CHAPITRE **3**

ÉCHELLES DE TEMPS

3.1. INTRODUCTION. LE TEMPS ET LES ASTRONOMES

Depuis 1967 la définition de la seconde est entre les mains des physiciens, et non entre celles des astronomes comme ce fut le cas pendant de nombreux siècles. Cependant les éphémérides astronomiques publiées sous les auspices du Bureau des longitudes continuent de porter le même nom depuis leur fondation *La Connaissance des Temps*. Cela suffit à rappeler que si les astronomes ne sont plus les gardiens de l'unité de temps, ils portent toujours un grand intérêt à la définition et aux réalisations de cette grandeur. Il y a à cela au moins deux raisons :

– Dans toutes les étapes de son développement la mécanique céleste utilise pour argument de ses théories le temps uniforme de Newton ou l'un de ses avatars imposé par le choix des coordonnées dans la théorie relativiste de la gravitation. On retrouve ce même argument sous forme quantitative dans la colonne d'entrée des éphémérides. Ces dernières étant destinées soit à comparer des observations à des calculs, soit à préparer des observations, il convient donc de définir le plus correctement possible cet argument et de déterminer les relations qu'il entretient avec les échelles de temps usuelles.

– La seconde SI et l'échelle de Temps atomique international n'ont été introduites qu'en 1972. Les premières horloges à césium datent des années cinquante du vingtième siècle. Pour les années antérieures on ne peut dater des événements dans ces nouvelles échelles et le recours aux temps astronomiques s'impose. Les observations les plus anciennes sont exprimées en temps solaire, d'où la nécessité de conserver la trace de cette échelle et de sa liaison avec le Temps des éphémérides qui est, selon toute vraisemblance, une bonne extrapolation du Temps atomique international dans le passé.

3.2. ÉVOLUTION DES ÉCHELLES DE TEMPS

La complexité de la notion de temps, l'amélioration rapide depuis cinquante ans de la précision avec laquelle on le mesure et les progrès technologiques dans la construction des horloges ont amené les astronomes et les physiciens à définir plusieurs échelles utilisées simultanément. Cette complication sera justifiée dans la suite. Pour le moment donnons un bref aperçu chronologique de l'évolution de la question (Table 3.1).

• La rotation diurne de la Terre autour de son axe a semblé suffisamment uniforme pour qu'on en tirât l'unique échelle de temps alors disponible appelé *Temps universel*, abrégé en TU ou UT (Universal Time). Une autre échelle associée à la rotation de la Terre, le *temps sidéral*, sera étudiée à part (*cf.* 6.5.1).

• La mise en évidence de diverses irrégularités dans la rotation de la Terre amena ensuite les astronomes à introduire, pour le calcul des éphémérides des corps du système solaire, une nouvelle échelle basée sur la révolution de la Terre autour du Soleil appelée *Temps des éphémérides*, abrégé en TE ou ET (Ephemeris Time).

• En 1955 les horloges à césium ont permis aux physiciens de construire une échelle appelée *Temps atomique international*, abrégé en TAI. Cette échelle, proche du TE, en diffère de 32.184 secondes en raison d'un manque de coordination constaté à l'époque entre astronomes et physiciens. Nous retrouverons constamment dans la suite ce décalage intempestif qui n'a aucune justification scientifique et dont il faut bien s'accommoder.

• En 1976 l'augmentation de la précision des observations dans le système solaire, due en particulier à la précision des mesures de distances par radar, ainsi que l'amélioration des théories de mécanique céleste, grâce aux intégrations numériques rapides par ordinateur, ont conduit l'Union Astronomique Internationale (UAI) à définir des échelles de temps tenant compte d'effets relativistes. L'une d'elles est le *Temps dynamique barycentrique* (TDB), échelle de temps-coordonnée destinée à calculer les éphémérides des corps du système solaire dans un système d'axes ayant pour origine le barycentre du système solaire. L'autre est le *Temps dynamique terrestre* (TDT), très voisin du TE et destinée à l'établissement des éphémérides géocentriques apparentes des corps du système solaire. Le TDB et le TDT diffèrent par des termes périodiques et de Poisson de faible amplitude. Ces deux échelles ont été introduites dans le système UAI 1976, adopté à l'assemblée générale de l'UAI à Grenoble en 1976, et utilisées dans les éphémérides nationales à partir de 1984.

• En 1991 au cours de l'assemblée générale de Buenos-Aires, l'UAI a refait les définitions des échelles de temps sur les bases suivantes :

– À tout système de masses dans l'univers peut être associé un système de coordonnées spatio-temporelles centré au barycentre des masses considérées et ne présentant pas de rotations globales par rapport aux galaxies lointaines. La coordonnée du genre temps de ce système est le temps-coordonnée correspondant (TC–), où le tiret figure à la place d'une lettre caractérisant le système considéré. Ainsi pour étudier le mouvement des satellites de Jupiter on pourrait utiliser le *Temps coordonnée jovicentrique* (TCJ), pour le mouvement des satellites de Saturne le *Temps coordonnée saturnocentrique* (TCS) etc.

Les principales de ces nouvelles échelles de temps ont été désignées par l'UAI. Ce sont le *Temps coordonnée barycentrique* (TCB), lié au barycentre du système solaire et le *Temps coordonnée géocentrique* (TCG), lié au centre de la Terre. Le TCB et le TCG diffèrent par des termes séculaires et non pas seulement par des termes périodiques.

– Le TDT est remplacé par le *Temps terrestre* (TT) qui lui est très proche et est donc très proche du TE. Le TT est utilisé pour l'établissement des éphémérides géocentriques apparentes des corps du système solaire. Si l'on compare le système UAI 1976 et le nouveau système, le TDB est remplacé par le TCB mais à la place du TDT on a deux échelles le TCG et le TT. Nous reviendrons plus loin sur ce point.

• Nombreuses sont les échelles ci-dessus qui sont simultanément en usage à l'heure actuelle :

– Le TU pour connaître la position d'un méridien lié à la Terre (celui de Greenwich par exemple) par rapport à la sphère céleste. Le TU subsiste aussi sous la forme UTC (*cf.* 3.5) comme temps en usage dans la vie civile et pour noter les observations.

– Le TE sert encore dans la mesure où l'on utilise des observations de positions d'astres antérieures à l'établissement du TAI.

– Le TDB peut être encore utilisé quand on ne souhaite pas rompre la continuité avec des travaux antérieurs.

– Le TAI est la base des mesures précises de temps et des comparaisons d'horloges. Il sert en pratique à matérialiser le TT. En revanche le TDT disparaît.

– On voit apparaître le TCB et le TCG ainsi, éventuellement, que les temps-coordonnées liés à d'autres systèmes de masses.

Table 3.1. Évolution des échelles de temps.

Époque	Phénomène physique	Définition de la seconde	Échelle de temps
< 1960	Rotation de la Terre	1/86 400 du jour solaire moyen	Temps universel (TU ou UT)
1960-1967	Mouvement orbital de la Terre	1/31 556 925.9747 de l'année tropique 1900.0	Temps des éphémérides (TE ou ET)
> 1967	Transition entre deux niveaux d'un atome	9 192 631 770 périodes d'une transition du césium 133	Temps atomique international (TAI)

3.3. LE TEMPS UNIVERSEL (TU OU UT, UNIVERSAL TIME)

À un instant donné, en un lieu donné l'angle horaire T_v du centre du Soleil est, par définition, le *temps solaire vrai* en ce lieu à cet instant. T_v peut se mettre sous la forme suivante en fonction du temps t d'une échelle de temps uniforme :

$$T_v = A + B\,t - E + \tau,$$

où A et B sont des constantes. E, appelé *équation du temps*, est la somme de l'*équation du centre* de période un an due à l'excentricité de l'orbite terrestre, de la *réduction à l'équateur* de période six mois due à l'obliquité de l'écliptique sur l'équateur et des inégalités du temps sidéral (angle horaire du point γ) dues à la précession et à la nutation. L'amplitude de l'équation du temps peut atteindre 16 minutes. Le terme τ représente des inégalités de la rotation de la Terre autour de son axe qu'il est difficile de modéliser.

On appelle *temps solaire moyen* la grandeur T_m définie par :

$$T_m = T_v + E = A + Bt + \tau.$$

Si, enfin, le lieu est sur le méridien de Greenwich (ou *méridien international*), on appelle *Temps universel* (TU ou UT) la quantité :

$$\mathrm{TU} = T_m + 12\,\mathrm{h} = A + Bt + \tau + 12\,\mathrm{h}.$$

(Il existe une définition plus rigoureuse du Temps universel, à partir du temps sidéral, donnée au chapitre 6).

Le Temps universel est donc un temps uniforme dans la mesure où l'on néglige τ. Or τ contient trois sortes de termes :

– des termes périodiques saisonniers d'amplitude variant de $+0.042\,\mathrm{s}$ au début de juin à $-0.023\,\mathrm{s}$ à la fin de septembre ;

– des fluctuations irrégulières de caractère aléatoire pouvant provoquer des écarts de plusieurs dizaines de secondes ;

– un ralentissement séculaire de la rotation de la Terre qui fait que la durée du jour croît de $0.002\,\mathrm{s}$ par siècle environ.

Ces inégalités ont fait abandonner le TU au profit d'échelles de temps plus uniformes. Cependant il est calculé en permanence par l'*International Earth Rotation Service* (IERS) qui le publie a posteriori sous le nom de UT1. Ce sigle signifie que le pôle qui intervient dans la définition des angles horaires est le pôle céleste vrai de la Terre, mobile à la surface de celle-ci du fait du mouvement du pôle.

UT1 sert à définir l'échelle UTC étudiée plus loin.

On appelle *temps civil* d'un lieu le temps moyen de ce lieu augmenté de douze heures de telle sorte que le temps civil soit égal à 0 h au milieu de la nuit. Ainsi le Temps universel est le temps civil de Greenwich.

Par ailleurs le *temps légal* (on devrait plutôt dire le temps en usage) est le temps utilisé sur tout le territoire d'un pays donné. Il est décidé par les autorités administratives qui choisissent, en général, d'adopter UTC décalé d'un nombre entier d'heures.

3.4. LE TEMPS ATOMIQUE INTERNATIONAL (TAI)

3.4.1. Étalons de fréquence. La seconde SI

Durant la seconde guerre mondiale le développement des radars a considérablement amélioré la technologie des circuits à micro-ondes et des cavités à haute-fréquence. Ces cavités pouvaient être réglées de façon suffisamment précise pour correspondre aux fréquences de transition atomiques et moléculaires dans le domaine centimétrique. En 1948 le U.S. Bureau of Standards était en mesure d'utiliser une cavité ajustée sur une fréquence de transition de l'ammoniac.

Les mêmes principes furent appliqués à des atomes, en particulier au césium 133. En juin 1955 L. Essen et J. V. L. Parry du National Physical Laboratory de Grande Bretagne réalisèrent le premier étalon de fréquence au césium digne de ce nom et portèrent cette précision à quelques 10^{-10}. De 1955 à 1958 fut menée une expérience commune entre le National Physical Laboratory et l'observatoire naval de Washington afin de déterminer la relation entre la fréquence de la transition du césium et la seconde du Temps des éphémérides (*cf.* 3.6) ; la valeur trouvée, de $9\,192\,631\,770 \pm 20$ Hz (en secondes des éphémérides), avait une précision limitée par la qualité de la réalisation du Temps des éphémérides et non par la capacité de lecture de la fréquence.

La treizième Conférence générale des poids et mesures adopta une nouvelle définition de la seconde qui devint l'unité du Système International en 1967 :

La seconde est la durée de 9 192 631 770 périodes de la radiation correspondant à la transition entre les deux niveaux hyperfins de l'état fondamental de l'atome de césium 133.

Des laboratoires spécialisés construisent des étalons de fréquence à césium afin de réaliser au mieux, c'est-à-dire avec la plus grande exactitude, la définition de la seconde. Ces étalons, qualifiés d'étalons primaires, ont une exactitude meilleure que 10^{-13}, atteignant même 2×10^{-14} pour ceux qui contrôlent l'exactitude du Temps atomique international.

3.4.2. Réalisation du Temps atomique international

L'étalon de fréquence permet par accumulation de construire une échelle de temps continue, pour autant que l'horloge ou les horloges qui servent à construire cette échelle aient un fonctionnement continu. Une définition a été proposée en 1970 par le Comité consultatif pour la définition de la seconde (CCDS), approuvée la même année par le Comité international des poids et mesures. Finalement la quatorzième Conférence générale des poids et mesures, en octobre 1971, a défini la référence temporelle, le Temps atomique international :

Le Temps atomique international est la coordonnée de repérage temporel établie par le Bureau international de l'heure sur la base des indications d'horloges atomiques fonctionnant dans divers établissements conformément à la définition de la seconde, unité de temps du Système International d'unités.

Le Bureau international de l'heure a appliqué cette définition et construit une échelle de temps fondée sur l'accumulation des secondes SI. Le TAI est donc une échelle de temps intégrée, contrairement aux échelles dynamiques basées sur un découpage arbitraire d'une échelle d'écoulement.

Il y avait au moins deux choix possibles pour réaliser l'échelle de Temps atomique international :

– soit privilégier une horloge particulière, une horloge étalon à césium, en fonctionnement permanent dont la lecture serait par définition la réalisation du TAI ;

– soit établir l'échelle TAI sur un réseau suffisamment large d'horloges disséminées dans plusieurs laboratoires fournissant leur propre lecture à un centre de coordination. Un algorithme bien défini permet alors de calculer le TAI à partir de ces données. À l'heure actuelle la fabrication du TAI est assurée par le Bureau international des poids et mesures (BIPM) après le transfert en 1985 de la section temps du Bureau international de l'heure (BIH) de l'observatoire de Paris vers le BIPM.

La première solution, qui eut le mérite de la simplicité (TAI attaché à une horloge, en un seul lieu), présentait un danger évident de discontinuité en cas de mauvais fonctionnement, voire de défaillance totale, de l'horloge étalon qui ne présente pas la même garantie d'inaltérabilité que les mouvements célestes. La seconde solution est quasiment exempte de ce risque et permet de plus de bénéficier d'une amélioration statistique en raison de la multiplicité des mesures. En général l'algorithme sera une moyenne pondérée des différentes lectures des horloges participantes. À l'heure actuelle environ 150 horloges contribuent au TAI.

3.4.3. Uniformité du Temps atomique international

Dire qu'une échelle est uniforme suppose l'existence d'une échelle de temps idéale, dont la réalisation satisferait l'idée que chacun se fait de l'uniformité. Cette notion même ne peut être rendue claire sans recours à des concepts plus primitifs. Un élément sur lequel il est aisé de s'entendre est le suivant : deux échelles de temps T1 et T2 ont la même uniformité si elles ne diffèrent que par une dérive linéaire en fonction du temps exprimé par l'une d'entre elles, soit mathématiquement $T_1 = a\,T_2 + b$. Les échelles liées par ce type de relation sont dites équivalentes. En restreignant la question de l'uniformité du TAI à cet aspect on peut fournir une réponse basée sur l'observation. Les comparaisons du TAI et du Temps des éphémérides effectuées depuis trente ans indiquent que l'écart entre les deux échelles est demeuré constant

$$\mathrm{TE} = \mathrm{TAI} + 32.184\,\mathrm{s} = \mathrm{TAI} + 0.000\,3725\,\mathrm{jour}$$

et donc que les deux échelles sont équivalentes, au niveau permis par les erreurs d'observation.

Rien ne dit que la cohérence observée sur trente ans entre le TAI et le TE persistera encore pendant des siècles. Admettons cependant qu'il en aille ainsi. Le Temps des éphémérides est une réalisation du temps newtonien, c'est-à-dire du paramètre t qui figure dans les équations de la mécanique newtonienne. En ce sens il est proche de la réalisation d'une échelle idéale définie à partir de concepts théoriques et satisfait la notion d'uniformité qui y est attachée. L'expérience indique qu'il semble en aller de même pour le TAI puisqu'il ne présente pas de dérive par rapport au Temps des éphémérides. Il sera dès lors possible de prendre le TAI, ou une échelle voisine qui lui est rattachée et qui est corrigée des effets locaux prévus par la théorie de la relativité, pour argument des éphémérides des corps du système solaire.

On ne doit pas être totalement surpris de l'accord observé entre le Temps des éphémérides et le Temps atomique. Le Temps des éphémérides est une réalisation du temps défini par le principe d'inertie, base de la loi fondamentale de la dynamique. De ce fait tout objet mobile dont le mouvement peut être calculé à l'avance dans le cadre de la mécanique newtonienne et dont la position est observable avec une grande précision pourrait théoriquement convenir pour réaliser le Temps des éphémérides. En pratique on se limite au Soleil et à la Lune. Le point important est de posséder une théorie paramétrable dans le cadre de la mécanique newtonienne.

Ce n'est pas le cas du comportement des atomes de césium, dont la théorie relève de la mécanique quantique. Les fréquences de transition font apparaître un temps qui n'est pas directement rattaché au temps de la mécanique. En principe il pourrait être différent, même si pour le moment l'expérience en a décidé autrement. En faveur de cette coïncidence on peut invoquer le principe de correspondance et les équations de Ehrenfest qui régissent l'évolution du centre du paquet d'ondes associé à une particule. Pour les grands nombres quantiques ces équations se confondent avec les équations classiques de Hamilton-Jacobi, donc avec la mécanique newtonienne. La discussion n'est cependant pas complète car en toute rigueur le mouvement du centre du paquet d'ondes quantiques n'obéit pas aux lois de la mécanique classique et le temps qui apparaît dans les équations pourrait au niveau microscopique ne pas être identique au temps de la dynamique.

Finalement la réalisation du Temps atomique à partir des étalons au césium repose sur l'hypothèse, non démentie par l'expérience, de l'invariabilité dans l'espace et dans le temps de la fréquence associée à la transition entre deux niveaux déterminés d'un atome de césium 133 non perturbé.

3.5. LE TEMPS UNIVERSEL COORDONNÉ (UTC, UNIVERSAL TIME COORDINATED)

L'échelle de Temps atomique constituée comme il est indiqué dans les sections précédentes présentait dès l'origine deux défauts pour les utilisateurs.

En premier lieu son origine arbitraire impliquait que la datation d'un événement bien identifié dans cette échelle ne coïncidait pas avec la datation donnée dans une autre échelle, temps solaire ou Temps des éphémérides. Ce n'est pas un défaut bien gênant et il était toujours possible d'y remédier par un choix adapté de l'origine.

En second lieu, l'échelle du Temps atomique étant totalement dissociée des mouvements célestes il s'ensuivait que la durée du jour solaire moyen ne comptait plus exactement 86 400 secondes de TAI. Même en ajustant au mieux la durée de la seconde dans la définition, cet accord à un instant particulier ne pouvait se maintenir en raison des irrégularités de la rotation de la Terre et de son ralentissement séculaire. C'est d'ailleurs ce phénomène, et surtout le fait qu'on ne puisse le prévoir avec suffisamment d'exactitude, qui a conduit à abandonner le mouvement de la Terre comme source du temps uniforme.

Cependant lors du passage du temps astronomique au Temps atomique on a cru bon de ne pas perdre totalement la correspondance entre le temps et l'orientation de la Terre dans l'espace. Pour cela on a créé une échelle de temps, dite du *Temps universel coordonné* (dénomination officielle UTC pour *Universal Time Coordinated*), hybride en ce sens qu'elle possède les qualités d'uniformité du Temps atomique par morceaux, mais qui grâce à des sauts de seconde appropriés permet de maintenir en phase la rotation de la Terre et les horloges des laboratoires. En somme le UTC est une approximation du Temps universel lue sur un garde-temps meilleur que la rotation de la Terre (Fig. 3.1). La rotation de la Terre étant représentée par UT1, on a depuis le 1 janvier 1972 :

$$\mathrm{TAI} - \mathrm{UTC} = \text{n secondes (n est un entier)},$$

$$\mathrm{UT1} - \mathrm{UTC} \leq 0.9 \text{ seconde}.$$

Selon le degré d'urgence, le saut de seconde est placé à la fin de décembre ou de juin, ou à la fin d'un mois quelconque, l'annonce étant faite au moins huit semaines à l'avance. La relation exacte entre UT1 et UTC ne peut être connue qu'avec retard lorsque les mesures de la rotation de la Terre sont publiées. Ceci n'est plus lié à la métrologie du temps, mais bien à l'étude de l'orientation de la Terre dans l'espace, dont la connaissance est tout à fait essentielle à la préparation et au traitement des observations. La table 3.2 donne la différence TAI − UTC selon l'IERS.

Table 3.2. Différence TAI − UTC du 1 janvier 1972 au 1 juillet 1997.

Date début	Date fin	TAI − UTC
1/01/1972	1/07/1972	10 s
1/07/1972	1/01/1973	11 s
1/01/1973	1/01/1974	12 s
1/01/1974	1/01/1975	13 s
1/01/1975	1/01/1976	14 s
1/01/1976	1/01/1977	15 s
1/01/1977	1/01/1978	16 s
1/01/1978	1/01/1979	17 s
1/01/1979	1/01/1980	18 s
1/01/1980	1/07/1981	19 s
1/07/1981	1/07/1982	20 s
1/07/1982	1/07/1983	21 s
1/07/1983	1/07/1985	22 s
1/07/1985	1/01/1988	23 s
1/01/1988	1/01/1990	24 s
1/01/1990	1/01/1991	25 s
1/01/1991	1/07/1992	26 s
1/07/1992	1/07/1993	27 s
1/07/1993	1/07/1994	28 s
1/07/1994	1/01/1996	29 s
1/01/1996	1/07/1997	30 s
1/07/1997		31 s

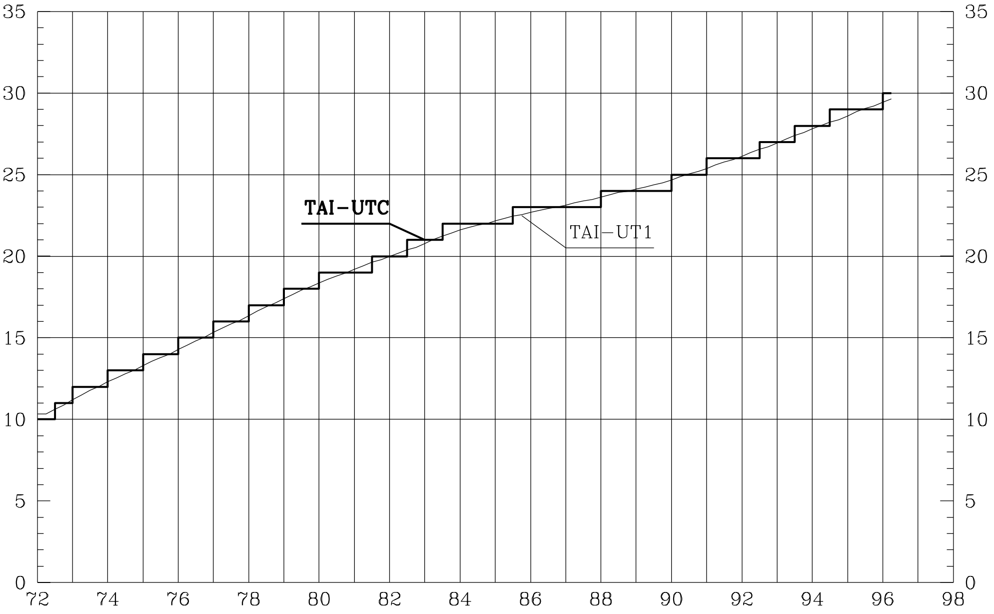

Fig. 3.1. Différence TAI − UTC et différence observée TAI − UT1, en secondes, de 1972 à 1996.

3.6. LE TEMPS DES ÉPHÉMÉRIDES (TE OU ET, EPHEMERIS TIME)

La loi de Newton et le principe d'inertie supposent l'existence d'un temps absolu, uniforme, préexistant à la matière. Un mouvement n'étant uniforme que vis-à-vis d'une échelle de temps particulière, il est clair que l'on ne peut définir le mouvement uniforme sans être en possession au préalable d'une échelle de temps définie sans relation avec le mouvement. Une solution consiste à reconnaître un mouvement uniforme a priori (absence de forces agissant sur le mobile, par exemple) et à mesurer le temps uniforme en découpant le mouvement par des longueurs égales. C'est au travers de ce principe qu'ont été introduits les temps dynamiques : on admet la loi temporelle du mouvement calculée à partir d'un modèle de force et de la loi de la dynamique de Newton.

Le Temps des éphémérides est un temps dynamique de la mécanique newtonienne. La théorie mise en œuvre est celle du mouvement orbital de la Terre autour du Soleil avec le modèle de force le plus complet et le plus exact possible. L'observation donne la position angulaire du Soleil dans un système de référence inertiel. L'équation de définition est l'expression numérique de la longitude géométrique moyenne du Soleil résultant des travaux de Newcomb. En 1952 l'Union Astronomique Internationale a adopté l'expression numérique, exacte par définition :

$$L_0 = 279°41'48''.04 + 129\,602\,768''.13\,T + 1''.089\,T^2,$$

où T désigne l'échelle du Temps des éphémérides mesurée en siècles juliens de 36 525 jours des éphémérides depuis l'instant (proche de 1900.0) correspondant à l'événement :

$$T = 0 \text{ soit } L_0 = 279°41'48''.04 = 279°.696\,677\,77.$$

La date des éphémérides associée à $T = 0$ est :

$$\text{TE} = 0.5 \text{ janvier } 1900 = 2\,415\,020.0 \text{ jour julien des éphémérides.}$$

Cette définition contient celle de la seconde en raison de la présence d'un moyen mouvement. La onzième Conférence des poids et mesures décida en 1960 que :

La seconde est la fraction 1/31 556 925.9747 de l'année tropique pour le 0 janvier 1900 à 12 h du Temps des éphémérides.

Cette définition, difficile à réaliser en pratique à une date éloignée de l'origine et fort délicate à comprendre hors du cercle des astronomes spécialisés, disparut en 1967 en temps qu'unité du Système International d'unités au profit de la définition fondée sur le césium 133.

Idéalement, pour réaliser le Temps des éphémérides il faut observer la longitude du Soleil, effectuer toutes les corrections permettant d'en déterminer la longitude géométrique moyenne, puis résoudre l'équation de définition pour l'inconnue T. Mathématiquement il y a de nombreuses solutions, mais un encadrement préalable au moyen d'un garde-temps permet d'aboutir à une solution unique. Avec une précision typique de $0''.5$ sur la détermination de la longitude du Soleil, on obtiendrait une incertitude de 12 s sur la lecture de l'horloge céleste. Heureusement on n'avait recours au Soleil (et à la Lune dont le mouvement est treize fois plus rapide) que pour des mesures d'intervalles longs.

Puisqu'on est amené à rejeter l'échelle TU, insuffisamment uniforme, le TE est la seule échelle de temps uniforme disponible pour dater les observations des corps du système solaire faites avant l'introduction du TAI. Les définitions des nouvelles échelles assurent la continuité du TDT, puis du TT, avec le TE pour les époques antérieures à 1955, compte tenu de la précision des observations des planètes et des satellites. Elles assurent également la continuité du TE avec le TDB puisque, comme nous le verrons, TDB et TDT diffèrent de termes périodiques d'amplitudes inférieures à 1.7 millième de seconde. En revanche comme TCB et TCG ont des variations séculaires par rapport à TT il y a une discontinuité entre TE et ces deux échelles que nous retrouverons dans les tables données plus loin.

3.7. LE TEMPS TERRESTRE (TT)

L'échelle de *Temps terrestre* (TT) est l'échelle de temps utilisée pour les éphémérides géocentriques apparentes. À la date du 1 janvier 1977 à 0 h TAI, TT a pour valeur 1 janvier 1977, 0 h 0 min 32.184 s. L'unité de temps de l'échelle TT est la seconde SI sur le géoïde. L'échelle TT est une échelle de temps idéale dont la réalisation pratique est liée au TAI. On peut donc écrire :

$$\text{TT} = \text{TE} = \text{TAI} + 32.184\,\text{s}.$$

Entre 1976 et 1991 l'échelle TT avait été introduite sous le nom de *Temps dynamique terrestre* (TDT). Le mot *dynamique* n'était pas heureux. Par ailleurs on avait tendance à confondre le TDT avec le temps propre au centre de la Terre, c'est pourquoi on a introduit, d'une part l'échelle de temps TT, temps-coordonnée d'un système de référence lié au géoïde et, d'autre part, la nouvelle échelle TCG dont il sera question au paragraphe suivant.

3.8. LES ÉCHELLES TDB, TCB ET TCG

La théorie de la relativité et la précision atteinte aujourd'hui dans les observations amènent à distinguer les échelles de temps dynamiques selon qu'elles sont considérées comme échelles de temps-coordonnée ou comme échelles de temps propre. On présente ici les calculs qui établissent la relation entre ces échelles. Soit le système de coordonnées barycentriques dans lequel la métrique de l'espace-temps dans le système solaire, en utilisant la convention de sommation d'Einstein (voir 4.1.1), prend la forme :

$$\mathrm{d}s^2 = g_{\alpha\beta}\,\mathrm{d}x^\alpha\,\mathrm{d}x^\beta,$$

où

$$\begin{aligned} g_{00} &= -\left(1 - \frac{2U}{c^2}\right) + 0\left(c^{-4}\right), \\ g_{0i} &= 0\left(c^{-3}\right), \\ g_{kl} &= \delta_{kl}\left(1 + \frac{2U}{c^2}\right) + 0\left(c^{-4}\right), \end{aligned}$$

sont solutions des équations d'Einstein, δ_{ki} est le symbole de Kronecker, égal à 0 si $k \neq i$ et à 1 si $k = i$. Dans les expressions ci-dessus U est le potentiel newtonien produit au point $M(x^i)$ par les planètes, de masses m_p et de vecteurs positions $\mathbf{r}_p$:

$$U = \sum_p \frac{G\,m_p}{\mid \mathbf{r} - \mathbf{r}_p \mid}.$$

c est la vitesse de la lumière (c = 299 792 458 ms^{-1}). Rappelons que l'on ne doit pas attacher de signification particulière aux coordonnées x^α ; il ne s'agit au départ que de quatre quantités permettant d'étiqueter un point de l'espace-temps et il y a une grande liberté dans leur choix. Cependant, au travers de l'interprétation des mesures et de la comparaison aux modèles paramétrés par ces coordonnées, on finit par leur donner une signification plus physique en terme de distance, instant d'arrivée d'un signal, etc. Par exemple la coordonnée x^0, divisée par la vitesse de la lumière c, est le temps t qui serait indiqué par une horloge au repos par rapport au barycentre du système solaire et infiniment éloignée des planètes. C'est ce temps qui a été introduit dans le système UAI 1976 sous le nom de TDB. Ce temps, appelé temps-coordonnée, diffère de celui lu sur une horloge atomique dans un laboratoire, laquelle fournit un temps propre τ. Le TAI d'un autre côté est construit pour être une coordonnée de repérage temporel mais qui ne coïncide pas avec le x^0/c de la métrique ci-dessus.

Partons de la métrique

$$\mathrm{d}s^2 = -\left(1 - \frac{2U}{c^2}\right) c^2\, \mathrm{d}t^2 + \left(1 + \frac{2U}{c^2}\right) \left[\left(\mathrm{d}x^1\right)^2 + \left(\mathrm{d}x^2\right)^2 + \left(\mathrm{d}x^3\right)^2\right].$$

L'intervalle de temps propre $\mathrm{d}\tau$ entre deux événements de l'espace-temps séparés par $\mathrm{d}t$ et $\mathrm{d}x^i$ est donné par :

$$\mathrm{d}\tau^2 = -\frac{\mathrm{d}s^2}{c^2} = \left(1 - \frac{2U}{c^2}\right) \mathrm{d}t^2 - \left(1 + \frac{2U}{c^2}\right) \frac{v^2}{c^2}\mathrm{d}t^2,$$

où

$$v^2 = \sum_{i=1}^{3} \left(\dot{x}^i\right)^2.$$

v est la vitesse-coordonnée de l'horloge attachée à ces deux événements. À l'ordre $O(c^{-2})$ on obtient sans difficulté :

$$\mathrm{d}t = \frac{\mathrm{d}\tau}{\left[1 - \dfrac{U}{c^2} - \dfrac{v^2}{2c^2}\right]}$$

qui conduit par intégration à l'équation suivante :

$$t - \tau = \int_0^t \left[\frac{U}{c^2} + \frac{v^2}{2c^2}\right] \mathrm{d}t. \tag{3.1}$$

Pour intégrer cette équation il faut tout d'abord particulariser le mouvement de l'horloge par une trajectoire paramétrée au moyen des coordonnées t et x^i, puis exprimer le potentiel $U(r)$ en chaque point.

Il faut distinguer deux étapes dans l'élaboration par l'UAI d'échelles de temps tenant compte d'effets relativistes :

• Dans le système UAI 1976 le TDB était le temps-coordonnée x^0/c lié au système de référence ayant pour origine le barycentre du système solaire. Il était défini par rapport au TDT, dont on a parlé plus haut, par :

$$\mathrm{TDB} = \mathrm{TDT} + P,$$

où P est l'intégrale (3.1) ci-dessus dépouillée de ses termes séculaires. On voit que TDB, selon le vœu émis par l'UAI, ne diffère de TDT que par des termes périodiques.

• Dans le système recommandé par l'UAI en 1991, le TDB est remplacé par le TCB défini par rapport au TT (nouveau nom du TDT) par :

$$\mathrm{TCB} = \mathrm{TT} + P + k\,(J - 2\,443\,144.5),$$

où k est une constante dont la valeur est donnée au paragraphe suivant et J la date julienne de l'époque considérée.

On voit donc apparaître un terme séculaire dans la différence TCB $-$ TT. Ceci permet de corriger les effets fâcheux des définitions précédentes.

En effet la contrainte imposée en 1976 qui voulait que cette différence ne contînt que des termes périodiques est artificielle car un terme séculaire n'est souvent qu'un terme périodique à longue période considéré sur un court intervalle de temps. Différents choix conduiraient à différentes relations entre TDB et TT. Ceci est particulièrement évident dans le cas où l'on effectue des intégrations numériques des mouvements car ôter les termes séculaires ne peut se faire qu'en effectuant des moyennes sur des intervalles de temps dont la longueur est arbitrairement choisie.

Une difficulté supplémentaire apparaît si l'on exige de ne conserver que les termes périodiques dans la différence TDB − TDT. En effet ne pas tenir compte des termes séculaires revient à ne pas utiliser la même unité de temps dans l'échelle TDB et dans l'échelle TDT. La seconde s_B associée à l'échelle TDB est plus longue que la seconde de TDT (égale à la seconde SI). Compte tenu des nombres figurant dans le paragraphe suivant on voit que :

$$s_B = \left(1 + 1.550\,519\,748 \times 10^{-8}\right)\ SI.$$

Comme on veut que la vitesse de la lumière c soit une constante de définition dont la valeur est la même dans tous les systèmes de coordonnées, il en résulte que le mètre m_B associé à l'échelle TDB est plus long que le mètre terrestre m et l'on a :

$$m_B = \left(1 + 1.550\,519\,748 \times 10^{-8}\right)\ m.$$

Par conséquent la valeur des constantes astronomiques dépend du système de référence considéré. La nouvelle échelle TCB permet d'éviter cet inconvénient.

Enfin le temps-coordonnée lié au système spatio-temporel géocentrique est le *Temps coordonnée géocentrique* (TCG) qui diffère du TT par un terme séculaire.

3.9. RELATIONS ENTRE LES DIFFÉRENTES ÉCHELLES DE TEMPS

Les différentes échelles de temps étudiées ci-dessus sont liées par les relations suivantes (IAUWG, 1992) :

$$\mathrm{TT} = \mathrm{TDT} = \mathrm{TE} = \mathrm{TAI} + 32.184\,\mathrm{s}$$

$$\mathrm{TDB} = \mathrm{TDT} + P = \mathrm{TT} + P$$

$$\mathrm{TCG} - \mathrm{TT} = 6.969\,2904 \cdots \times 10^{-10}\,(J - 2\,443\,144.5)\ 86\,400\,\mathrm{s}$$

$$\mathrm{TCB} - \mathrm{TCG} = 1.480\,826\,844 \cdots \times 10^{-8}\,(J - 2\,443\,144.5)\ 86\,400\,\mathrm{s} + \frac{\mathbf{v_e}\,(\mathbf{x} - \mathbf{x_e})}{c^2} + P$$

$$\mathrm{TCB} - \mathrm{TDB} = 1.550\,519\,748 \cdots \times 10^{-8}\,(\mathrm{J} - 2\,443\,144.5)\ 86\,400\,\mathrm{s}\,.$$

Dans ces formules c est la vitesse de la lumière, $\mathbf{x_e}$ et $\mathbf{v_e}$ étant les vecteurs position et vitesse barycentriques du centre des masses de la Terre et $\mathbf{x}$ le vecteur position barycentrique de l'observateur, ($\mathbf{x} - \mathbf{x_e}$ est donc le vecteur position géocentrique de l'observateur). On calcule facilement qu'à la surface de la Terre le terme correctif correspondant dans l'expression de TCB − TCG est de l'ordre de 2×10^{-6} secondes.

Dans la table 3.3 figurent les principaux termes de la série P calculés par Fairhead et Bretagnon (1990). Cette série a la forme :

$$P = \sum_{\alpha} \mathrm{TDB}^{\alpha} \left[\sum_{i} A_i^{\alpha} \sin\left(\nu_i^{\alpha}\,\mathrm{TDB} + \psi_i^{\alpha}\right) \right] \tag{3.2}$$

où TDB est le Temps dynamique barycentrique exprimé en siècles juliens de 36 525 jours écoulés depuis l'époque J2000. Les coefficients A_i^{α} sont exprimés en secondes. La table 3.3 contient tous les termes dont l'amplitude est supérieure à 0.1 ns sur une durée d'un siècle. Elle assure une précision d'une nanoseconde sur la transformation TDB⇔TT. Elle contient 474 termes périodiques (α=0), 81 termes en $t \sin t$ (α=1), 6 termes en $t^2 \sin t$ (α=2) et un terme en $t^3 \sin t$ (α=3). Notons que le deuxième terme de la série en $t^2 \sin t$ a une fréquence nulle et est donc, en réalité, un terme en t^2.

3.10. BIBLIOGRAPHIE

Brumberg, V.A. : 1991, *Essential relativistic celestial mechanics*, Adam Hilger, Bristol, Philadelphia and New-York.

Danjon, A. : 1953, *Astronomie générale*, Sennac éd., Paris, réédité en 1980, Blanchard éd.

Fairhead, L., Bretagnon, P. : 1990, An analytical formula for the time transformation TB–TT, *Astron. Astrophys.* **229**, 240.

Guinot, B. : 1989, General principles of the measure of time : astronomical time, in *Reference frames in astronomy and geophysics*, J. Kovalevsky, I.I. Mueller and B. Kolaczek eds., Kluwer, Dordrecht.

IAUWG : 1977, Joint report of the working group of IAU commission 4 on precession, planetary ephemerides, units and time scales, *Trans. IAU*, **XVI B**, Reidel, Dordrecht, 56.

IAUWG : 1992, Recommendations from the working group on reference systems. Resolution A4, *Trans. IAU*, **XXI B**, Reidel, Dordrecht.

Seidelmann, P.K., Fukushima, T. : 1992, Why new time scales ?, *Astron. Astrophys.* **265**, 833.

Soffel, M.H. : 1989, Relativity in astrometry, *Celestial mechanics and geodesy*, Springer-Verlag.

USNO : 1992, *Explanatory supplement to the Astronomical Almanac*, P.K. Seidelmann ed., University science books, Mill Valley, California.

Table 3.3. Différence $P = \mathrm{TDB} - \mathrm{TT}$ sous la forme (3.2), d'après Fairhead et Bretagnon (1990).

i	α	A_i^α (μs)	ν_i^α (rad/siècle)	ψ_i^α (rad)	Période (années)	i	α	A_i^α (μs)	ν_i^α (rad/siècle)	ψ_i^α (rad)	Période (années)
1	0	1656.674564	628.3075850	6.2400542	1.00	49	0	0.040184	−0.7113547	3.5659756	883.27
2	0	22.417471	575.3384885	4.2969774	1.09	50	0	0.036955	315.4687085	5.0718014	1.99
3	0	13.839792	1256.6151700	6.1969044	0.50	51	0	0.036564	508.8628840	3.3246790	1.23
4	0	4.770086	52.9690965	0.4444016	11.86	52	0	0.036507	80.1820931	6.2488660	7.84
5	0	4.676740	606.9776755	4.0211951	1.04	53	0	0.034867	52.2577418	5.2100641	12.02
6	0	2.256707	21.3299095	5.5431133	29.46	54	0	0.033529	943.7762935	2.4047142	0.67
7	0	1.694205	−0.3523118	5.0251327	1783.42	55	0	0.033477	606.2663208	4.1449873	1.04
8	0	1.554905	7771.3771468	5.1984666	0.08	56	0	0.032438	607.6890302	0.7493174	1.03
9	0	1.276839	786.0419392	5.9888223	0.80	57	0	0.032423	882.7390270	5.5414736	0.71
10	0	1.193379	522.3693920	3.6498237	1.20	58	0	0.030215	708.4896781	3.3896103	0.89
11	0	1.115322	393.0209696	1.4227451	1.60	59	0	0.029862	1213.9553509	1.7701810	0.52
12	0	0.794185	1150.6769770	2.3223131	0.55	60	0	0.029247	−7143.0695618	4.1831792	0.09
13	0	0.600309	157.7343542	2.6782719	3.98	61	0	0.028244	−628.6598968	5.0696635	1.00
14	0	0.496817	620.8294251	5.6967018	1.01	62	0	0.027567	627.9552732	5.0408460	1.00
15	0	0.486306	588.4926847	0.5200072	1.07	63	0	0.025196	174.8016413	2.9018833	3.59
16	0	0.468597	624.4942814	5.8663988	1.01	64	0	0.024816	−119.4447010	1.0871369	5.26
17	0	0.447061	2.6298320	3.6157965	238.92	65	0	0.022567	613.3512653	3.3079848	1.02
18	0	0.435206	−39.8149003	4.3493383	15.78	66	0	0.022509	1044.7387840	1.4607262	0.60
19	0	0.432392	7.4781599	2.4358983	84.02	67	0	0.021691	1414.3495242	5.9526580	0.44
20	0	0.375510	550.7553239	4.1034768	1.14	68	0	0.020937	842.9241266	0.6523034	0.75
21	0	0.243085	−77.5522611	3.6518379	8.10	69	0	0.020322	41.9484644	3.7354306	14.98
22	0	0.230685	585.6477659	4.7738526	1.07	70	0	0.017806	7.3297126	3.4759751	85.72
23	0	0.203747	1203.6460735	4.3339878	0.52	71	0	0.017673	681.2766815	3.1861298	0.92
24	0	0.173435	1884.9227550	6.1537435	0.33	72	0	0.016155	1021.3285546	1.3311032	0.62
25	0	0.159080	1097.7078805	1.8900752	0.57	73	0	0.015974	−235.2866154	6.1453094	2.67
26	0	0.143935	−79.6298007	5.9575178	7.89	74	0	0.015949	−22.0412642	4.0052983	28.51
27	0	0.137927	1179.0629089	1.1359347	0.53	75	0	0.015078	1965.1048481	3.9694808	0.32
28	0	0.119979	3.8133036	4.5515858	164.77	76	0	0.014751	134.9867410	4.3089333	4.65
29	0	0.118971	548.6777843	1.9145472	1.15	77	0	0.014318	1673.0463690	3.0160581	0.38
30	0	0.116120	105.9381930	0.8735041	5.93	78	0	0.014223	1778.9845620	2.1045513	0.35
31	0	0.101868	−557.3142802	5.9845034	1.13	79	0	0.013671	−53.6804512	5.9716726	11.70
32	0	0.098358	254.4314420	0.0927939	2.47	80	0	0.012462	10.3092774	1.7374388	60.95
33	0	0.080164	20.6185548	2.0953777	30.47	81	0	0.012420	469.0479836	4.7340904	1.34
34	0	0.079645	469.4002955	2.9492336	1.34	82	0	0.011942	803.1092263	2.0534147	0.78
35	0	0.075019	294.2463423	4.9809318	2.14	83	0	0.011847	564.3178564	5.4890054	1.11
36	0	0.064397	574.6271338	1.2803087	1.09	84	0	0.011707	−470.5732308	2.6541256	1.34
37	0	0.063814	576.0498432	4.1679017	1.09	85	0	0.011622	512.0601146	4.8639319	1.23
38	0	0.062617	2.0775395	2.6543948	302.43	86	0	0.010962	0.3590429	2.1965677	1749.98
39	0	0.058844	42.6598191	4.8396501	14.73	87	0	0.010825	55.3569403	0.8427150	11.35
40	0	0.054139	1726.0154655	3.4110911	0.36	88	0	0.010453	586.3591206	1.9137046	1.07
41	0	0.048373	15.5420399	2.2515737	40.43	89	0	0.010396	95.1718406	5.7177996	6.60
42	0	0.048042	214.6165416	1.4958460	2.93	90	0	0.010099	28.3859319	1.9421770	22.13
43	0	0.046551	−0.0980321	0.9215735	6409.31	91	0	0.009963	14.9563197	4.8706906	42.01
44	0	0.042732	63.2783739	5.7206222	9.93	92	0	0.009858	630.9374170	1.0618164	1.00
45	0	0.042560	16100.0685737	1.2708372	0.04	93	0	0.009370	14985.4400134	0.6738790	0.04
46	0	0.042411	627.5962303	2.8695670	1.00	94	0	0.008666	−13.5065080	3.2934065	46.52
47	0	0.040759	1235.2852605	3.9814970	0.51	95	0	0.008610	334.0612427	3.6616989	1.88
48	0	0.040480	1572.0838785	2.5466101	0.40	96	0	0.008323	1176.9853693	1.2293920	0.53

Table 3.3. (suite).

i	α	A_i^α (μs)	ν_i^α (rad/siècle)	ψ_i^α (rad)	Période (années)	i	α	A_i^α (μs)	ν_i^α (rad/siècle)	ψ_i^α (rad)	Période (années)
97	0	0.008 107	1 336.797 2631	3.793 2353	0.47	145	0	0.002 954	−628.300 8540	4.533 4712	1.00
98	0	0.007 959	31.639 1870	2.465 0426	19.86	146	0	0.002 954	628.314 3160	4.447 2038	1.00
99	0	0.007 857	1 216.800 2697	0.525 7335	0.52	147	0	0.002 881	73.587 6514	0.349 2503	8.54
100	0	0.007 505	523.080 7467	4.920 9370	1.20	148	0	0.002 872	2.844 9187	1.158 6930	220.86
101	0	0.007 490	−625.677 7530	3.658 4447	1.00	149	0	0.002 863	1 729.818 2327	5.240 9638	0.36
102	0	0.007 332	3.664 8563	0.114 8587	171.44	150	0	0.002 775	991.769 6875	1.030 0263	0.63
103	0	0.007 147	−24.272 8604	3.661 4870	25.89	151	0	0.002 740	1 831.953 6585	4.320 5195	0.34
104	0	0.007 117	3.802 7673	5.294 2495	165.23	152	0	0.002 646	1 097.355 5686	3.918 2592	0.57
105	0	0.007 019	620.680 9779	0.837 6888	1.01	153	0	0.002 575	2 513.230 3400	6.109 6590	0.25
106	0	0.006 919	668.122 4853	6.018 5015	0.94	154	0	0.002 493	638.616 8624	0.645 0265	0.98
107	0	0.006 858	521.658 0373	0.642 0633	1.20	155	0	0.002 464	20.225 3395	4.698 2031	31.07
108	0	0.006 826	763.294 3260	3.458 6541	0.82	156	0	0.002 409	0.254 2797	5.325 0093	2470.97
109	0	0.006 731	565.029 2111	5.639 9066	1.11	157	0	0.002 401	1 620.077 2725	2.605 5471	0.39
110	0	0.006 603	2 358.125 8177	5.393 1369	0.27	158	0	0.002 397	624.345 8342	3.809 2900	1.01
111	0	0.006 366	416.431 1990	2.262 0818	1.51	159	0	0.002 381	6.373 5898	0.759 1882	98.58
112	0	0.006 304	1 192.625 4414	2.512 9292	0.53	160	0	0.002 366	0.393 2153	6.215 8854	1597.90
113	0	0.006 056	95.559 9742	4.194 5351	6.58	161	0	0.002 353	63.989 7286	3.734 5481	9.82
114	0	0.005 680	2 301.353 9540	4.557 8148	0.27	162	0	0.002 353	624.642 7287	4.781 7198	1.01
115	0	0.005 582	596.668 3980	2.246 1743	1.05	163	0	0.002 303	1 807.370 4939	1.089 1004	0.35
116	0	0.005 488	−0.345 5808	0.090 6754	1818.15	164	0	0.002 303	8 399.684 7318	2.013 6864	0.07
117	0	0.005 308	−159.259 6014	2.500 3824	3.95	165	0	0.002 296	649.637 4945	5.061 8107	0.97
118	0	0.005 123	−0.148 4473	2.999 6410	4232.60	166	0	0.002 229	49.155 7929	1.571 0071	12.78
119	0	0.005 119	643.849 6249	1.486 5392	0.98	167	0	0.002 199	−24.583 1646	5.956 1523	25.56
120	0	0.005 096	1 137.170 4690	2.547 1078	0.55	168	0	0.002 186	45.490 9367	1.402 1015	13.81
121	0	0.004 892	543.699 3015	1.475 4156	1.16	169	0	0.002 183	116.247 4704	6.179 6117	5.41
122	0	0.004 841	533.390 0241	0.437 0781	1.18	170	0	0.002 169	1 101.510 6477	4.845 2977	0.57
123	0	0.004 648	158.907 2895	1.275 8471	3.95	171	0	0.002 103	−707.937 3857	5.756 6416	0.89
124	0	0.004 553	1 149.965 6223	5.554 9983	0.55	172	0	0.002 085	3.516 4090	1.405 1585	178.68
125	0	0.004 521	429.233 0833	6.140 6358	1.46	173	0	0.002 024	1 471.231 7116	2.752 0359	0.43
126	0	0.004 349	1 151.388 3317	2.181 7454	0.55	174	0	0.001 897	2 248.384 8574	4.167 9325	0.28
127	0	0.004 193	723.479 4256	4.869 0914	0.87	175	0	0.001 896	−312.838 8765	4.914 2316	2.01
128	0	0.004 164	1 249.137 0101	5.650 9319	0.50	176	0	0.001 894	105.226 8383	5.817 1674	5.97
129	0	0.004 148	−11.020 6321	3.016 1734	57.01	177	0	0.001 847	1 087.398 6030	2.903 4779	0.58
130	0	0.004 080	−705.859 8461	3.690 3601	0.89	178	0	0.001 825	−373.876 1430	0.545 8288	1.68
131	0	0.004 044	473.203 0627	1.398 7848	1.33	179	0	0.001 810	−8 886.005 7071	0.487 3548	0.07
132	0	0.003 919	1 252.801 8664	5.823 3197	0.50	180	0	0.001 745	24 428.760 0007	3.626 3952	0.03
133	0	0.003 742	723.867 5592	4.691 9762	0.87	181	0	0.001 737	629.018 9397	5.280 8201	1.00
134	0	0.003 625	620.977 8724	1.473 7606	1.01	182	0	0.001 729	389.418 1830	1.264 9766	1.61
135	0	0.003 500	26.308 3923	1.892 1007	23.88	183	0	0.001 649	3 144.167 7570	1.952 0493	0.20
136	0	0.003 354	−9 095.555 1695	1.942 6562	0.07	184	0	0.001 602	1 431.416 8113	4.203 6648	0.44
137	0	0.003 279	584.936 4112	4.893 3844	1.07	185	0	0.001 472	459.091 0180	4.164 9133	1.37
138	0	0.003 270	7.626 6071	1.517 1899	82.39	186	0	0.001 421	2.035 5319	2.419 8866	308.68
139	0	0.003 202	2 751.146 7874	0.531 6731	0.23	187	0	0.001 416	922.553 9273	4.996 4084	0.68
140	0	0.003 129	683.664 5253	0.003 8441	0.92	188	0	0.001 408	1 098.419 2352	2.732 0848	0.57
141	0	0.003 074	94.917 5609	5.185 8787	6.62	189	0	0.001 391	−863.594 2004	0.593 8915	0.73
142	0	0.003 053	23 314.131 4403	3.029 0293	0.03	190	0	0.001 388	−0.704 6237	1.166 1459	891.71
143	0	0.003 024	8 328.691 4270	2.355 5561	0.08	191	0	0.001 376	1 096.996 5258	5.152 9143	0.57
144	0	0.003 002	617.286 9529	2.797 8228	1.02	192	0	0.001 335	−26.660 7042	3.995 7640	23.57

Table 3.3. (suite).

i	α	A_i^α (μs)	ν_i^α (rad/siècle)	ψ_i^α (rad)	Période (années)	i	α	A_i^α (μs)	ν_i^α (rad/siècle)	ψ_i^α (rad)	Période (années)
193	0	0.001 321	1 820.933 0264	2.624 8664	0.35	241	0	0.000 674	1 494.531 6174	6.270 5105	0.42
194	0	0.001 297	2 122.839 2024	0.382 6035	0.30	242	0	0.000 673	106.649 5477	3.876 5124	5.89
195	0	0.001 297	2 354.323 0505	3.063 8052	0.27	243	0	0.000 662	2 515.860 1720	1.794 0584	0.25
196	0	0.001 288	−199.074 5017	3.913 0229	3.16	244	0	0.000 660	62.567 0192	5.864 0919	10.04
197	0	0.001 284	1 057.540 6683	5.306 5382	0.59	245	0	0.000 647	1 185.621 8652	3.397 1331	0.53
198	0	0.001 278	7.181 2653	4.713 4865	87.49	246	0	0.000 646	1 140.367 6996	3.852 9595	0.55
199	0	0.001 238	480.420 9276	5.503 3797	1.31	247	0	0.000 641	8 346.715 6353	3.210 7273	0.08
200	0	0.001 176	27.703 4994	3.335 5190	22.68	248	0	0.000 631	576.761 1979	4.026 5323	1.09
201	0	0.001 169	604.034 7246	5.841 7190	1.04	249	0	0.000 630	3.602 7867	0.156 3685	174.40
202	0	0.001 155	−1.422 7094	3.042 7008	441.64	250	0	0.000 618	2 200.391 4635	2.466 4270	0.29
203	0	0.001 145	605.873 1054	1.169 4839	1.04	251	0	0.000 611	−14 357.132 4284	2.424 9797	0.04
204	0	0.001 077	17.516 6060	1.844 9131	35.87	252	0	0.000 609	1 017.725 7680	0.437 1223	0.62
205	0	0.001 070	−15 471.760 9887	1.827 6245	0.04	253	0	0.000 607	−3.961 7508	2.839 0216	158.60
206	0	0.001 039	554.008 5789	2.769 7535	1.13	254	0	0.000 603	−6 514.761 9768	4.140 0836	0.10
207	0	0.001 004	−17.067 2871	0.755 0081	36.81	255	0	0.000 601	41.237 1097	3.984 2254	15.24
208	0	0.000 991	470.111 6502	4.387 0018	1.34	256	0	0.000 576	1 108.728 5126	4.760 2931	0.57
209	0	0.000 987	−626.230 0454	2.656 4870	1.00	257	0	0.000 575	1 204.357 4282	4.216 4924	0.52
210	0	0.000 979	554.719 9336	5.448 3760	1.13	258	0	0.000 574	7 214.062 8666	1.758 1909	0.09
211	0	0.000 954	628.209 5529	0.882 2135	1.00	259	0	0.000 567	363.462 1025	1.649 2647	1.73
212	0	0.000 954	−628.405 6171	0.968 4809	1.00	260	0	0.000 559	1 119.037 7900	5.783 2364	0.56
213	0	0.000 940	603.724 4204	6.197 4281	1.04	261	0	0.000 553	1 241.658 8503	4.772 1580	0.51
214	0	0.000 908	13.154 1962	2.521 2575	47.77	262	0	0.000 550	490.730 2050	0.864 0243	1.28
215	0	0.000 907	3 537.188 7266	3.370 1960	0.18	263	0	0.000 531	648.926 1398	1.681 8888	0.97
216	0	0.000 890	1 391.601 9110	5.601 4983	0.45	264	0	0.000 520	3 930.209 6962	4.788 0029	0.16
217	0	0.000 885	1 171.295 5318	3.280 4149	0.54	265	0	0.000 520	1 034.429 5065	2.445 5978	0.61
218	0	0.000 884	−155.104 5223	1.088 8317	4.05	266	0	0.000 515	1 863.592 8455	3.945 3459	0.34
219	0	0.000 876	501.750 8371	3.969 9026	1.25	267	0	0.000 509	84.608 2835	3.053 8746	7.43
220	0	0.000 852	19.907 2001	2.189 6050	31.56	268	0	0.000 495	734.245 7780	3.817 2858	0.86
221	0	0.000 845	−43.371 1738	4.749 2452	14.49	269	0	0.000 494	962.368 8277	3.022 6451	0.65
222	0	0.000 819	866.224 0324	5.991 2478	0.73	270	0	0.000 493	1 842.262 9359	1.676 9393	0.34
223	0	0.000 814	1 765.478 0540	4.627 1226	0.36	271	0	0.000 491	22.434 4796	0.878 3728	28.01
224	0	0.000 806	1 511.046 6120	5.142 8767	0.42	272	0	0.000 486	−32.350 5417	4.061 6739	19.42
225	0	0.000 806	30.927 8323	6.054 0644	20.32	273	0	0.000 485	670.256 0494	0.210 5809	0.94
226	0	0.000 798	14.807 8724	5.909 2251	42.43	274	0	0.000 484	1 726.726 8202	3.290 5891	0.36
227	0	0.000 798	51.546 3871	5.151 9625	12.19	275	0	0.000 481	574.945 2732	4.309 5920	1.09
228	0	0.000 773	−413.691 0434	0.022 0678	1.52	276	0	0.000 480	595.957 0433	5.031 3510	1.05
229	0	0.000 764	−612.765 5451	2.236 3463	1.03	277	0	0.000 480	575.731 7038	1.142 3486	1.09
230	0	0.000 738	613.499 7126	2.242 6689	1.02	278	0	0.000 478	126.556 7479	5.487 3146	4.96
231	0	0.000 737	532.678 6694	4.923 8316	1.18	279	0	0.000 472	−1 256.967 4818	5.112 1333	0.50
232	0	0.000 732	237.916 4474	2.501 8134	2.64	280	0	0.000 472	−1.815 9247	1.999 7076	346.00
233	0	0.000 726	542.987 9468	6.039 6069	1.16	281	0	0.000 470	1 202.934 7188	1.405 6112	0.52
234	0	0.000 723	1 725.663 1536	6.068 7196	0.36	282	0	0.000 466	1 256.262 8582	4.959 5816	0.50
235	0	0.000 710	2 876.692 4424	5.672 6177	0.22	283	0	0.000 465	1 725.304 1108	0.353 4963	0.36
236	0	0.000 706	1 255.903 8153	2.824 8489	0.50	284	0	0.000 463	573.915 7791	1.411 2230	1.09
237	0	0.000 704	1 352.175 1442	2.300 9913	0.46	285	0	0.000 461	617.998 3076	0.513 6693	1.02
238	0	0.000 694	349.603 2826	2.668 3091	1.80	286	0	0.000 458	1 213.243 9962	1.880 1038	0.52
239	0	0.000 689	468.688 9408	6.224 2711	1.34	287	0	0.000 449	1 160.986 2544	4.179 9896	0.54
240	0	0.000 678	−548.125 4919	6.249 6667	1.15	288	0	0.000 432	1 685.848 2533	1.179 2564	0.37

Table 3.3. (suite).

i	α	A_i^α (μs)	ν_i^α (rad/siècle)	ψ_i^α (rad)	Période (années)	i	α	A_i^α (μs)	ν_i^α (rad/siècle)	ψ_i^α (rad)	Période (années)
289	0	0.000432	2 042.6571092	6.0038292	0.31	337	0	0.000268	−22 685.8238553	0.0694338	0.03
290	0	0.000430	1 351.7870106	0.6858275	0.46	338	0	0.000268	614.8010770	5.1526663	1.02
291	0	0.000426	605.5549661	4.2744765	1.04	339	0	0.000267	1 044.0274293	4.7301085	0.60
292	0	0.000416	−747.7522860	1.0823563	0.84	340	0	0.000265	16 728.3761587	4.3693024	0.04
293	0	0.000399	1.4977854	2.0944419	419.50	341	0	0.000264	6 656.7485864	4.6011012	0.09
294	0	0.000389	1.7252277	1.3957532	364.19	342	0	0.000264	1 887.5525870	1.4172634	0.33
295	0	0.000387	1 045.4501387	2.5411826	0.60	343	0	0.000262	83.8969288	1.3277203	7.49
296	0	0.000384	1 193.3367961	5.8277815	0.53	344	0	0.000260	81.3550284	2.3894389	7.72
297	0	0.000383	2 195.4157609	3.7473764	0.29	345	0	0.000256	−364.6350377	0.5063648	1.72
298	0	0.000374	1 799.6031168	3.3887165	0.35	346	0	0.000250	1 649.6361396	0.8987698	0.38
299	0	0.000368	−575.6908003	0.7313743	1.09	347	0	0.000240	1 248.9885629	5.6845490	0.50
300	0	0.000363	−64.0877607	5.0718210	9.80	348	0	0.000236	211.8763860	1.7335788	2.97
301	0	0.000362	2 908.8811416	3.2159770	0.22	349	0	0.000234	586.7523359	5.5752091	1.07
302	0	0.000362	−453.5059437	1.5838496	1.39	350	0	0.000234	511.3487599	1.7160907	1.23
303	0	0.000352	574.9861767	3.0002980	1.09	351	0	0.000228	3 301.9021112	4.6569855	0.19
304	0	0.000342	613.2028180	4.3222386	1.02	352	0	0.000227	628.7008003	2.9118916	1.00
305	0	0.000341	1 214.6667056	4.7006580	0.52	353	0	0.000225	1 646.0333530	2.5964518	0.38
306	0	0.000338	606.5844601	0.8777761	1.04	354	0	0.000223	1 980.0945956	3.0693274	0.32
307	0	0.000336	−238.8894020	5.3537960	2.63	355	0	0.000222	590.5702242	3.7319903	1.06
308	0	0.000332	2 019.9094960	1.6529014	0.31	356	0	0.000222	1 182.3161639	1.9423866	0.53
309	0	0.000331	1 805.2929543	0.5667906	0.35	357	0	0.000220	−13.5625325	1.7654303	46.33
310	0	0.000331	607.3708908	4.0078812	1.03	358	0	0.000216	630.3851245	3.8629423	1.00
311	0	0.000330	1 055.7594161	3.7100437	0.60	359	0	0.000211	575.6566279	3.7893928	1.09
312	0	0.000329	626.8848756	3.0338277	1.00	360	0	0.000209	−1 098.8808158	2.6361401	0.57
313	0	0.000325	1 567.1081759	2.1788505	0.40	361	0	0.000209	575.0203491	1.6619435	1.09
314	0	0.000325	2 059.7243963	0.1800444	0.31	362	0	0.000208	−22.7526189	4.1278838	27.62
315	0	0.000323	1 259.2450020	1.0722628	0.50	363	0	0.000206	7.0328180	5.9340761	89.34
316	0	0.000318	70.9933048	5.9412071	8.85	364	0	0.000205	−627.9485421	1.8293627	1.00
317	0	0.000318	13.8517497	2.2532530	45.36	365	0	0.000205	628.6666279	1.7428823	1.00
318	0	0.000311	691.5859589	1.6935742	0.91	366	0	0.000204	22.7476133	5.6361927	27.62
319	0	0.000305	938.8005909	0.5783402	0.67	367	0	0.000203	158.1959348	5.5498536	3.97
320	0	0.000304	−182.3175189	3.4090352	3.45	368	0	0.000200	564.2198243	1.0161158	1.11
321	0	0.000301	10.9945689	0.5109221	57.15	369	0	0.000200	680.5653268	0.8682210	0.92
322	0	0.000301	4 323.2306658	6.2053112	0.15	370	0	0.000198	2 593.4124331	3.8327031	0.24
323	0	0.000301	608.0822455	2.1353962	1.03	371	0	0.000197	−7.0849445	4.6907025	88.68
324	0	0.000299	31 642.8228673	5.3845937	0.02	372	0	0.000197	53.3623118	1.0489829	11.77
325	0	0.000297	2 407.2921470	1.9972494	0.26	373	0	0.000195	406.1219215	3.3084634	1.55
326	0	0.000294	−37.7373608	3.7087842	16.65	374	0	0.000191	1 066.0686935	5.4055160	0.59
327	0	0.000292	74.2990061	2.7143336	8.46	375	0	0.000191	41.5552491	4.4011656	15.12
328	0	0.000292	1 234.5739058	4.0960941	0.51	376	0	0.000191	614.4558353	5.0203934	1.02
329	0	0.000290	977.9108676	1.8123204	0.64	377	0	0.000190	2 929.6615390	4.1756585	0.21
330	0	0.000290	309.7883823	4.0752916	2.03	378	0	0.000189	523.7921014	5.2453130	1.20
331	0	0.000285	−53.3214083	4.6873132	11.78	379	0	0.000189	15.3778810	4.8123726	40.86
332	0	0.000284	563.6065017	5.6553858	1.11	380	0	0.000188	1 311.9721103	2.0321958	0.48
333	0	0.000280	1 235.9966152	0.7108725	0.51	381	0	0.000188	147.8866574	5.6868658	4.25
334	0	0.000280	2 823.7233459	5.3048291	0.22	382	0	0.000187	4 716.2516355	1.3543719	0.13
335	0	0.000276	2.4298514	0.7702994	258.58	383	0	0.000187	1 191.9140867	2.6294566	0.53
336	0	0.000271	1 309.5842665	3.2089122	0.48	384	0	0.000185	−20.9366942	4.6947566	30.01

Table 3.3. (suite).

i	α	A_i^α (μs)	ν_i^α (rad/siècle)	ψ_i^α (rad)	Période (années)	i	α	A_i^α (μs)	ν_i^α (rad/siècle)	ψ_i^α (rad)	Période (années)
385	0	0.000184	−493.3208440	3.3274769	1.27	430	0	0.000131	621.1263197	0.0850770	1.01
386	0	0.000181	1077.0893256	1.9994821	0.58	431	0	0.000130	−588.8449965	4.5276811	1.07
387	0	0.000180	608.4003849	0.6021822	1.03	432	0	0.000130	1129.3470674	0.9390394	0.56
388	0	0.000180	−34.8924420	2.4909021	18.01	433	0	0.000129	169.2165670	0.3514073	3.71
389	0	0.000175	512.7714693	4.7284433	1.23	434	0	0.000129	−8.5827299	2.5406351	73.21
390	0	0.000171	654.6159773	1.1828080	0.96	435	0	0.000128	938.0959673	3.2238443	0.67
391	0	0.000169	2099.5392966	2.1690806	0.30	436	0	0.000128	−652.5804454	3.8034200	0.96
392	0	0.000168	1672.3350143	0.0278606	0.38	437	0	0.000126	565.7405658	5.1465923	1.11
393	0	0.000167	14.6594252	0.7599691	42.86	438	0	0.000126	588.1403728	5.5775025	1.07
394	0	0.000166	2314.1558383	3.4541327	0.27	439	0	0.000126	1130.0584221	3.4852807	0.56
395	0	0.000165	−766.8637425	4.2982121	0.82	440	0	0.000123	1940.2796953	4.5380744	0.32
396	0	0.000163	1778.2732073	4.9605931	0.35	441	0	0.000123	210.7034508	1.7286273	2.98
397	0	0.000162	968.3594581	5.7200924	0.65	442	0	0.000123	606.6595361	4.5170995	1.04
398	0	0.000162	625.4626663	1.4351321	1.00	443	0	0.000121	3694.9230808	6.0723321	0.17
399	0	0.000161	12.7471797	2.8625747	49.29	444	0	0.000121	13.7033024	4.5391082	45.85
400	0	0.000159	1673.7577237	3.6006915	0.38	445	0	0.000121	−54.3918059	6.1094295	11.55
401	0	0.000158	16309.6180361	2.9571285	0.04	446	0	0.000120	5.2596640	0.9485163	119.46
402	0	0.000157	619.7248551	1.2843759	1.01	447	0	0.000119	1002.7903196	3.2174312	0.63
403	0	0.000154	9.5979227	3.3668906	65.46	448	0	0.000119	632.1208886	2.5474963	0.99
404	0	0.000152	−572.9506447	0.7341175	1.10	449	0	0.000119	2280.5735566	2.8690406	0.28
405	0	0.000151	427.4518311	4.4043591	1.47	450	0	0.000118	2274.3409380	4.8811231	0.28
406	0	0.000151	1662.7370915	3.9857021	0.38	451	0	0.000117	607.2958148	0.3663246	1.03
407	0	0.000149	1172.0068865	0.6597219	0.54	452	0	0.000117	−624.5048177	5.3795190	1.01
408	0	0.000148	−641.8140930	3.3841050	0.98	453	0	0.000115	−52.5758812	5.8952222	11.95
409	0	0.000148	15.1047670	3.7991096	41.60	454	0	0.000115	6.5220371	3.5049148	96.34
410	0	0.000146	−417.6041342	4.6600085	1.50	455	0	0.000114	72.8762967	0.5207918	8.62
411	0	0.000146	1108.0171579	3.3696954	0.57	456	0	0.000113	5109.2726051	2.7914831	0.12
412	0	0.000146	−7.7750544	3.1215766	80.81	457	0	0.000113	−787.5671864	2.7257711	0.80
413	0	0.000146	579.2741761	0.7084266	1.08	458	0	0.000113	733.0728427	0.6563721	0.86
414	0	0.000146	448.7817406	4.8152970	1.40	459	0	0.000113	−627.7552926	2.7889041	1.00
415	0	0.000144	−66.4756045	5.3813669	9.45	460	0	0.000112	1609.7679950	3.5890263	0.39
416	0	0.000143	670.9674041	4.3176256	0.94	461	0	0.000109	417.1425537	4.0333381	1.51
417	0	0.000142	8378.3548222	2.9363147	0.07	462	0	0.000109	136.8660253	0.0147305	4.59
418	0	0.000141	621.9339952	0.6790687	1.01	463	0	0.000108	−1253.9853380	3.7161338	0.50
419	0	0.000140	1845.1078547	0.6420491	0.34	464	0	0.000107	1606.2184526	4.0665200	0.39
420	0	0.000139	2353.9707386	2.0281954	0.27	465	0	0.000107	534.1013788	0.2882319	1.18
421	0	0.000138	21.0117702	2.5642161	29.90	466	0	0.000106	562.1842923	1.8153233	1.12
422	0	0.000138	601.6468808	6.0961890	1.04	467	0	0.000104	−56.8821874	2.2057345	11.05
423	0	0.000138	628.1591377	2.7974503	1.00	468	0	0.000104	981.4604100	1.9599672	0.64
424	0	0.000138	197.5492546	2.3146085	3.18	469	0	0.000103	632.1103523	2.4404211	0.99
425	0	0.000135	620.5325306	1.6380540	1.01	470	0	0.000103	90.9818733	2.8127454	6.91
426	0	0.000134	1234.1806904	2.5985768	0.51	471	0	0.000101	624.7911760	3.4413470	1.01
427	0	0.000133	6447.1991241	6.0564041	0.10	472	0	0.000101	179.0642638	1.9657460	3.51
428	0	0.000133	−533.1357444	5.4097019	1.18	473	0	0.000101	269.9734819	5.4816032	2.33
429	0	0.000131	1361.3804277	4.0057329	0.46	474	0	0.000101	11.1430161	5.7110337	56.39

Table 3.3. (fin).

i	α	A_i^α (μs)	ν_i^α (rad/siècle)	ψ_i^α (rad)	Période (années)	i	α	A_i^α (μs)	ν_i^α (rad/siècle)	ψ_i^α (rad)	Période (années)
1	1	10.215672	628.3075850	4.2490320	1.00	46	1	0.000305	564.3178564	1.3626344	1.11
2	1	0.170681	1256.6151700	4.2059042	0.50	47	1	0.000303	41.9484644	5.2864738	14.98
3	1	0.026967	21.3299095	3.4002905	29.46	48	1	0.000299	469.0479836	6.2358721	1.34
4	1	0.026592	52.9690965	5.8360474	11.86	49	1	0.000297	681.2766815	1.5830127	0.92
5	1	0.021057	−0.3523118	6.2627383	1783.42	50	1	0.000293	521.6580373	2.3199513	1.20
6	1	0.007800	522.3693920	4.6703442	1.20	51	1	0.000289	586.3591206	0.0951976	1.07
7	1	0.005915	2.6298320	1.0830447	238.92	52	1	0.000266	315.4687085	2.4874479	1.99
8	1	0.005476	157.7343542	4.5348002	3.98	53	1	0.000259	1235.2852605	1.9919358	0.51
9	1	0.003442	−39.8149003	5.9800774	15.78	54	1	0.000257	80.1820931	3.4256115	7.84
10	1	0.003359	550.7553239	5.9801623	1.14	55	1	0.000250	643.8496249	2.9947798	0.98
11	1	0.003209	1884.9227550	4.1629135	0.33	56	1	0.000244	1044.7387840	2.3471392	0.60
12	1	0.002920	585.6477659	0.6238119	1.07	57	1	0.000243	523.0807467	3.0847528	1.20
13	1	0.002776	15.5420399	3.7453181	40.43	58	1	0.000205	708.4896781	0.5263239	0.89
14	1	0.002519	574.6271338	2.9803305	1.09	59	1	0.000189	803.1092263	3.5690037	0.78
15	1	0.002498	576.0498432	2.4679137	1.09	60	1	0.000180	−7143.0695618	2.1922960	0.09
16	1	0.002300	−79.6298007	1.1744118	7.89	61	1	0.000178	0.3932153	5.1804337	1597.90
17	1	0.002177	20.6185548	3.8547875	30.47	62	1	0.000174	627.9552732	0.0874840	1.00
18	1	0.001792	−77.5522611	1.0920660	8.10	63	1	0.000174	584.9364112	0.4175584	1.07
19	1	0.001379	42.6598191	2.6998320	14.73	64	1	0.000170	−159.2596014	3.9970977	3.95
20	1	0.001328	606.2663208	5.8458019	1.04	65	1	0.000169	−470.5732308	4.6417792	1.34
21	1	0.001287	607.6890302	5.3334257	1.03	66	1	0.000168	3.8133036	4.1645294	164.77
22	1	0.001215	105.9381930	6.2228745	5.93	67	1	0.000164	842.9241266	2.1806196	0.75
23	1	0.001177	1203.6460735	2.2928321	0.52	68	1	0.000163	763.2943260	4.9684457	0.82
24	1	0.001108	−0.7113547	5.1547250	883.27	69	1	0.000146	429.2330833	1.3560981	1.46
25	1	0.001014	469.4002955	4.0440138	1.34	70	1	0.000144	1149.9656223	0.9743879	0.55
26	1	0.001008	52.2577418	0.7493203	12.02	71	1	0.000144	2.0355319	3.8954394	308.68
27	1	0.000936	548.6777843	3.4160814	1.15	72	1	0.000137	1414.3495242	3.9875766	0.44
28	1	0.000863	627.5962303	4.5620602	1.00	73	1	0.000136	1151.3883317	0.4955723	0.55
29	1	0.000859	1097.7078805	2.7771526	0.57	74	1	0.000134	723.4794256	0.0904543	0.87
30	1	0.000816	−22.0412642	5.8068915	28.51	75	1	0.000126	683.6645253	1.5090694	0.92
31	1	0.000775	254.4314420	1.6031971	2.47	76	1	0.000117	10.3092774	2.8384968	60.95
32	1	0.000767	214.6165416	3.0002004	2.93	77	1	0.000116	416.4311990	3.4083878	1.51
33	1	0.000710	7.4781599	0.4437258	84.02	78	1	0.000109	606.9776755	3.6179427	1.04
34	1	0.000618	−53.6804512	1.3026428	11.70	79	1	0.000101	−625.6777530	0.6618265	1.00
35	1	0.000609	174.8016413	4.4037652	3.59	80	1	0.000101	1778.9845620	0.2863502	0.35
36	1	0.000598	−119.4447010	2.5834726	5.26	81	1	0.000101	63.9897286	1.6107621	9.82
37	1	0.000582	508.8628840	4.8277235	1.23						
38	1	0.000526	55.3569403	2.3361073	11.35	1	2	0.043230	628.3075850	2.6428937	1.00
39	1	0.000494	−628.6598968	0.2683052	1.00	2	2	0.004065	0.0000000	4.7123890	
40	1	0.000477	134.9867410	5.8086367	4.65	3	2	0.001226	1256.6151700	2.4381406	0.50
41	1	0.000469	−24.2728604	5.1548906	25.89	4	2	0.000195	21.3299095	1.6421870	29.46
42	1	0.000423	95.1718406	0.9311722	6.60	5	2	0.000169	52.9690965	4.5109593	11.86
						6	2	0.000134	−0.3523118	1.5022103	1783.42
43	1	0.000340	−235.2866154	2.5521899	2.67						
44	1	0.000321	−0.7046237	1.8637965	891.71						
45	1	0.000306	943.7762935	4.2264206	0.67	1	3	0.000143	628.3075850	1.1314536	1.00