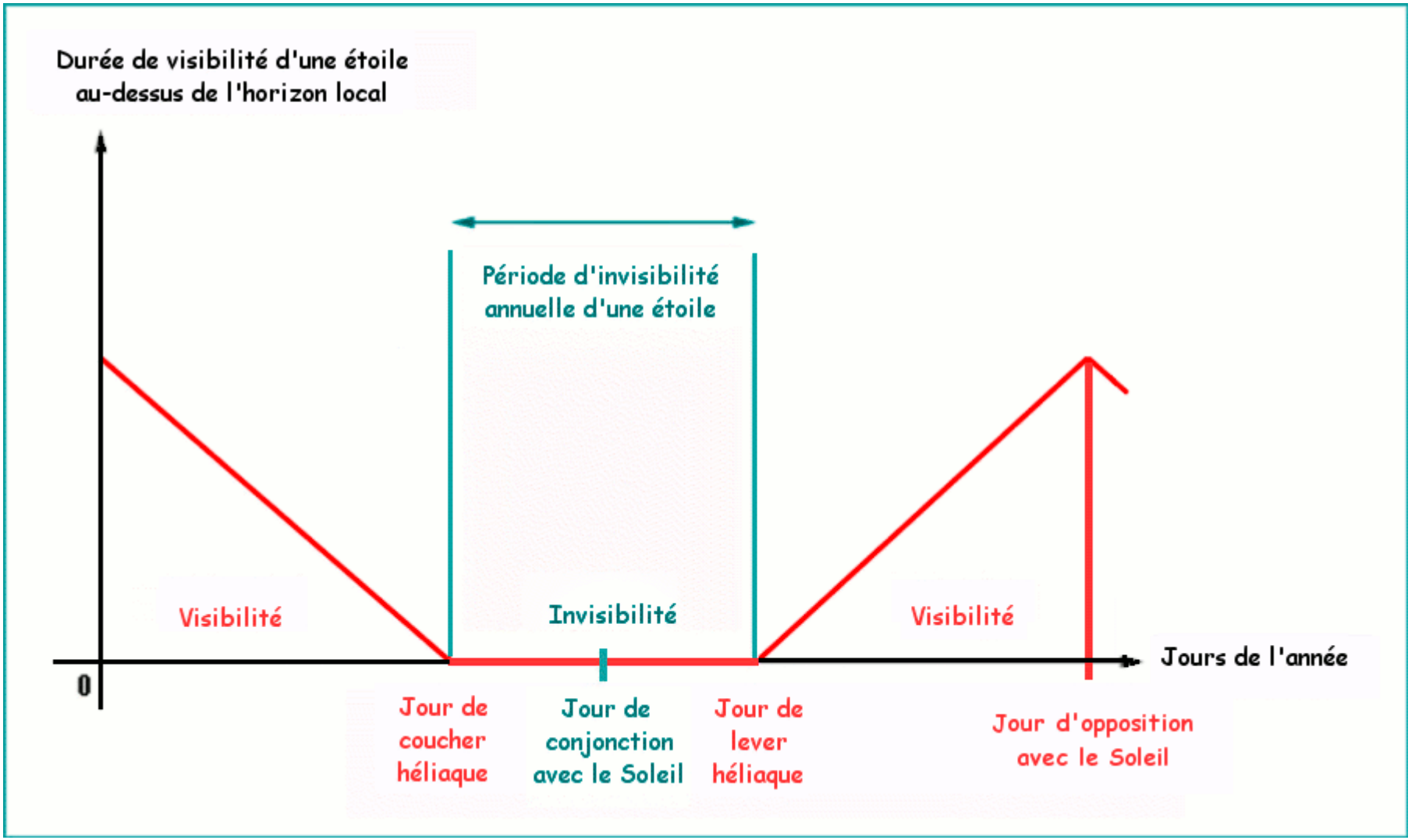
Période d'invisibilité annuelle d'une étoile = f ($m_{reel}$, $\beta$, $\varphi$)

Période d'invisibilité annuelle de Sirius = f ($\varphi$)



L'Égypte vue du ciel

# Période d'invisibilité annuelle d'une étoile (1/2)



# Période d'invisibilité annuelle d'une étoile (2/2)

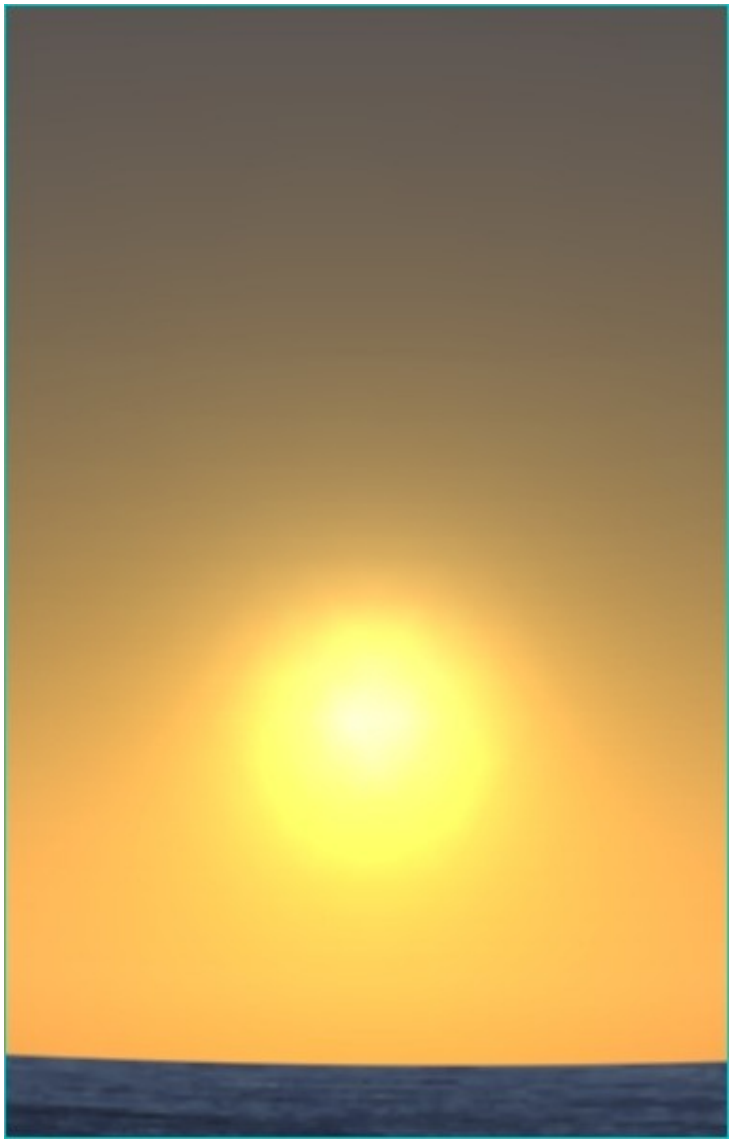
1. constituer un **catalogue d'étoiles**

2. **localiser les étoiles** sur la voûte céleste locale à l'époque historique considérée

3. **tester la visibilité** de chaque étoile non circumpolaire en son jour de conjonction avec le Soleil

4. **déterminer les dates de coucher et de lever héliaques** de chaque étoile invisible en son jour de conjonction avec le Soleil

(Gadré et Roques, 2008e )



# Constitution du catalogue d'étoiles

Mission *Hipparcos* pilotée par l'ESA entre 1989 et 1993 :

- **constitution du catalogue *Hipparcos* :**
  - magnitude apparente
  - indice de couleur
  - parallaxe
  - coordonnées équatoriales célestes
  - mouvements propres, etc.

dans le système ICRS

- **5041 étoiles en théorie visibles à l'oeil nu**



Champ d'étoiles centré sur Sirius et reconstitué grâce la mission *Hipparcos*

# Reconstitution de la voûte céleste locale (1/5)

Prise en compte de divers paramètres astrométriques :

- le **mouvement de chaque étoile**
- les **effets de parallaxe, d'aberration et de déviation gravitationnelle**
- le **mouvement de précession-nutation** et le **mouvement polaire** qui animent l'axe de rotation de la Terre



*Edmund Halley* (1656 - 1742)

- précision recherchée

# Reconstitution de la voûte céleste locale (2/5)

Mouvement d'une étoile =

mouvement propre + vitesse radiale

$$\alpha_{mp} = \frac{d\alpha_1}{dt} \quad et \quad \delta_{mp} = \frac{d\delta_1}{dt}$$

$$V_0 = c\,\frac{\Delta\lambda}{\lambda_0}$$

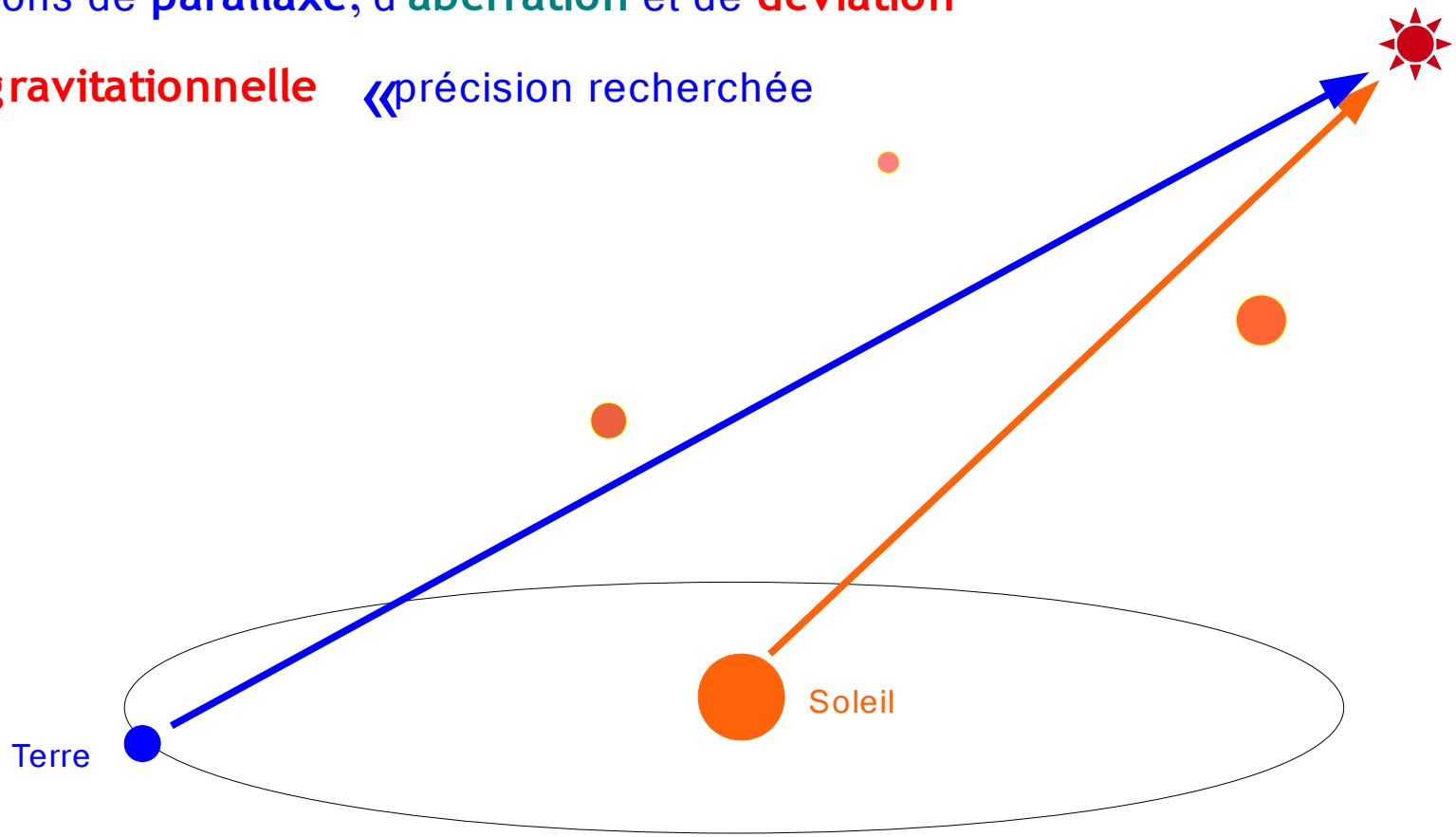
incertitudes sur les valeurs de mouvement propre « précision recherchée

variations de mouvement propre « précision recherchée

# Reconstitution de la voûte céleste locale (3/5)

corrections de **parallaxe**, d'**aberration** et de **déviation**

**gravitationnelle** «précision recherchée



# Reconstitution de la voûte céleste locale (4/5)

objets du système solaire (Soleil, planètes, etc.)

+ dynamique des constituants de la Terre (noyau, océans, etc.)

↓

variations de l'axe de rotation de la Terre

et de l'inclinaison du plan de

son orbite autour du Soleil

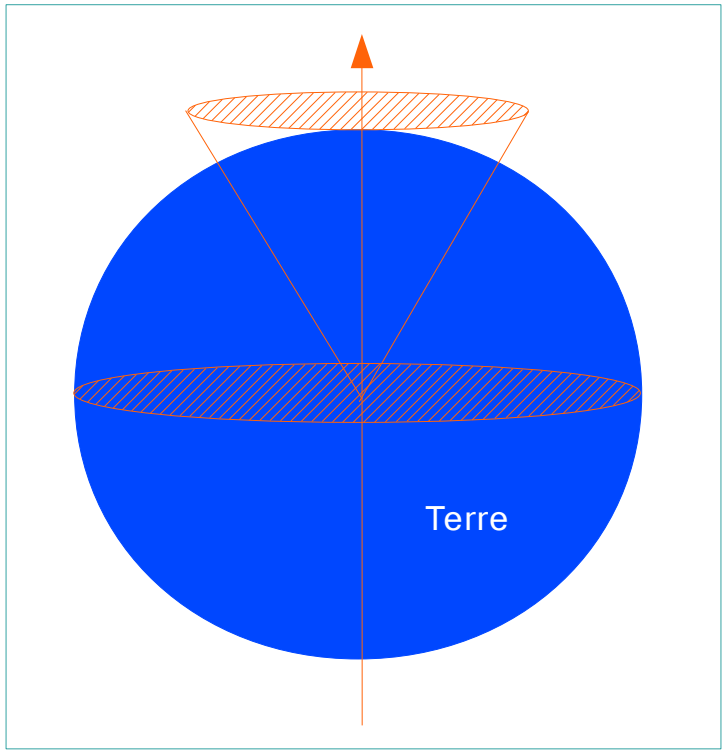
↓

modifications des coordonnées équatoriales

célestes des étoiles

effets de la nutation et du mouvement

polaire « précision recherchée




Précession de l'axe du monde

# Reconstitution de la voûte céleste locale (5/5)

## Modèle de précession utilisé :

approche classique (Lieske et al., 1977)

+ prise en compte des observations et développements récents

- modèle de Simon et al. (1994) + données publiées par l'IERS (1992)

- développements polynomiaux des angles de précession $\theta$, $\zeta$ et z

- **coordonnées équatoriales célestes des étoiles :**

$$\sin(\delta_{2m}) = \sin(\theta)\cos(\delta_{1mp})\cos(\alpha_{1mp}+\zeta) + \cos(\theta)\sin(\delta_{1mp})$$

$$\cos(\alpha_{2m}-z)\cos(\delta_{2m}) = \cos(\theta)\cos(\delta_{1mp})\cos(\alpha_{1mp}+\zeta) - \sin(\theta)\sin(\delta_{1mp})$$

$$\sin(\alpha_{2m}-z)\cos(\delta_{2m}) = \cos(\delta_{1mp})\sin(\alpha_{1mp}+\zeta)$$

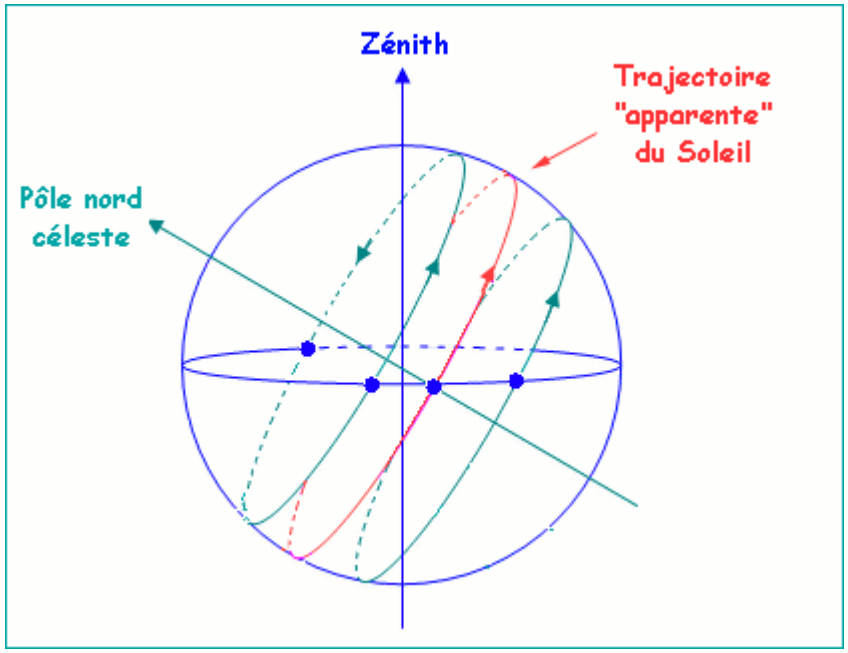
# Restriction de l'échantillon d'étoiles candidates

➢ **Restriction aux étoiles non circumpolaires :**

$$\varphi - 90° < \delta_2 < 90° - \varphi$$

➢ **Restriction aux étoiles invisibles en leur jour de conjonction avec le Soleil :**

$$\lambda_{02m} = (\lambda_{T2m} + 180°) + 2e_{T2} \sin(\lambda_{T2m} - \varpi_{T2m})$$




La visibilité d'une étoile en son jour de conjonction avec le Soleil dépend essentiellement de sa déclinaison

# Seuil de visibilité d'une étoile à l'oeil nu (1/4)

Une étoile de magnitude $m_{reel}$ est visible à l'oeil nu si :

$$m_{app} < m_{seuil}$$

$$m_{app} = m_{reel} + 2.5 \log(F_c F_e F_r)$$

facteurs optiques

$$m_{seuil} = -16.57 - 2.5 \log(I_{seuil} F_c F_e F_r)$$

$B_{ciel}$

# Seuil de visibilité d'une étoile à l'oeil nu (2/4)

$$m_{seuil} = -16.57 - 2.5 \log(I_{seuil} F_c F_e F_r)$$

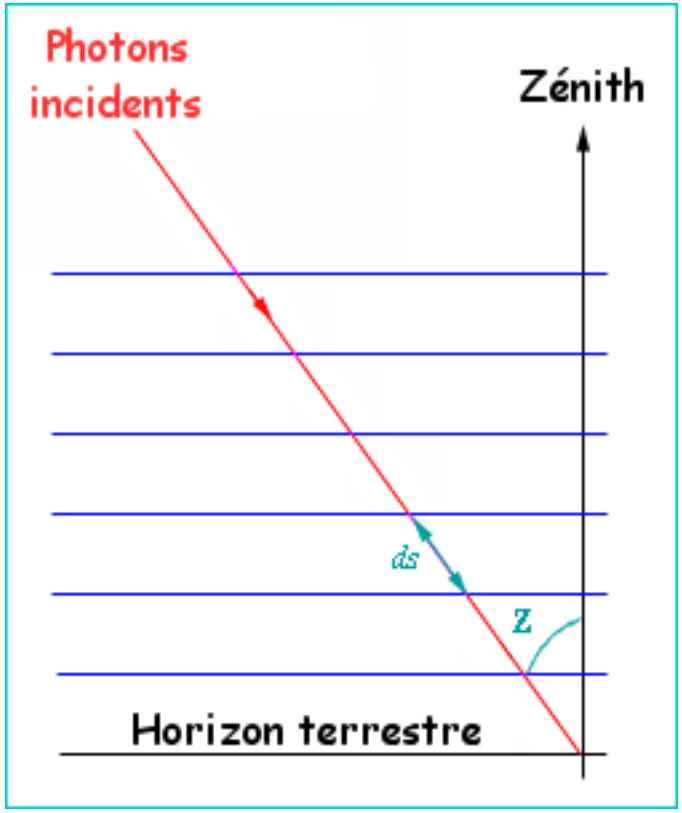
## Extinction atmosphérique totale :

$$K.X = \kappa_g X_g + \kappa_a X_a + \kappa_o X_o$$

$$K.X = f(\varphi, alt, hum, Z, \alpha_0)$$

Augmentation de la magnitude apparente de chaque étoile :

$$\Delta m = 1.086\ K.X$$




Extinction atmosphérique

# Seuil de visibilité d'une étoile à l'oeil nu (3/4)

$$m_{seuil} = -16.57 - 2.5 \log(I_{seuil} F_c F_e F_r)$$

Brillance du ciel :

$$B_{ciel} = B_{nuit} + B_{crep}$$

$$B_{ciel} = f(Z, Z_0, h_0, K)$$

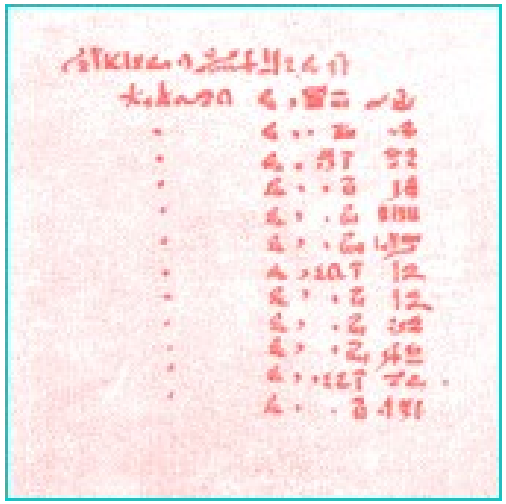


# Seuil de visibilité d'une étoile à l'oeil nu (4/4)

$m_{seuil} = -16.57 - 2.5 \log(I_{seuil} F_c F_e F_r)$ → *Rapport de Snellen*

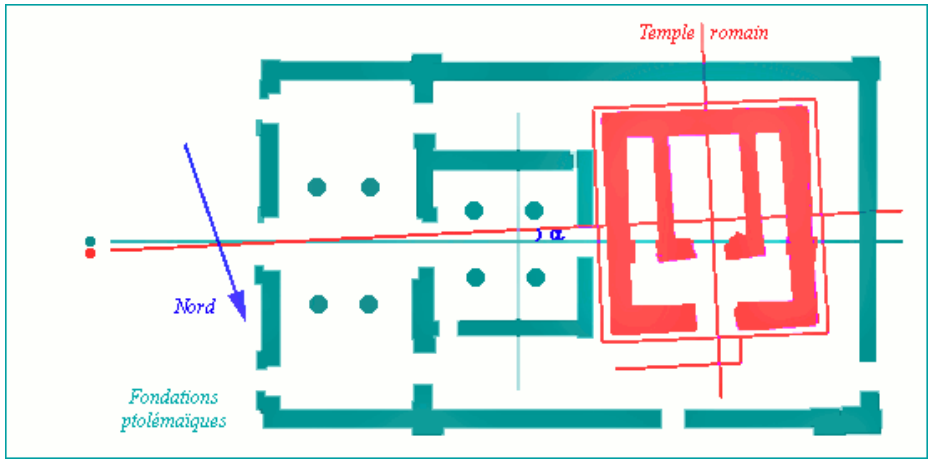


*Papyrus el-Lahoun*



*Calendrier Ebers*

Temple d'Hathor à Dendérah




➢ nouvelle datation du début du règne de trois pharaons (Gadré, 2004 )

# Test de visibilité d'une étoile

$$m_{seuil} = -16.57 - 2.5 \log(I_{seuil} F_c F_e F_r)$$

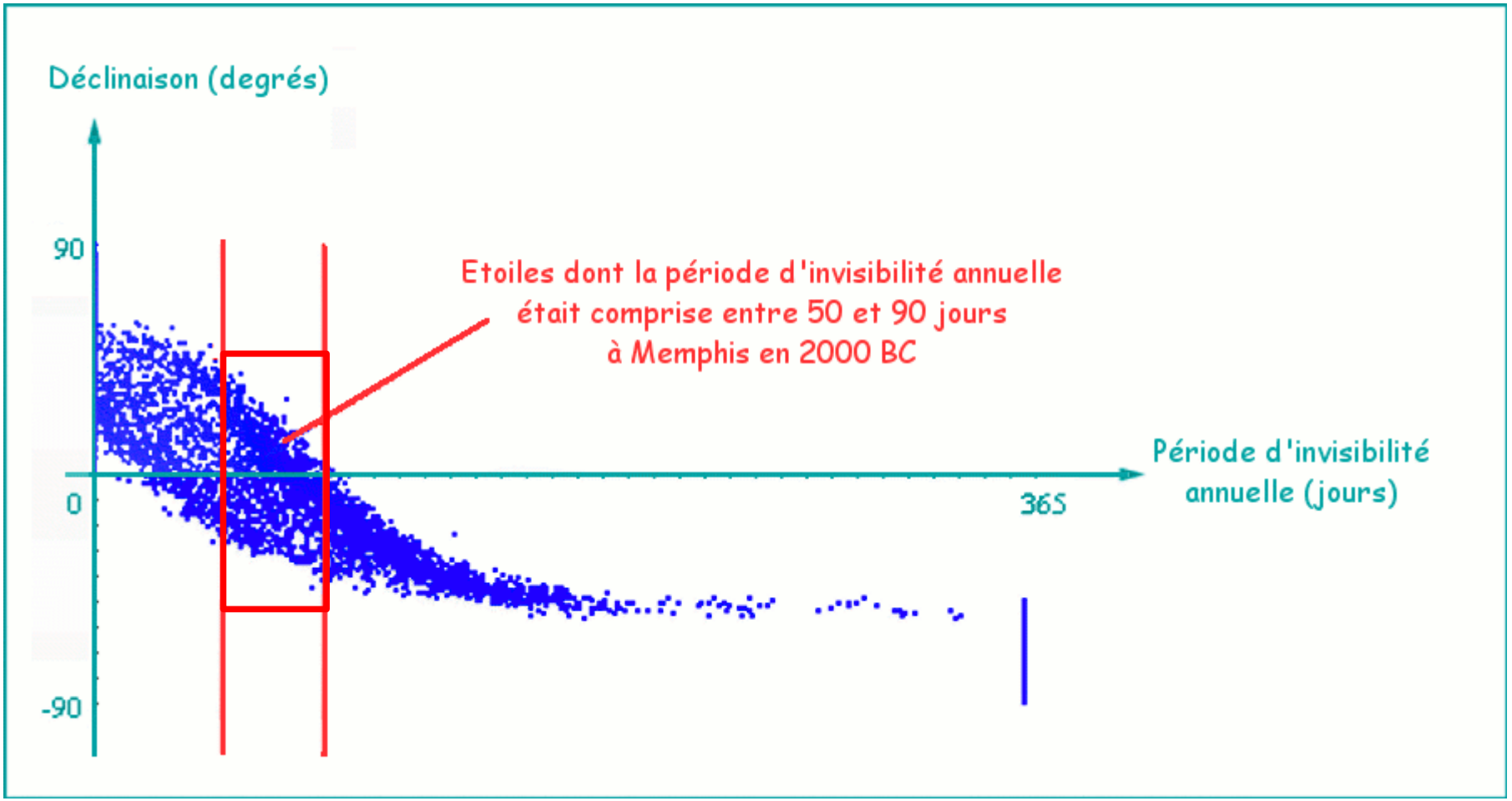
Étoile invisible en son jour de conjonction avec le Soleil

Date de coucher héliaque

Date de lever héliaque

**Période d'invisibilité annuelle**

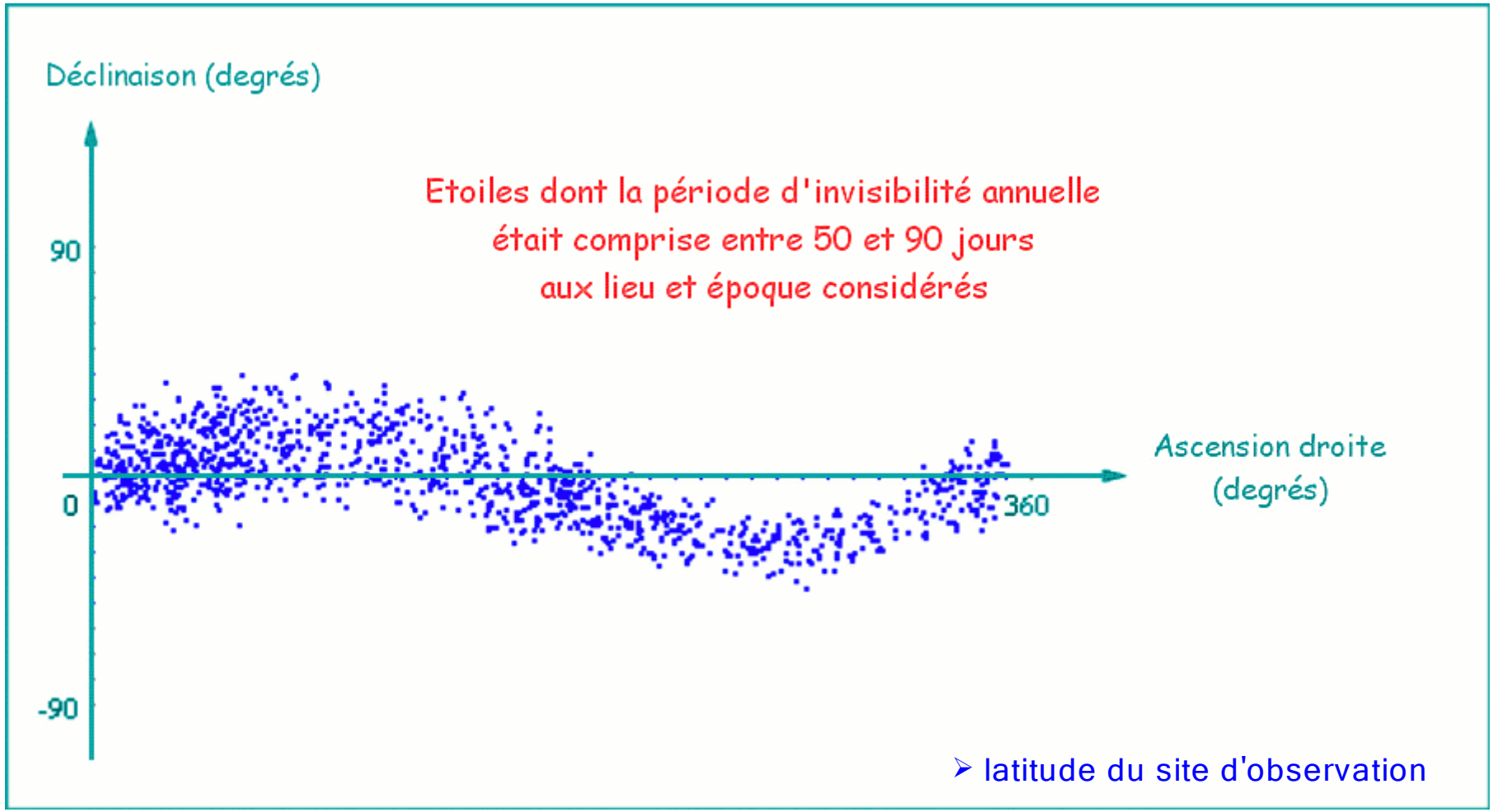
# Échantillon d'étoiles candidates (1/2)




Relation entre la période d'invisibilité annuelle des étoiles et leur déclinaison

(Gadré et Roques, 2008e )

# Échantillon d'étoiles candidates (2/2)




Localisation de l'anneau décanal

(Gadré et Roques, 2008e )

# Critères d'identification des décans (1/2)

1166 étoiles invisibles 70 jours par an (Memphis, vers 2000 BC )

Succession des apparitions
à l'est et des culminations

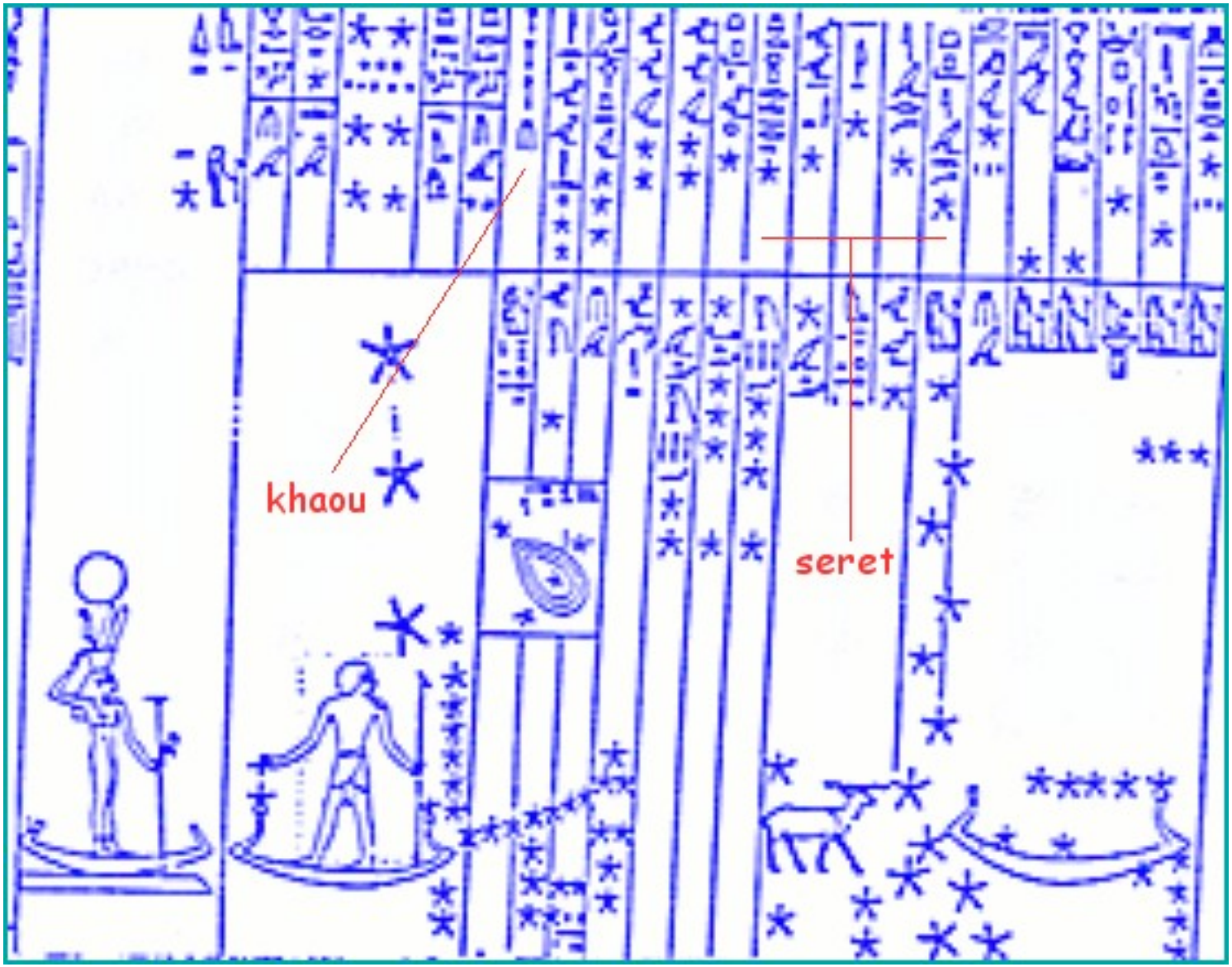
Comparaison avec les six
prototypes de listes d'étoiles

échantillon d'étoiles candidates à chacun des 90 décans

Application de critères astronomiques
et égyptologiques

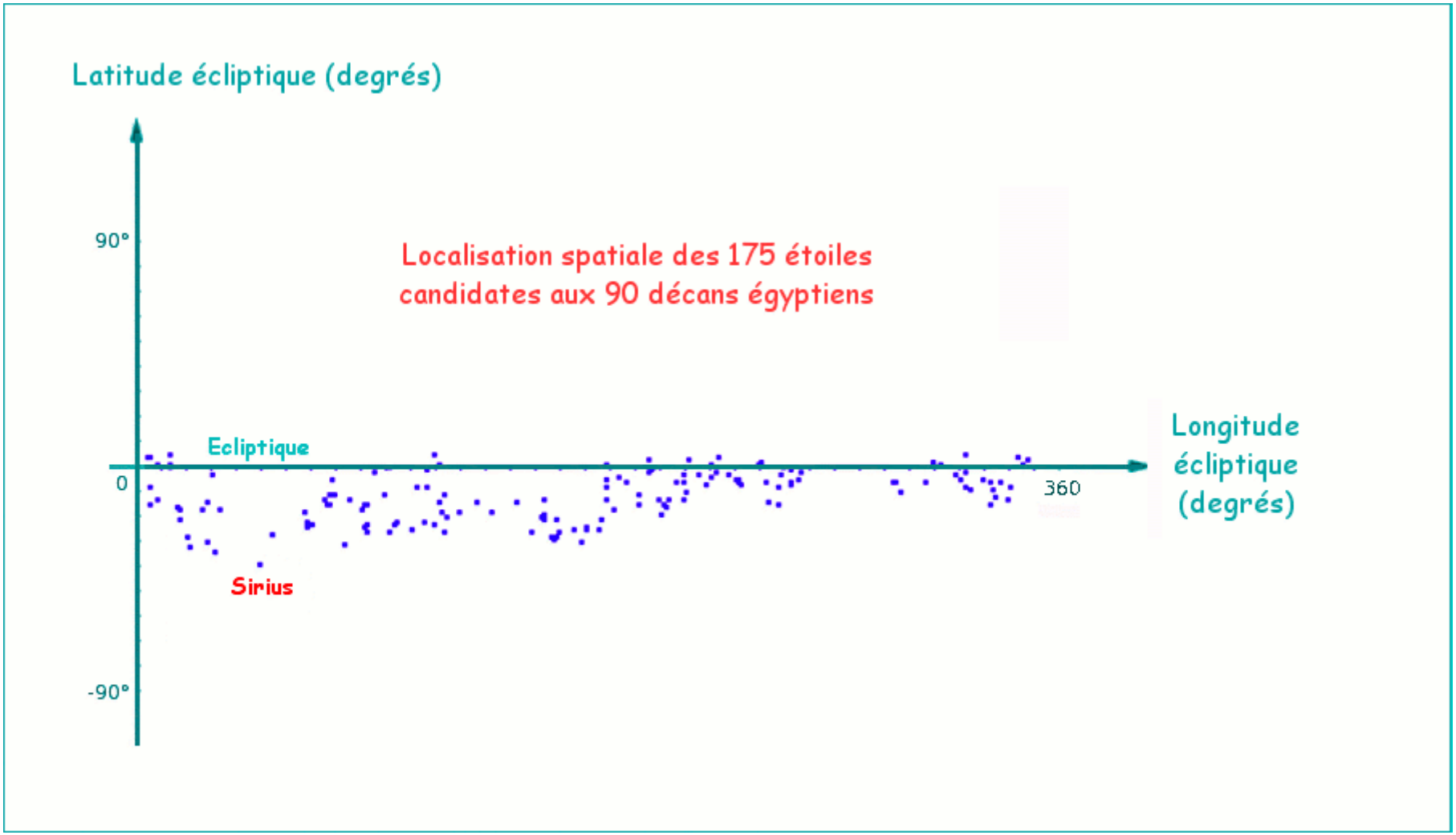
**meilleure(s) candidate(s) à chaque décan**

# Critères d'identification des décans (2/2)




Extrait du plafond de la tombe de *Senenmout* (Deir el-Bahari)

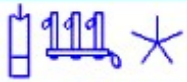
# Identification des décans égyptiens (1/3)




Localisation spatiale des 175 étoiles candidates aux 90 décans égyptiens

(Gadré et Roques, 2008e )

# Identification des décans égyptiens (2/3)

| Numéro | Désignation hiéroglyphique | Translittération | Etoile(s) associée(s) |
|---|---|---|---|
| 28a |  | *msḏr s3ḥ* | lambda Orionis |
| 28b |  | *iwn s3ḥ* | dzeta Tauri |
| 29a |  | *wᶜrt ḫrt s3ḥ* | kappa Orionis |
| 29b |  | *wᶜrt ḥrt s3ḥ* | beta Orionis |
| 30 |  | *tpy–ᶜspd* | kappa Orionis |
| 31 |  | *spd* | alpha Canis Majoris |
| 31a |  | *tpy–ᶜknmt* | tête de l'Hydre |
| 31b |  | *štwy* | 27, 28 et dzeta Monocerotis |

Propositions d'identification de quelques décans égyptiens

(Gadré et Roques, 2008e )

# Identification des décans égyptiens (3/3)




Localisation spatiale des étoiles associées à quelques décans égyptiens

# Validité des identifications proposées (1/2)

Travaux antérieurs : Locher (1981), Bocker (1984), Davis (1985), Leitz (1995), Belmonte (2001), Lull (2004)

**La méthode développée et utilisée dans le cadre de ce travail est la seule :**

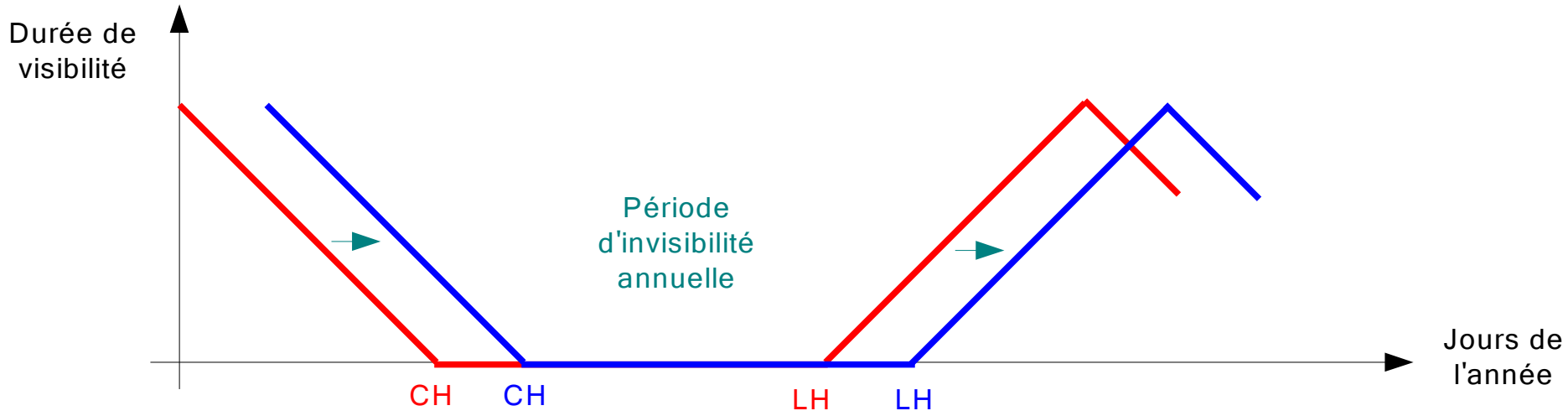
- à proposer l'**identification de chacun des 90 décans égyptiens**
- à associer chacun des 90 décans égyptiens à des **étoiles dont la période d'invisibilité annuelle avoisinait les 70 jours**
- à fournir une **explication de l'appellation hiéroglyphique** de certains décans épagomènes : *tpy ᶜ spd, imy-ḫt spd,* etc.

(Gadré et Roques, 2008e)

# Validité des identifications proposées (2/2)

## Les identifications proposées résistent à des variations réalistes :

1. **d'époque historique** : de 2000 BC (horloges stellaires)
   à 1500 BC (tombe de *Senenmout*)
2. **de latitude géographique** : de 30° (Memphis) à 25° (Thèbes)
3. **de taux d'humidité de l'air ambiant** (± 25%)
4. **d'acuité visuelle de l'observateur** (± 0.2)




(Gadré et Roques, 2008e)

# Autres résultats du travail d'identification (1/3)

Ce travail d'identification des décans égyptiens permet :

1. de repérer les quelques **erreurs** de la part des scribes copyistes **dans l'arrangement des décans** sur les six types de listes

2. d'**affiner nos propositions de datation** des prototypes des listes de types *t m3t*, *knmt*, *Senenmout*, *Séthi IC*, *Séthi IA* et *Séthi IB*

3. d'**expliquer la variabilité des heures de nuit** égyptienne

4. de **dresser la cartographie du ciel de l'Égypte ancienne**

5. d'établir une **distinction entre décans égyptiens et décans grecs**

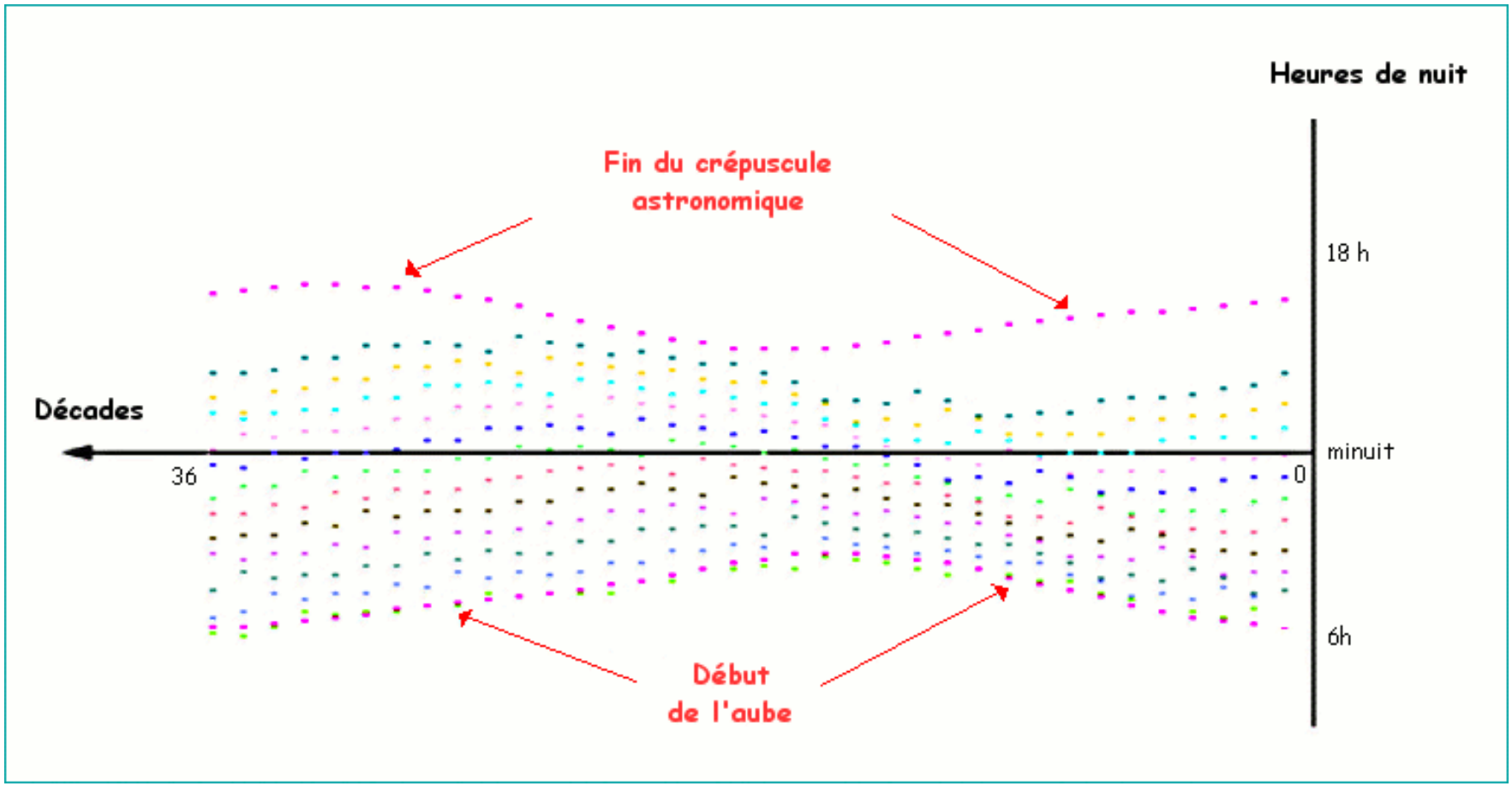
(Gadré et Roques, 2008e )

# Autres résultats du travail d'identification (2/3)

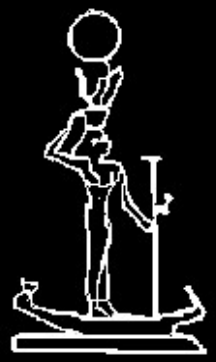
| Datation déduite de la position occupée par | Listes de type *ṯm3t* | Listes de type *knmt* | Listes de types *Senenmout*, *Séthi IC* et *Séthi IA* | Listes de type *Séthi IB* |
|---|---|---|---|---|
| Sirius (31) | 2101 - 2022 BC<br>2141 - 2102 BC | | 1821 - 1782 BC<br>1941 - 1902 BC | 1881 - 1842 BC |
| *ṯm3t* (1 et 2) | | 1941 - 1862 BC | 1901 - 1862 BC<br>1941 - 1902 BC | 1881 - 1842 BC |
| | Dynastie XI | Dynastie XII | | |

Nouvelles propositions de datation des six prototypes de listes d'étoiles

# Autres résultats du travail d'identification (3/3)




Variabilité de la durée des heures de nuit égyptiennes





H3w

Stwy

knmt

s3h

'rt

Qed

spd

Hntw

H3w / D3t

3Hwy / b3wy

smd

Tm3t

srt

wS3t

bk3t

sbSsn

ipDs

sSpt

wi3

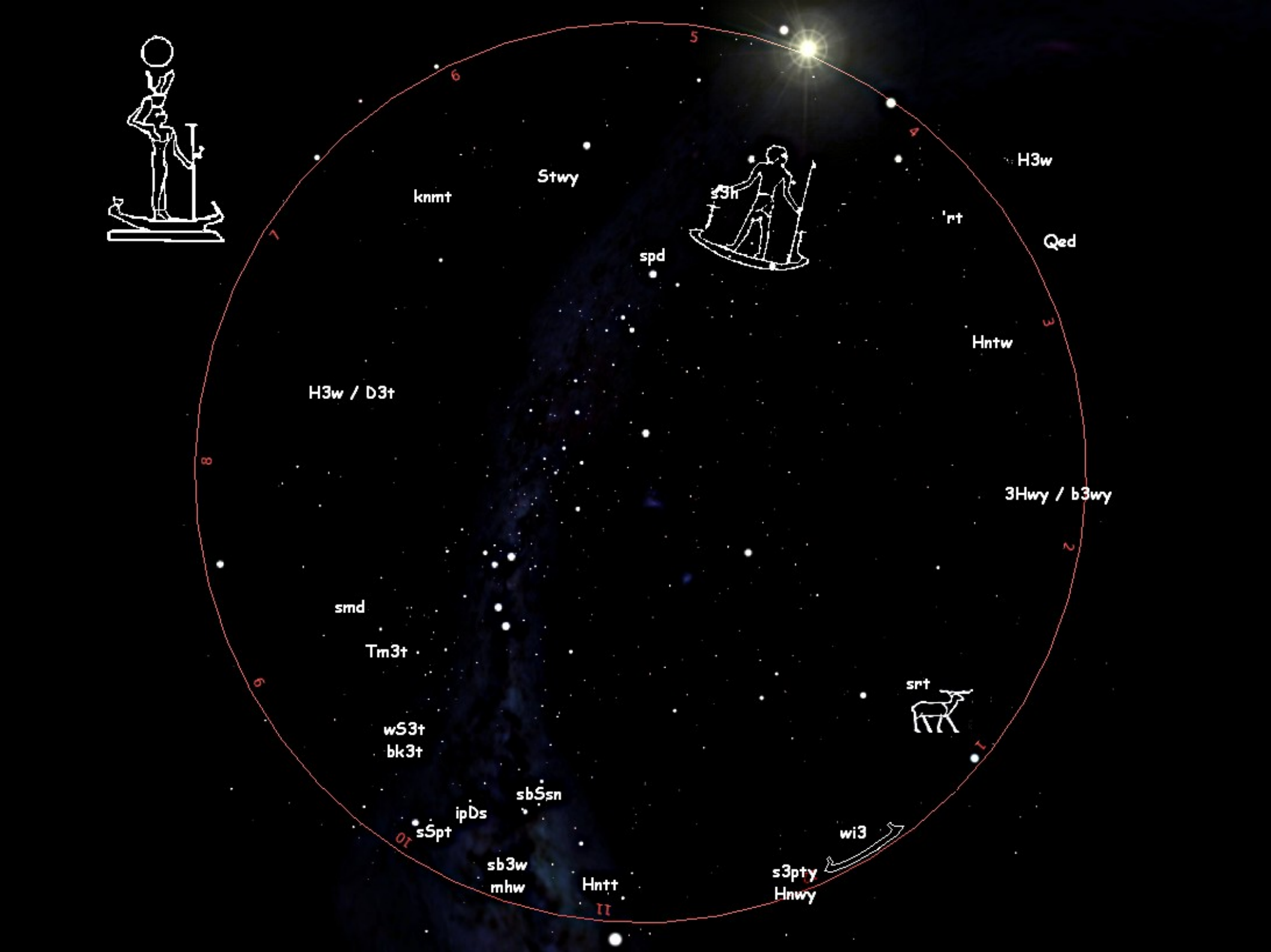
sb3w

mhw

Hntt

s3pty

Hnwy


5
6
4
7
3
8
2
9
1
10
11
H3w
Stwy
knmt
s3h
'rt
Qed
spd
Hntw
H3w / D3t
3Hwy / b3wy
smd
Tm3t
srt
wS3t
bk3t
sbSsn
ipDs
sSpt
wi3
sb3w
mhw
Hntt
s3pty
Hnwy

# Perpectives de travail

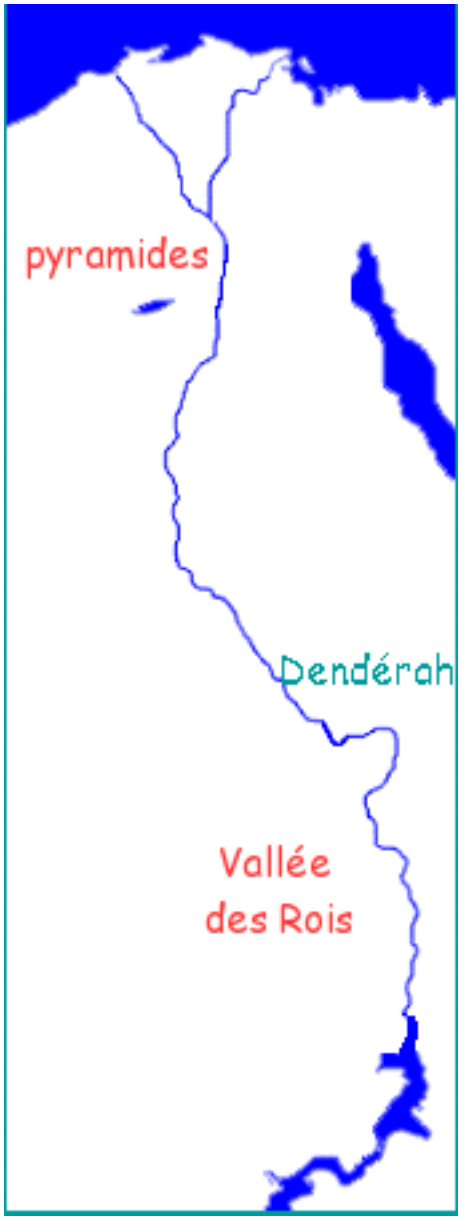
Orientation astronomique des monuments d'Égypte :

- situés à l'est du Nil : temples
- situés à l'ouest du Nil : tombes,
  temples funéraires

**Corrélation entre**
**localisation géographique**
**et orientation astronomique ?**

**Les décans : sources d'orientation**
**astronomique des monuments ?**

(Gadré, 2008f )




La Vallée du Nil