

Mise en station d'une monture équatoriale

Application de la méthode de King à l'imagerie CCD Implémentation dans le logiciel Audela

- Documentation et Notice Technique -

Version	Date	Auteur	Commentaire
1.0	4 juin 2001	J. Michelet / F. Cochard	Première version diffusée
1.1	3 juillet 2001	J. Michelet / F. Cochard	Mise à jour pour la version 1.1 du logiciel (diminution du nombre de fichiers Tcl, version italienne)

N'hésitez pas à nous contacter :

Jacques Michelet - jacques_michelet@ieee.org
François Cochard - francois.cochard@wanadoo.fr

1. Introduction

La méthode de King apporte une aide précieuse pour l'alignement polaire d'une monture équatoriale. Elle trouve une application pratique très efficace dans le cas de l'imagerie CCD. Profitant de l'arrivée du logiciel Audela, qui permet l'ajout de fonctions personnelles, nous avons travaillé à l'automatisation de cette méthode au travers de ce logiciel.

Ce document a pour objet de décrire en détail la manière dont la méthode de King a été implémentée dans le logiciel Audela. Il est destiné à toute personne utilisant cette fonction, pour en connaître le fonctionnement précis. Il peut aussi intéresser, à titre d'exemple, ceux qui souhaitent programmer dans Audela, toute ou partie de cette application pouvant être réutilisée.

Conformément à l'architecture de Audela, nous avons choisi d'implémenter cette méthode sous forme d'un panneau qui automatise les tâches de mesure et de calcul. En réalisant ce script, nous avons eu trois objectifs en tête :

- Simplicité d'utilisation.
- Rapidité de mise en œuvre.
- Précision de réglage.

Note : Nous nous sommes largement inspiré des articles de A.Maetz parus dans CCD&Télescope n°14, ainsi que des présentations de C.Buil (CCD&Télescope n°10) et de la page web de Jean Montanne. Merci à eux !

2. La méthode de King

2.1. Présentation rapide de la méthode

Lorsqu'une monture équatoriale n'est pas tout à fait alignée sur le pôle céleste, et si elle est motorisée, on peut montrer (voir plus loin la partie « démonstration mathématique ») qu'une étoile décrit en une journée, dans le repère du télescope - et donc sur l'image - un cercle de rayon égal à l'erreur d'alignement (il ne s'agit que d'une translation le long d'un cercle, et non d'une rotation de l'image). A titre de d'exemple, nous avons fait une acquisition de 200 images successives (15 secondes, en binning 1*1, ce qui a pris environ deux heures) de la région du pôle nord, puis nous les avons additionnées. L'image ci-dessous représente donc le mouvement des étoiles pendant deux heures :

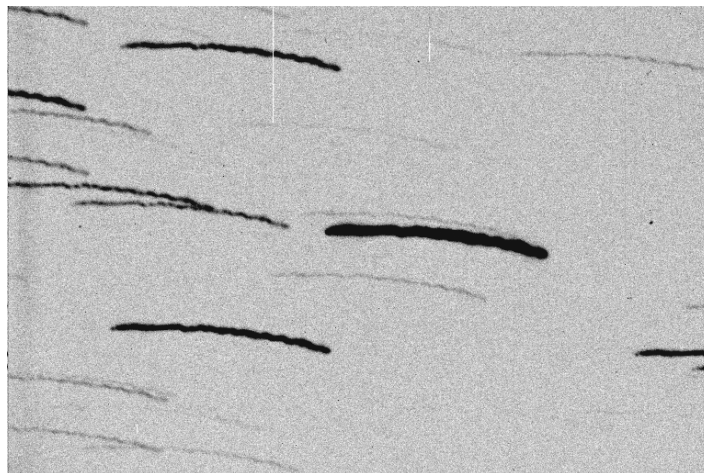


Fig. 1 : Trajectoire des étoiles durant une pose de 2 heures

La méthode de King exploite judicieusement ce constat, et - bien que décrite dans les années 30 - trouve dans l'imagerie CCD un domaine d'application idéal pour aider l'astronome à aligner correctement sa monture. La méthode de base consiste à faire deux images à un intervalle de temps de quelques minutes (typiquement, 10 minutes), et de mesurer le déplacement des étoiles entre ces deux images. De là, sur la base du constat précédent, il est facile de calculer le défaut d'alignement du télescope, et donc de le corriger.

Une des richesses de cette méthode est qu'elle travaille directement sur l'image CCD. On fera donc les mesures de déplacement en pixels, et on calculera la correction à apporter dans la même unité. Cette règle nous affranchit complètement de la combinaison optique - et permet de régler l'alignement dans la juste proportion de cette combinaison (à condition toutefois que la qualité mécanique de la monture permette cette précision) : on arrêtera les itérations quand le défaut d'alignement ne sera plus détectable sur l'image.

2.2. Quelques ordres de grandeur...

Supposons que notre objectif soit de régler la monture de telle sorte qu'une étoile ne dérive pas de plus d'un pixel sur une pose de 10 minutes. L'angle parcouru par la terre (et la monture) en 10 minutes est de 2,5 degrés. Sur une matrice CCD ayant des pixels carrés, un arc de cercle qui voit un 1 pixel sous 2,5 degrés a un rayon de 23 pixels environ ($1/\sin(2,5^\circ)$) - notez que l'on reste toujours en unité de pixel, quelque soit la focale de l'instrument ou la taille des pixels). Ce qui veut dire que l'erreur d'alignement entre la monture et le pôle vrai devra être inférieure à 23 pixels (là encore, on ne parle pas d'angles, mais de défauts mesurés directement sur l'image).

Pour fixer les idées, nous disposons d'une monture GP-DX, qui permet un alignement par viseur polaire de l'ordre de 15 minutes (et là, nous parlons bien d'un angle). Dans notre configuration (C8 + réducteur de focale + Audine KAF400, binning 2*2), cela représente environ 300 pixels. C'est insuffisant pour la précision de suivi évoquée plus haut (moins d'un pixel d'erreur en 10 minutes de pose), mais c'est du même ordre que le champ du CCD (384*256 pixels en binning 2*2). La méthode de King trouve donc là toute sa place : il y a une

parfaite complémentarité entre un positionnement grossier à la boussole ou au jugé, un premier alignement par le viseur polaire, puis un alignement fin par la méthode de King. Avec un peu de pratique, l'ensemble doit pouvoir se faire en 30 minutes environ.

2.3. Et quelques mises en garde !

Comme pour toute méthode scientifique, la réalité n'est jamais tout à fait conforme à la théorie... et l'on doit prendre quelques précautions pour que la méthode devienne opérationnelle. Vous constaterez sur la figure 1 que la trajectoire des étoiles n'est pas parfaitement circulaire, mais qu'elle subit de petites variations. Ces perturbations peuvent être dues à la qualité de la monture, au vent, etc... En outre, l'algorithme de calcul du centre de l'étoile est lui aussi entaché d'une certaine erreur. Dans la pratique, ces variations sont trop importantes pour que l'on puisse se fier à la mesure d'une seule étoile dans seulement deux images. Nous avons choisi, pour notre implémentation, de travailler sur des séquences d'images, et des séries d'étoiles dans chaque image. Nous faisons ensuite la moyenne de toutes nos mesures, pour limiter l'influence des erreurs aléatoires.

3. Implémentation de la méthode de King

3.1. Descriptif du séquençement

La mise en œuvre de la méthode de King se déroule de la manière suivante :

- Mise en station approximative du télescope, et pointage vers la région de la polaire (le fait de pointer vers la polaire permet de limiter l'effet des défauts de suivi de la monture. En outre, dans cette région du ciel, on peut assimiler le ciel à un plan perpendiculaire à l'axe de rotation de la terre... ce qui simplifie largement les calculs mathématiques !).
- Focalisation du télescope (au moins approximative).
- Acquisition d'une première image (ou d'une première série d'images), puis attente de quelques minutes (typiquement, 10 minutes). Eventuellement, on acquiert des noirs pendant ce temps d'attente, puis on en corrige la première image (ou série d'images).
- Acquisition d'une seconde image (ou série d'images), et correction éventuelle du noir.
- Mesure du décalage entre la première et la seconde image (ou série d'images).
- Calcul de l'erreur d'alignement du télescope.
- Correction de l'erreur d'alignement, par action mécanique sur les boutons de réglage de la monture. Pour cela, on passe en mode d'acquisition continue, et on doit déplacer n'importe quelle étoile de l'image vers la position calculée par le programme. Attention : Il s'agit des boutons de réglage de l'alignement, et non des commandes de pointage de l'instrument !
- Pour un résultat optimal, on peut faire plusieurs itérations.

3.2. Algorithmique et calcul de moyenne

Comme nous l'avons déjà évoqué plus haut, nous avons choisi de travailler sur des séries d'images, afin de limiter, par un calcul de moyenne, les diverses erreurs de mesures qui interviennent dans la pratique. Nous avons choisi d'offrir deux modes de calcul du déplacement des images: l'un manuel, l'autre automatique. Nous traitons ci dessous du mode manuel, et nous précisons ensuite en quoi diffère le mode automatique.

Concrètement, voici comment nous procédons dans le mode de calcul manuel:

- Acquisition d'une première série d'images (5 images par exemple).
- Attente d'un délai (typiquement 10 minutes entre la première acquisition de la première série, et la première acquisition de la seconde série).
- Acquisition d'une seconde série d'images (même nombre que la première série).
- Affichage de la première image de la première série, pour permettre une sélection manuelle des étoiles à l'écran.
- Au cours de la sélection manuelle, une liste d'étoiles est établie. Seules sont retenues les étoiles significatives (ayant un rapport signal/bruit suffisant).
- Ensuite, pour chaque image des deux séries, la position du centre de chaque étoile de la liste est calculée précisément. Si l'étoile est considérée comme non significative (Rapport signal/bruit trop faible, pixel chaud, étoile trop étalée...), elle est rejetée (enregistrée comme non valide).
- Les images sont ensuite traitées par paires : Première image des deux séries, puis seconde image des deux séries, etc... Pour chaque paire, on calcule le décalage (en X et en Y) des mêmes étoiles entre les deux images (première étoile dans les deux images, puis seconde étoile dans les deux images, etc...). Les étoiles non valides ne sont pas prises en compte dans ce calcul.
- Un calcul de la moyenne de ces décalages permet d'obtenir le décalage entre les deux images (avec une meilleure précision que sur une seule étoile).
- Pour chaque paire d'images, on déduit de ce décalage la correction à apporter sur la monture (application des formules de King proprement dites - reportez-vous à l'annexe B pour la démonstration mathématique) :

$$X = -\frac{\Delta x}{2} + \frac{\sin \omega(t_2 - t_1)}{2 * (1 - \cos \omega(t_2 - t_1))} \Delta y \quad \text{et} \quad Y = -\frac{\sin \omega(t_2 - t_1)}{2 * (1 - \cos \omega(t_2 - t_1))} \Delta x - \frac{\Delta y}{2}$$

- Une correction est ensuite apportée à ces résultats, de manière à ramener cette correction à l'instant de la dernière image de la seconde série (la terre a tourné entre chaque image...). La correction est du type (là encore, reportez-vous à la démonstration mathématique):

$$X' = X \cos \omega(t_3 - t_2) + Y * \sin \omega(t_3 - t_2) \quad \text{et} \quad Y' = Y \cos \omega(t_3 - t_2) - X * \sin \omega(t_3 - t_2)$$

- Pour améliorer la précision du calcul, on fait enfin la moyenne de tous ces décalages.

On fait donc des moyennes à deux niveaux : En calculant le décalage entre images sur plusieurs étoiles, puis en appliquant le calcul de King à plusieurs paires d'images. On s'affranchit ainsi pour une bonne part des erreurs aléatoires. Bien sûr, le calcul est parfaitement fonctionnel avec une seule étoile dans seulement deux images, mais la pratique nous a montré que le résultat est alors très approximatif...

En complément de ces calculs, nous avons inclus la possibilité de faire des noirs entre les deux séries d'images (sans perte de temps, donc), qui sont soustraits de chaque image. On élimine ainsi une bonne partie des pixels chauds, et on améliore encore à peu de frais la précision de mesure.

Le mode automatique diffère du mode manuel pour le calcul du décalage entre les images : Le mode manuel propose une sélection manuelle d'étoiles, alors que le mode automatique utilise une des fonctions de registration de Audela (fonction register2 de la librairie libtt.dll). Les deux modes ont des avantages et des inconvénients :

- Le mode auto est plus rapide et plus simple à utiliser. Il est en outre complètement objectif. En revanche il n'arrive pas à déboucher dans certaines circonstances.
- Le mode manuel est probablement plus robuste (l'utilisateur peut interpréter une image pour traiter un cas particulier), et on maîtrise mieux le calcul (puisque l'on a écrit la fonction de calcul de centroïde en Tcl nous-mêmes).

L'avantage de disposer des deux modes est que l'on peut faire des comparaisons, les algorithmes de calcul étant très différents, si les résultats sont similaires, c'est probablement qu'on est proche de la vérité...

Les modes manuel et auto ne diffèrent que par la méthode de calcul de décalage entre les images. Ils sont rigoureusement identiques dans la suite du calcul : on fait la moyenne des résultats obtenus sur les différentes paires d'images.

Lorsque le calcul proprement dit est terminé, on peut passer à l'étape suivante qui lance une nouvelle acquisition en binning 2*2 (quelque soit le binning des images précédentes), et affiche sous forme graphique le décalage à effectuer. Il suffit de sélectionner une étoile dans cette image, de telle sorte que sa position cible soit toujours visible à l'écran.

L'application lance alors une acquisition en continu, et affiche la cible en permanence. L'utilisateur doit alors régler sa monture de telle sorte que l'étoile sélectionnée se retrouve dans la cible. Avec un peu de doigté, on peut placer l'étoile à quelques pixels près.

Pour permettre une adaptation à toutes les configurations, la plupart des paramètres (nombre d'image par série, temps d'attente entre les séries, binning, temps de pose, etc...) sont réglables, et enregistrés dans un fichier de configuration. Pour une utilisation simple, plusieurs configurations peuvent être sauvegardées (Voir ci-dessous, et l'annexe A pour tous les détails sur le fichier de configuration).

3.3. Guide de l'utilisateur

Dans les chapitres précédents, nous avons décrit la méthode de King dans sa globalité. Maintenant que vous en avez bien compris les fondements, nous allons entrer dans le détail de son utilisation avec Audela.

3.3.1. Installation du logiciel

Ce logiciel est fourni sous la forme d'un fichier compressé. Après décompression, l'utilisateur est en possession de 4 fichiers, chacun devant être rangé dans un répertoire d'installation particulier. Pour la suite, le mot Rep_Audela va désigner le répertoire principal dans lequel l'ensemble du logiciel Audela/Audace est installé, c'est à dire le répertoire contenant les sous-répertoires audace, lib, astp, binwin (ou binlinux), etc...

Nom du fichier	Répertoire d'installation	Commentaire
methking.tcl	Rep_Audela/audace/panneau	Programme contenant le panneau, les routines d'acquisition d'images, le calcul de King, et toutes les routines auxiliaires
captking.tcl	Rep_Audela/audace/panneau/king	Ensemble des chaînes de caractères pour chacune des langues supportées
methking.ini	Rep_Audela/audace/panneau/king	Fichier de configuration
noticeking.pdf	Sans importance	Ce fichier de documentation

L'utilisateur l'aura noté, il va lui falloir créer un sous-répertoire dans Rep_Audela/audace/panneau, obligatoirement baptisé king (au même niveau que le sous-répertoire SnAude, par exemple)

3.3.2. L'interface utilisateur

Audela est construit autour de Panneaux. Nous avons respecté cette architecture, et nous avons donc créé un panneau « King ». Pour intégrer parfaitement notre panneau dans Audela, nous avons respecté le système multilingue. A ce jour les versions française, italienne et anglaise sont disponibles. Cliquez sur « King » dans le menu panneau. Le panneau King apparaît... et l'aventure peut commencer !

Vous verrez principalement deux nouveaux éléments à l'écran : Le panneau proprement dit, et une nouvelle fenêtre qui affiche les paramètres actifs.

Dans le panneau, vous verrez cinq boutons, et deux zones d'affichage (statut et résultat). De manière générale, le déroulement de la méthode requiert l'utilisation de ces cinq boutons, dans l'ordre. Détaillons-les donc :

- « Paramètres » permet la sélection de la configuration sur laquelle on veut travailler (cliquez dessus...). Une configuration correspond à un jeu de paramètres (binning, temps de pose, nombre d'images par séquence...). Nous avons défini par défaut un certain nombre de configuration, correspondant à nos instruments. Mais ces configurations peuvent être modifiées, et d'autres peuvent être ajoutées : Il suffit de sélectionner l'option « Edition » du menu ouvert par le bouton « Paramètres ». Le fichier de configuration est relativement intuitif, mais vous pouvez vous reporter à l'annexe A pour en connaître tous les détails. Lorsque vous avez sélectionné la configuration qui vous convient, les principaux paramètres sont affichés dans la nouvelle fenêtre
- « Acquisitions » lance l'acquisition des deux séries d'images. Avant de cliquer sur ce bouton, vous devez donc mettre grossièrement en station votre monture, et faire la focalisation.
- « Calcul » effectue l'analyse des images (en mode manuel ou automatique) et le calcul de King proprement dit (voir description ci-dessus, au chapitre 3.2).
- « Réglages » lance la dernière étape : Ce bouton demande à l'utilisateur de sélectionner une étoile, puis effectue des acquisitions en continu, pour permettre le réglage de la monture. Quand le réglage est terminé, il suffit de cliquer sur « ARRET ». Mais ce dernier bouton peut aussi être utilisé à n'importe quel moment pour interrompre la procédure.

Comme certaines étapes sont un peu longues (surtout quand il fait froid et qu'il est deux heures du matin...), le programme affiche dans la zone « Status » la tâche qu'il est en train d'effectuer, ou le temps qu'il reste à attendre !

Un dernier point qui a son importance : La totalité des actions effectuées lors d'une session de King (c'est à dire entre le moment où l'on appelle le panneau King et le moment où l'on en sort) est enregistrée dans un fichier log. Ce fichier contient le résultat de tous les calculs, pour une exploitation ultérieure éventuelle. Il a pour nom « methking_YYYYMMDD_HHMM.log », où YYYYMMDD correspond à la date et HHMM à l'heure de création. Il est sauvegardé dans le répertoire de travail, de même que toutes les images acquises durant la session.

3.3.3. Mise en station du télescope : mode opératoire

La mise en station se déroule en 9 étapes :

Etape 1 - Mettre approximativement le télescope en station avec les moyens à disposition (dans notre cas, nous utilisons le viseur polaire).

Etape 2 - Mettre en marche le moteur d'entraînement.

Etape 3 - Faire la focalisation (approximative, au moins).

Etape 4 - Faire pointer le télescope en direction du pôle. Ce pointage n'a pas besoin d'être très précis, une erreur de 5 degrés ne pose pas de problème. Le but est simplement de s'affranchir autant que possible des défauts d'entraînement. Choisir une zone du ciel qui contient autant d'étoiles que possible (typiquement, au moins 5 étoiles significatives).

Etape 5 - Passer dans Audela, et sélectionner le panneau « King ». Il est impératif de s'assurer à ce stade que les images acquises par Audela sont conformes au ciel, c'est à dire que les images ne sont pas inversées. La manière la plus simple de s'en assurer est de comparer une image avec la carte du ciel. Deux cas se présentent :

a) les 2 images peuvent se superposer (à un facteur d'échelle près) après une rotation de l'une d'entre elle par rapport à l'autre, quelque soit le sens de cette rotation. Le cas où il faut faire deux opérations de miroirs (une en x, l'autre en y) pour arriver à la superposition est équivalent à celui d'une simple rotation. Dans ce cas, il ne faut pas modifier les indicateurs de miroir de la caméra.

b) les 2 images ne peuvent se superposer qu'après une rotation et une opération de miroir (en x, ou en y, peu importe). Alors, il faut impérativement cocher un des 2 indicateurs de miroir.

Pour indication : une Audine pilotée par Audela, placée directement au foyer d'un Schmidt-Cassegrain, sans renvoi coudé nécessite qu'un des indicateurs miroirx ou miroiry soit coché.

Etape 6 - Choisir le jeu de paramètres qui correspond à la configuration (voir ci-dessus les détails sur le fichier de configuration, ainsi que l'annexe A). Le cas échéant, ajuster ces paramètres à votre besoin spécifique. Pour débiter, nous vous suggérons des séries de 5 images de 5 ou 10 secondes en binning 2*2, et un temps de 10 minutes (600 secondes) entre les deux séries.

Etape 7 - Lancer les acquisitions d'images en appuyant sur le bouton « Acquisitions ». Pendant toute la phase d'acquisition (qui prend typiquement 10 à 15 minutes), il ne faut surtout pas toucher à la monture !

Etape 8 - Lorsque les acquisitions sont terminées, lancer le calcul de King en appuyant sur le bouton « Calculs ». Une boîte de dialogue apparaît, qui vous propose de choisir le mode manuel ou le mode automatique. Le cas échéant (mode manuel), après quelques secondes de calcul (registration des images), vous devez sélectionner des étoiles (autant que possible) dans le cadre vert qui délimite la partie commune à toutes les images de la série. Vous pouvez regarder les résultats du calcul (qui se déroule en 7 étapes) dans la console de Audela (Ces résultats sont aussi sauvegardés dans le fichier log).

Si vous avez renseigné correctement le fichier de configuration (focale et taille des pixels), le défaut d'alignement est affiché dans la zone « status ».

Etape 9 - Une fois les calculs terminés, lancer la phase de réglage en appuyant sur le bouton « Réglages ». Le programme commence par une nouvelle acquisition, en binning 2*2 (quelque soit le binning des images acquises précédemment), et affiche dans cette image deux cibles que vous pouvez déplacer à volonté avec la souris. Placer le rond rouge autour d'une étoile bien visible, et de telle façon que le carré vert soit le plus possible au centre de l'écran. Cliquer alors sur le bouton gauche de la souris (le programme demande confirmation). Audela part alors en mode d'acquisition continue. Il ne reste plus qu'à déplacer l'étoile sélectionnée vers le carré vert, en jouant sur les réglages mécaniques de la monture (surtout pas sur les mouvements AD et déclinaison, bien évidemment !). Si vous avez renseigné correctement le fichier de

configuration (paramètres « TexteX+ », etc...), des indications vous sont données pour savoir dans quel sens agir sur la monture !

Quand cette séquence est terminée, votre monture est en station : Appuyez sur le bouton « ARRET », pour arrêter les acquisitions. Le cas échéant, vous pouvez faire une seconde passe plus précise (en binning 1*1, par exemple, ou avec un temps de pose plus long).

En bref, King c'est royal !

4. Annexe A : Fichier methking.ini

Le fichier methking.ini est un fichier texte, qui contient des informations sur la façon de faire fonctionner le panneau King. Il est modifiable par tout éditeur de texte, que ce soit sous Windows ou Linux. Le panneau King est fourni avec un exemple fonctionnel de ce fichier dont l'utilisateur peut s'inspirer pour ces propres besoins.

4.1. Contenu sémantique :

Ce fichier définit des configurations, c'est-à-dire un ensemble de paramètres qui vont permettre de mettre aisément en station la monture. En effet, en début de session, l'utilisateur va chercher à rapidement dégrossir l'alignement de la monture. Ainsi, par exemple, il effectuera deux séquences de 3 vues séparées de 2 minutes, en binning 2x2, en utilisant donc une configuration dédiée. Une fois ce premier réglage fait, l'utilisateur va vouloir affiner cette mise en station, en réalisant des séquences de 9 vues, prises à 10 minutes d'intervalle, en binning 1x1, ces paramètres définissant une deuxième configuration. Le fichier methking.ini décrit toutes ces configurations.

4.2. Règles d'écriture.

- Les configurations sont décrites à l'aide de mots-clés dont la liste est donnée au paragraphe suivant. Les mots-clés sont repérés par les crochets qui les encadrent. Chaque mot-clé est suivi d'une valeur qui le définit. Exemple : [TempsPose] 15 : TempsPose est le mot-clé, 15 étant sa valeur associée.
- La casse est sans importance, les mots-clés et leur valeur peuvent être écrits indifféremment en majuscule ou en minuscule.
- Le caractère dièse (#) délimite le champ de commentaire. Sur une ligne, tout ce qui est situé à droite de ce signe est ignoré par le programme.
- Le mot clé [config] a une signification spéciale, car il délimite une configuration. Tous les mots-clés qui suivront ce mot se rapporteront à cette configuration, jusqu'au prochain mot-clé [config] ou jusqu'à la fin du fichier.
- A l'intérieur d'une configuration, l'ordre d'apparition des mots-clés est sans importance.
- Si pour une configuration donnée, un mot-clé est omis, une valeur par défaut lui est attribuée.
- Si entre deux mots-clés [Config] (c'est-à-dire à l'intérieur d'une configuration), le même mot-clé est défini plus d'une fois, seule la valeur correspondant à la dernière définition sera prise en compte.
- Deux mots-clés spéciaux sont « hors configuration », et s'appliquent globalement au logiciel. Il s'agit de [ConfigDefaut] qui définit la configuration que le logiciel utilisera après son initialisation, et de [NomKing] qui indique le nom générique des fichiers image qui vont servir au calcul.

4.3. Liste des mots-clés et des valeurs associées

Mot-clé	Type de la valeur	Valeur minimale permise	Valeur maximale permise	Valeur par défaut	Signification
Config	Texte	Sans objet	Sans objet	Config	[Config] est un délimiteur de configuration. Sa valeur texte est son nom, qui sera affiché dans la fenêtre de paramètres
TempsPose	Entière	1	30	5	Temps de pose en secondes des vues dans les séquences
InterPose	Entière	60	1200	600	Temps en secondes séparant le début des 2 séquences
Binning	Entière	1	2	2	Binning des vues
PoseParSeq	Entière	1	15	3	Nombre de vues dans chacune des séquences
TexteX+	Texte	Sans objet	Sans objet	X+	Texte qui s'affiche dans la deuxième fenêtre de réglages si l'étoile sélectionnée doit être décalée dans le sens des X croissants
TexteX-	Texte	Sans objet	Sans objet	X-	Texte qui s'affiche dans la deuxième fenêtre de réglages si l'étoile sélectionnée doit être décalée dans

Mot-clé	Type de la valeur	Valeur minimale permise	Valeur maximale permise	Valeur par défaut	Signification
					le sens des X décroissants
TexteY+	Texte	Sans objet	Sans objet	Y+	Texte qui s'affiche dans la deuxième fenêtre de réglages si l'étoile sélectionnée doit être décalée dans le sens des Y croissants
TexteY-	Texte	Sans objet	Sans objet	Y-	Texte qui s'affiche dans la deuxième fenêtre de réglages si l'étoile sélectionnée doit être décalée dans le sens des Y décroissants
Focale	Entière	Sans objet	Sans objet	0	Longueur focale en mm du montage optique. Sert à transformer les valeurs de décalage de la monture de pixels en unités d'angle
Pixel_X	Entière	Sans objet	Sans objet	0	Dimension horizontale en μm d'un pixel de la caméra. Sert à transformer les valeurs de décalage de la monture de pixels en unités d'angle.
Pixel_Y	Entière	Sans objet	Sans objet	0	Dimension verticale en μm d'un pixel de la caméra. Sert à transformer les valeurs de décalage de la monture de pixels en unités d'angle. Non utilisé à ce jour
Noir	Entière	0	1	0	La valeur 1 permet d'acquérir des noirs entre les deux séquences, et de les retirer aux vues qui serviront au calcul.
Son	Entière	0	60	0	Temps en secondes précédant le début de la deuxième séquence où sera émis un signal sonore.
Test	Entière	0	20	0	Paramètre servant aux concepteurs du programme. Un conseil : ne le validez surtout pas, le logiciel ne se comporterait pas comme décrit.
ConfigDefaut	Entière	0	31	0	Numéro de la configuration par défaut qui sera prise lors du lancement du panneau, ou après toute modification du fichier methking.ini. Ce paramètre est global, et ne s'applique pas à une configuration particulière.
NomKing	Texte	Sans objet	Sans objet	King_	Nom générique de sauvegarde des fichiers images qui serviront au calcul. Ce paramètre est global, et ne s'applique pas à une configuration particulière.

5. Annexe B : Démonstrations mathématiques

Pour les matheux (et/ou les incroyables...), nous reprenons ici les démonstrations des affirmations utilisées jusque là :

- Si la monture n'est pas parfaitement alignée avec le pôle céleste, toute étoile décrit, dans le repère du télescope, un cercle de rayon égal au défaut d'alignement.
- Les formules de calcul de la méthode de King.

5.1. Notations

Dans les lignes qui suivent, nous allons définir des repères, des points, et des transformations dans le plan. La notation utilisée est la suivante :

$(M)_{\mathcal{R}_1} = \Omega * (A)_{\mathcal{R}}$ se lit : « Les coordonnées du point M dans le repère R1 sont égales au produit de la matrice Ω par les coordonnées du point A dans le repère R ».

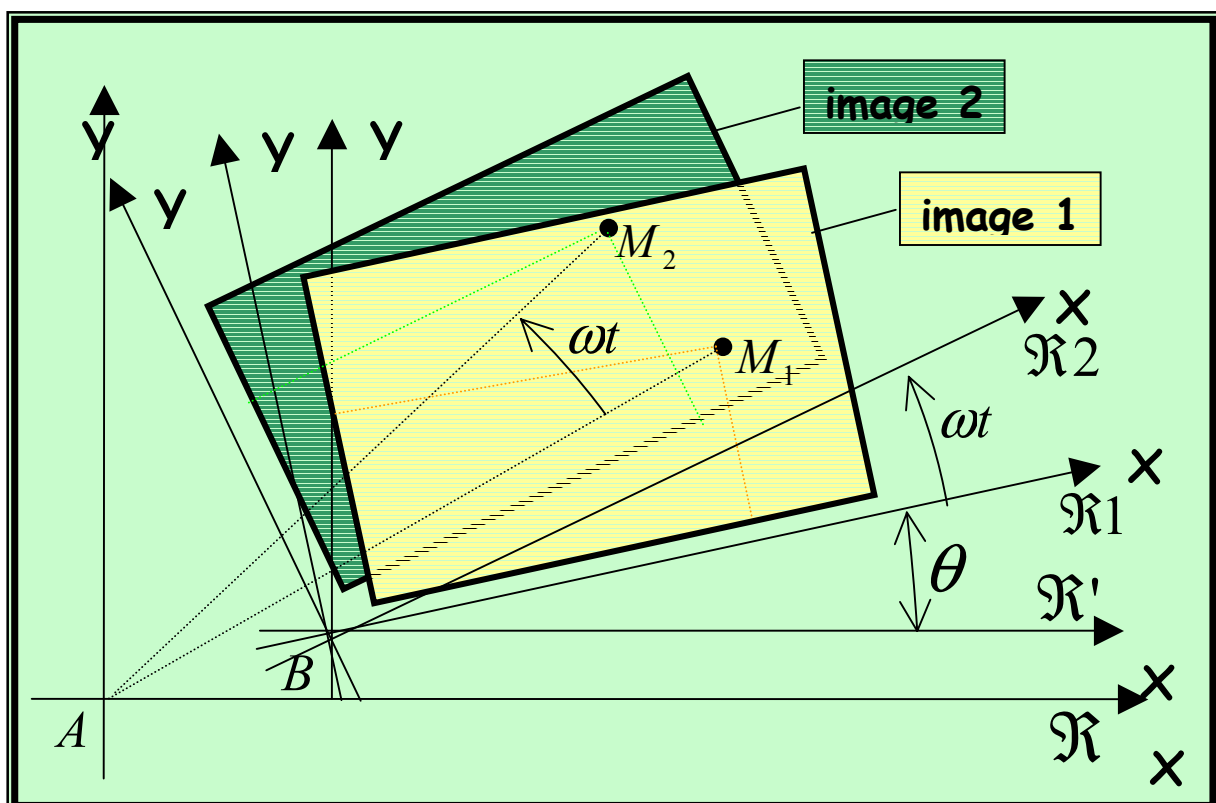
5.2. Hypothèses

Pour toutes ces démonstrations, nous faisons l'hypothèse que nous travaillons dans le plan. Concrètement, nous ne nous intéressons qu'à la région du pôle (à quelques degrés près...), et on assimile donc la sphère céleste dans cette région à un plan. La rotation de la terre est une rotation autour d'un axe perpendiculaire à ce plan. On la représente donc par une rotation autour d'un point du plan. La rotation du télescope est aussi assimilée à une rotation d'axe parallèle, mais non confondu avec l'axe précédent - C'est justement ce décalage entre terre et télescope qui est l'objet de notre étude.

Nous faisons aussi l'hypothèse que le télescope tourne à une vitesse de rotation strictement identique à celle de la terre.

Ces hypothèses sont très valables tant que le télescope est grossièrement aligné avec la terre (typiquement, à mieux que 10 degrés), ce qui est tout à fait réaliste, puisqu'on est censé avoir fait un alignement approximatif avant d'utiliser la méthode de King.

5.3. Définitions



5.3.1. Repères.

On définit dans le plan du ciel un repère orthogonal arbitraire \mathfrak{R} , que l'on assimile à un repère terrestre. L'origine A de ce repère est confondu avec l'axe de rotation de la terre. Toute étoile fixe sur la sphère céleste décrit donc dans \mathfrak{R} un cercle de centre A .

On définit ensuite un second repère \mathfrak{R}' , parallèle au premier, mais dont l'origine est le point B , qui représente l'axe de rotation du télescope. La distance AB correspond au défaut d'alignement du télescope par rapport à la terre.

On définit ensuite un troisième repère $\mathfrak{R}1$, lui aussi d'origine B , mais présentant un décalage angulaire θ par rapport à \mathfrak{R}' . Ce repère est celui de la première image CCD, prise à l'instant t_1 .

On définit enfin un quatrième repère $\mathfrak{R}2$, toujours d'origine B , et présentant un décalage angulaire $\omega(t_2 - t_1)$ par rapport à $\mathfrak{R}1$. Ce repère est celui de la seconde image CCD, prise à l'instant t_2 . ω étant la vitesse de rotation de la terre (et du télescope, en radian par unité de temps), $\omega(t_2 - t_1)$ représente donc la rotation du télescope entre les instants t_1 et t_2 .

5.3.2. Points.

Nous avons déjà défini les points A et B .

En outre, nous allons définir les points M_1 et M_2 , qui représentent une étoile, respectivement aux deux instants t_1 et t_2 . Insistons sur le fait que M_1 et M_2 représentent la même étoile à ces deux instants.

5.3.3. Transformations.

Les seules transformations qui nous intéressent sont celles qui nous permettent de passer d'un repère à l'autre, tels que définis précédemment. Il s'agit donc de rotations (représentées par des matrices carrées de déterminant 1) et de translation.

Soit $\Omega = \begin{pmatrix} \cos \omega(t_2 - t_1) & -\sin \omega(t_2 - t_1) \\ \sin \omega(t_2 - t_1) & \cos \omega(t_2 - t_1) \end{pmatrix}$. Cette matrice effectue une rotation d'angle $\omega(t_2 - t_1)$.

Elle permet d'exprimer la rotation d'une étoile dans le repère terrestre :

$$(M_2)_{\mathfrak{R}} = \Omega * (M_1)_{\mathfrak{R}} \quad (1),$$

ainsi que le passage du repère $\mathfrak{R}2$ au repère $\mathfrak{R}1$. Par exemple :

$$(M_2)_{\mathfrak{R}1} = \Omega * (M_2)_{\mathfrak{R}2} \quad (2)$$

Soit $P = \begin{pmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix}$. Cette matrice effectue une rotation d'angle θ . Elle permet le passage du

repère $\mathfrak{R}1$ au repère: \mathfrak{R}'

$$(M_1)_{\mathfrak{R}'} = P * (M_1)_{\mathfrak{R}1} \quad (3)$$

Des équations (2) et (3), on déduit le passage du repère $\mathfrak{R}2$ au repère \mathfrak{R}' par la relation suivante :

$$(M_2)_{\mathfrak{R}'} = P * \Omega * (M_2)_{\mathfrak{R}2} \quad (4)$$

Cette relation est aussi applicable au point A :

$$(A)_{\mathcal{R}'} = P * \Omega * (A)_{\mathcal{R}2} \quad (5)$$

Le passage du repère \mathcal{R}' au repère \mathcal{R} se fait par une simple translation :

$$(M_2)_{\mathcal{R}} = (M_2)_{\mathcal{R}'} - (A)_{\mathcal{R}'} \quad (6) \quad \text{et} \quad (M_1)_{\mathcal{R}} = (M_1)_{\mathcal{R}'} - (A)_{\mathcal{R}'} \quad (7).$$

$$\text{Enfin nous noterons que } (A)_{\mathcal{R}'} = -(B)_{\mathcal{R}} \quad (8)$$

Pour résumer, nous utiliserons dans la suite les équations de base suivantes :

$(M_2)_{\mathcal{R}} = \Omega * (M_1)_{\mathcal{R}}$	(1)
$(M_1)_{\mathcal{R}'} = P * (M_1)_{\mathcal{R}1}$	(3)
$(M_2)_{\mathcal{R}'} = P * \Omega * (M_2)_{\mathcal{R}2}$	(4)
$(A)_{\mathcal{R}'} = P * \Omega * (A)_{\mathcal{R}2}$	(5)
$(M_2)_{\mathcal{R}} = (M_2)_{\mathcal{R}'} - (A)_{\mathcal{R}'}$	(6)
$(M_1)_{\mathcal{R}} = (M_1)_{\mathcal{R}'} - (A)_{\mathcal{R}'}$	(7)
$(A)_{\mathcal{R}'} = -(B)_{\mathcal{R}}$	(8)

5.4. Trajectoire d'une étoile dans le repère du télescope.

En nous appuyant sur les équations précédentes, nous allons chercher à établir la trajectoire, au cours du temps, d'une étoile dans l'image CCD. Le repère de cette image est $\mathcal{R}2$. Pour cela, nous devons établir la position du point M_2 , en considérant que sa position initiale est $(M_1)_{\mathcal{R}1}$. Nous devons donc exprimer $(M_2)_{\mathcal{R}2}$ en fonction des éléments disponibles et invariables : $(M_1)_{\mathcal{R}1}$, ω , et $(B)_{\mathcal{R}}$:

A partir des équations (4) et (6),

$$(M_2)_{\mathcal{R}} = P * \Omega * (M_2)_{\mathcal{R}2} - (A)_{\mathcal{R}'}$$

$$(1) \Rightarrow \Omega * (M_1)_{\mathcal{R}} = P * \Omega * (M_2)_{\mathcal{R}2} - (A)_{\mathcal{R}'}$$

$$(8) \Rightarrow \Omega * (M_1)_{\mathcal{R}} = P * \Omega * (M_2)_{\mathcal{R}2} + (B)_{\mathcal{R}}$$

$$(7) \Rightarrow \Omega * ((M_1)_{\mathcal{R}1} + (B)_{\mathcal{R}}) = P * \Omega * (M_2)_{\mathcal{R}2} + (B)_{\mathcal{R}}$$

$$(2) \Rightarrow \Omega * P * (M_1)_{\mathcal{R}1} + \Omega * (B)_{\mathcal{R}} = P * \Omega * (M_2)_{\mathcal{R}2} + (B)_{\mathcal{R}}$$

En multipliant tous les termes par $P^{-1} * \Omega^{-1}$,

$$\Rightarrow (M_1)_{\mathcal{R}1} + P^{-1} * (B)_{\mathcal{R}} = (M_2)_{\mathcal{R}2} + P^{-1} * \Omega^{-1} * (B)_{\mathcal{R}}$$

$$\Rightarrow (M_2)_{\mathcal{R}2} = (M_1)_{\mathcal{R}1} + P^{-1} * (B)_{\mathcal{R}} - \Omega^{-1} * (P^{-1} * (B)_{\mathcal{R}})$$

Nous avons ainsi le résultat recherché : Les deux premiers termes $((M_1)_{\mathfrak{R}1} + P^{-1} * (B)_{\mathfrak{R}})$ sont invariables dans le temps. Le dernier terme $(-\Omega^{-1} * (P^{-1} * (B))_{\mathfrak{R}})$ exprime la rotation du point B au cours du temps. La trajectoire résultante sera donc un cercle de diamètre égal au défaut d'alignement (rappelons que le point B représente l'axe de rotation du télescope par rapport à l'axe de rotation du ciel).

Note : On remarquera que la trajectoire de l'étoile ne dépend absolument pas de la position de l'étoile dans le ciel. Ce n'est pas parce que l'on prend une étoile sur l'écliptique, que le mouvement de l'étoile sur l'image sera plus important... Et pour limiter les effets des défauts de suivi de la monture, on a tout intérêt à choisir une étoile à proximité de la polaire.

5.5. Calcul du défaut d'alignement de la monture.

Le principe de la méthode de King consiste à mesurer la dérive d'une étoile entre deux images CCD, et d'en déduire le défaut d'alignement de la monture, pour le corriger. Les deux images, prises aux instants t_1 et t_2 , sont respectivement attachées aux repères $\mathfrak{R}1$ et $\mathfrak{R}2$. L'étoile y prend respectivement les positions M_1 et M_2 .

Notre objectif est donc d'exprimer $(A)_{\mathfrak{R}2}$ en fonction de $((M_2)_{\mathfrak{R}2} - (M_1)_{\mathfrak{R}1})$, qui correspond au déplacement de l'étoile entre les deux images. Nous connaissons ainsi le déplacement à effectuer dans le repère de la seconde image. Repartons pour cela des équations de base énoncées plus haut (notons que nous pouvons mesurer facilement le déplacement de l'étoile à l'autre, mais que nous ne connaissons pas la position absolue de l'étoile dans l'une ou l'autre image.. En d'autres termes, nous connaissons $(M_2)_{\mathfrak{R}2} - (M_1)_{\mathfrak{R}1}$, mais pas $(M_1)_{\mathfrak{R}1}$ ou $(M_2)_{\mathfrak{R}2}$).

$$(1) \quad (M_2)_{\mathfrak{R}} = \Omega * (M_1)_{\mathfrak{R}}$$

$$(6) \text{ et } (7) \Rightarrow (M_2)_{\mathfrak{R}'} - (A)_{\mathfrak{R}'} = \Omega * ((M_1)_{\mathfrak{R}'} - (A)_{\mathfrak{R}'})$$

$$(3) \text{ et } (4) \Rightarrow P * \Omega * (M_2)_{\mathfrak{R}2} - (A)_{\mathfrak{R}'} = \Omega * P * (M_1)_{\mathfrak{R}1} - \Omega * (A)_{\mathfrak{R}'}$$

$$(5) \Rightarrow P * \Omega * (M_2)_{\mathfrak{R}2} - P * \Omega * (A)_{\mathfrak{R}2} = \Omega * P * (M_1)_{\mathfrak{R}1} - \Omega * P * \Omega * (A)_{\mathfrak{R}2}$$

$$\Rightarrow (M_2)_{\mathfrak{R}2} - (A)_{\mathfrak{R}2} = (M_1)_{\mathfrak{R}1} - \Omega * (A)_{\mathfrak{R}2}$$

$$\Rightarrow (M_2)_{\mathfrak{R}2} - (M_1)_{\mathfrak{R}1} = -\Omega * (A)_{\mathfrak{R}2} + (A)_{\mathfrak{R}2} = (I - \Omega) * (A)_{\mathfrak{R}2}, \text{ ou } I \text{ est la matrice identité.}$$

Nous arrivons ainsi au résultat recherché :

$$\Rightarrow (A)_{\mathfrak{R}2} = (I - \Omega)^{-1} * ((M_2)_{\mathfrak{R}2} - (M_1)_{\mathfrak{R}1}), \text{ avec}$$

$$(I - \Omega)^{-1} = \left(\begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix} \right)^{-1} = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} 1 & \frac{-\sin \omega (t_2 - t_1)}{1 - \cos \omega (t_2 - t_1)} \\ \frac{\sin \omega (t_2 - t_1)}{1 - \cos \omega (t_2 - t_1)} & 1 \end{pmatrix}$$

Si l'on note $\begin{bmatrix} X \\ Y \end{bmatrix}$ les coordonnées de $(A)_{\mathfrak{R}2}$, et $\begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \end{bmatrix}$ les composantes de $((M_2)_{\mathfrak{R}2} - (M_1)_{\mathfrak{R}1})$, alors on peut écrire :

$$X = \frac{\Delta x}{2} - \frac{\sin \omega(t_2 - t_1)}{2 * (1 - \cos \omega(t_2 - t_1))} \Delta y \quad (9) \quad \text{et} \quad Y = \frac{\sin \omega(t_2 - t_1)}{2 * (1 - \cos \omega(t_2 - t_1))} \Delta x + \frac{\Delta y}{2} \quad (10)$$

$\begin{bmatrix} X \\ Y \end{bmatrix}$ représente la position de A dans le repère \mathcal{R}_2 , c'est à dire le décalage du pôle céleste par rapport au télescope, dans le repère de la seconde image. Pour compenser ce décalage, il nous faut donc déplacer les étoiles dans la seconde image de la valeur opposée. En conclusion, pour corriger le défaut d'alignement du télescope, il nous faut déplacer les étoiles de la seconde image d'un vecteur $\begin{bmatrix} X' \\ Y' \end{bmatrix}$, tel que :

$$X' = -\frac{\Delta x}{2} + \frac{\sin \omega(t_2 - t_1)}{2 * (1 - \cos \omega(t_2 - t_1))} \Delta y \quad (11) \quad \text{et} \quad Y' = -\frac{\sin \omega(t_2 - t_1)}{2 * (1 - \cos \omega(t_2 - t_1))} \Delta x - \frac{\Delta y}{2} \quad (12)$$

Ce sont ces équations que nous avons utilisées dans Audela.

Remarque importante : Tout ce calcul suppose que l'on travaille sur des images redressées, c'est à dire conformes au plan du ciel. Si pour une quelconque raison (utilisation d'un renvoi coudé, ou inversion logicielle de l'image) l'image est inversée par une symétrie plane, alors les calculs ci-dessus seront faux : il faudrait remplacer ω par son opposé. De manière générale, il est recommandé de s'assurer que l'image acquise par votre matériel est conforme au ciel. Un moyen simple de vérifier ce point est de comparer vos images avec une carte du ciel.

Note : Il se trouve que dans notre cas, l'angle $\omega(t_2 - t_1)$ est toujours petit : il s'agit de l'angle parcouru par la terre (et la monture) entre les deux images - typiquement quelques degrés. On peut donc faire les approximations suivantes (développement limité au second ordre des fonctions cos et sin) :

$$\cos \alpha = 1 - \frac{\alpha^2}{2} \quad \text{et} \quad \sin \alpha = \alpha$$

Les équations (11) et (12) se simplifient donc ainsi :

$$X' = -\frac{\Delta x}{2} + \frac{\Delta y}{\omega(t_2 - t_1)} \quad (13) \quad \text{et} \quad Y' = -\frac{\Delta x}{\omega(t_2 - t_1)} - \frac{\Delta y}{2} \quad (14)$$

Dans notre application, nous avons choisi de ne pas utiliser ces expressions simplifiées, les expressions exactes (11) et (12) n'apportant pas de complexité particulière pour un ordinateur.

5.6. Correction à apporter si le réglage est fait ultérieurement.

Nous avons vu que la correction à apporter à la monture est exprimée dans le repère de la seconde image, ce qui est cohérent, puisque au moment du calcul, c'est cette image qui est affichée à l'écran. Néanmoins, si l'on attend trop longtemps avant de faire (ou de terminer) le réglage de mise en station, cette correction va légèrement évoluer au cours du temps, et il faudra donc la compenser. On a vu que la trajectoire d'une étoile dans l'image est un cercle ; La compensation va donc consister à faire « tourner » la correction à apporter

d'un angle égal à la rotation de la terre depuis la seconde image. Connaissant la correction $\begin{bmatrix} X \\ Y \end{bmatrix}$ à apporter

au moment de la seconde image (instant t_2), on peut donc en déduire la correction $\begin{bmatrix} X' \\ Y' \end{bmatrix}$ à apporter à un

instant ultérieur t_3 :

$$\begin{bmatrix} X' \\ Y' \end{bmatrix} = \Omega^{-1} * \begin{bmatrix} X \\ Y \end{bmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \omega(t_3 - t_2) & \sin \omega(t_3 - t_2) \\ -\sin \omega(t_3 - t_2) & \cos \omega(t_3 - t_2) \end{pmatrix} * \begin{bmatrix} X \\ Y \end{bmatrix}, \text{ et donc :}$$

$$X' = X \cos \omega(t_3 - t_2) + Y * \sin \omega(t_3 - t_2) \quad (13) \quad \text{et} \quad Y' = Y \cos \omega(t_3 - t_2) - X * \sin \omega(t_3 - t_2) \quad (14)$$

6. Annexe C : Quelques notes techniques sur le logiciel

Avertissement : ce logiciel a été conçu par 2 débutants en Tcl, Tk et Audela. Par conséquent nous sommes conscients que son écriture n'est pas optimale, et que subsistent de nombreuses lourdeurs et maladroites de style. Que l'utilisateur veuille bien nous pardonner...

Le logiciel est conforme à l'exemple de panneau contenu dans la documentation de Audela. En particulier, il est entièrement encapsulé dans un namespace dédié appelé MethKing, à l'exception de la procédure MethKingBuildIF.

Il fait appel à de nombreuses variables globales, toutes étant comprises dans le sous-tableau global panneau(meth_king). En d'autres termes, nous nous sommes réservés les variables du type panneau(meth_king,xxx) bien qu'elles soient globales au niveau Audela. Les autres variables globales utilisées restent définies au niveau du namespace, et sont donc incluses dedans. Elles ne sont donc pas visibles des autres namespaces.