

ISSN 1621-3823
ISBN 2-910015-31-9

*NOTES SCIENTIFIQUES ET TECHNIQUES
DE L'INSTITUT DE MÉCANIQUE CÉLESTE*

S071

**LES DIFFÉRENTS SYSTÈMES DE RÉFÉRENCE
UTILISÉS EN ANALYSE DE MISSION :
DE L'EME2000 À DE405**

A. Fienga & J. Berthier

*Institut de mécanique céleste et de calcul des éphémérides
UMR 8028
77, avenue Denfert-Rochereau
F-75014 Paris*

Septembre 2000

1 Introduction

Ce document a été rédigé dans le cadre de l'analyse de mission de la sonde Mars Sample Return (MSR) [Frayssé et al, 2000]. Cette mission implique au cours de l'arrivée autour de Mars du véhicule une mise en orbite autour de la planète par aérocapture. Cette opération, encore inédite dans le cadre des missions interplanétaires, requiert une très grande précision sur l'orbite d'arrivée de la sonde autour de Mars, de l'ordre de quelques centaines de mètres. Or, à ce niveau de précision, il est très rapidement apparu que le choix des constantes et des repères utilisés lors des calculs de trajectoires n'était pas sans conséquence sur la précision de l'arrivée sur Mars. Après avoir illustré notre propos par des exemples divers d'utilisations erronées de constantes non appropriées et l'impact des ces usages abusifs sur le calcul des trajectoires, nous passerons en revue les systèmes de référence terrestre, martien et céleste que nous proposons d'utiliser dans le cadre des analyses de missions interplanétaires du Centre National d'Etudes Spatiales.

2 Exemples introductifs

Faire le choix d'une théorie planétaire pour le calcul des positions de la Terre et de Mars entraîne qu'il faille faire appel, dans le calcul de la trajectoire de la sonde, au système des masses correspondant à la solution planétaire. Une incohérence à ce niveau introduit des biais sur l'orbite de la sonde de l'ordre de 1 à 2 kilomètres à l'arrivée sur Mars. Afin d'illustrer notre propos, diverses comparaisons ont été effectuées à partir de l'intégrateur MINT [Berthier, 1999] développé à l'Institut de mécanique céleste. Celles-ci ont pour but de démontrer l'impact des repères et des constantes choisis dans le calcul de trajectoires. Nous avons calculé plusieurs solutions numériques à partir de deux systèmes de masse, l'UAI76 [UAI, 1976] et celui issu de la solution numérique du mouvement des planètes du JPL, DE405 [Standish, 1998], et de potentiels terrestres tels que GEMT2 [Marsh et al, 1990] et JGM-3 [Tapley et al, 1996]. Nous avons comparé les différences induites par ces modèles sur les trajectoires de la sonde jusqu'à son arrivée autour de Mars. Les résultats de ces comparaisons sont présentés sur les trois graphes de la figure. En considérant ces résultats, il a semblé important de fixer un cadre dans lequel pourra s'effectuer de manière cohérente l'ensemble des calculs d'orbites lié à l'analyse de mission MSR. Pour cela, nous allons tout d'abord préciser quelques définitions puis nous choisirons un système de référence que nous définirons précisément et que nous raccorderons aux systèmes de référence déjà existant (DE200, DE403).

3 Définitions

3.1 Les systèmes de référence

Un système de référence *conventionnel* est un concept matérialisé par un repère de référence, un système de coordonnées et un ensemble recommandé de constantes, théories et procédures de réductions d'observations. On différenciera les systèmes de référence *célestes* et *terrestres*, les premiers étant liés aux mouvements des corps célestes, les autres à la rotation de la Terre. Ces derniers n'entrent pas directement dans l'étude des mouvements des objets dans le système solaire. C'est pourquoi, nous considérons dans ce qui suit que le cas des systèmes de référence *célestes*. Nous effectuerons cependant une remarque sur leur homologues terrestres en fin de paragraphe.

Un système de référence *céleste dynamique idéal* donne un cadre dans lequel les équations du mouvement des objets célestes peuvent s'écrire sans faire intervenir de termes de Coriolis ou

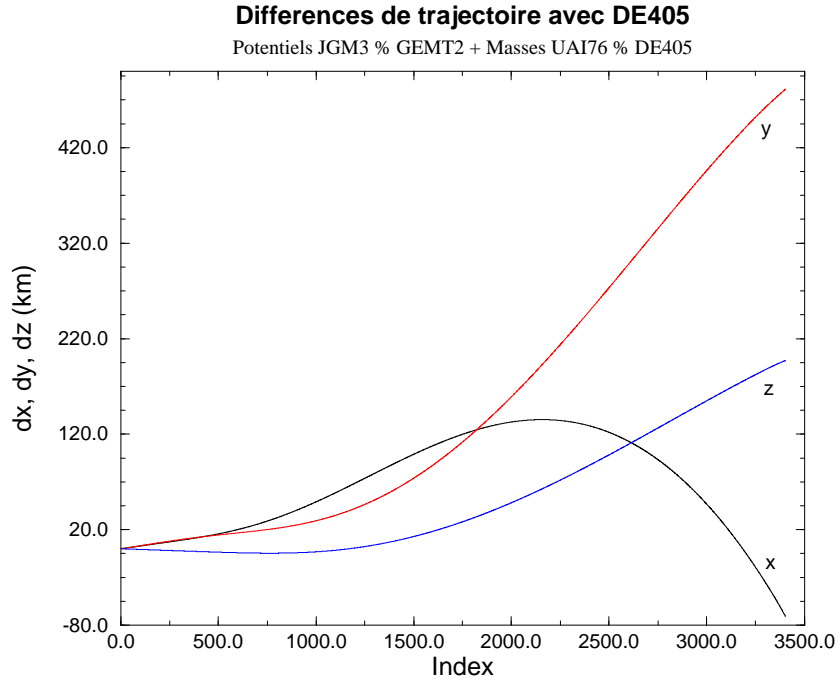


FIG. 1 – Comparaison entre les solutions intégrées issues de Mint et calculées avec des valeurs de masses planétaires et de potentiels différents et DE405

d'accélération linéaires induits par le système de référence. Un système de référence dynamique est caractérisé par un plan de référence (l'écliptique) et une origine (l'équinoxe) déterminés à partir des théories planétaires, ainsi que par la donnée des masses des objets du système solaire et des paramètres de rotation et d'orientation de la Terre (théorie de précession-nutation, définition du temps sidéral, mouvement du pôle). Notons que cette première notion de système de référence *idéal* peut être complétée par celle de système de référence *cinématique idéal*. Si l'on utilise une définition cinématique du système de référence idéal, alors celui-ci correspond à un système dans lequel les objets très lointains n'ont pas de rotation globale. Dans le cas d'un système de référence cinématique, la liste des sources extra-galactiques pour établir le plan de référence du système (l'équateur) et l'origine du système de coordonnées (équinoxe) ainsi que la définition exacte des axes de ce système en donnent les principales caractéristiques. Le système de référence conventionnel que nous choisirons d'utiliser en analyse de missions est l'ICRS. De par sa définition, il permet de combiner les deux notions de systèmes de référence *cinématique* et *dynamique* et sera caractérisé comme suit :

- le repère de référence et le système de coordonnées seront ceux du repère noté ICRF basé sur un catalogue astrométrique de sources extra-galactique fourni par l'IERS [Arias, 1995].
- l'ensemble des constantes et des modèles de définition sont spécifiées dans les conventions de l'IERS [IERS, 1996]. Notons entre autres que la solution des masses préconisée sera celle de la solution numérique du mouvement des planètes DE403 et que les théories de précession et de nutation sont celles de Lieske [Lieske, 1977] et de Wahr [Wahr, 1981] respectivement.
- les procédures de réductions sont elles aussi décrites dans les conventions de l'IERS [IERS, 1996] .

L'ensemble de ces définitions est extrait des recommandations de l'UAI 1990 [Kovalevsky, 1991].

Un repère de référence est un ensemble de points de réalisations primaires dont les coordonnées matérialisent le système de référence conventionnel. Ce repère est aussi appelé réalisation primaire du système de référence. Par exemple, le repère ICRF (VLBI) est une réalisation primaire du système de référence ICRS dont le catalogue astrométrique Hipparcos est une réalisation primaire dans les longueurs d'ondes optiques [Feissel and Mignard, 1998]. A partir de ces points de réalisation primaire, on peut définir l'origine et les axes d'un système de coordonnées. Dans le cas de l'ICRS, l'origine du système de coordonnées est le barycentre du système solaire. Son plan de référence est proche de l'équateur moyen J2000 FK5. Enfin l'origine des ascensions droites du système de référence ICRS a été défini à partir de celle de sa réalisation primaire. Cette origine correspond à l'ascension droite de la source extragalactique 3C273B raccordée avec une incertitude de 0.010 seconde de degré à l'origine conventionnelle du FK5 [Arias, 1995], [Folkner, 1994].

Avec la découverte des quasars dans les années soixante est apparue la notion d'objets ayant un mouvement propre non détectable, ou tout au moins du même ordre de grandeur que la vitesse d'expansion de l'univers. Cela a permis la mise en place du premier système de référence dont la matérialisation ne serait affectée d'aucune rotation résiduelle. L'ICRF a ainsi été construit sur la base d'observations VLBI de 608 sources extra-galactiques et a été recommandé en 1991 puis adopté en 1997 comme le nouveau repère du système de référence standard ICRS (International Celestial Reference System), dont le catalogue astrométrique Hipparcos constitue la matérialisation optique. Cette nouvelle réalisation est la première à pouvoir être considérée comme totalement inertielle (non tournante), contrairement aux réalisations précédentes pour lesquelles des rotations résiduelles induisent le caractère rotationnel. Conformément aux recommandations de l'UAI [Kovalevsky, 1991], l'ICRS est compatible avec le système de référence précédent matérialisé par le FK5. L'ICRS est le premier système de référence inertiel cinématique, puisque basé sur un repère non tournant. De ce fait, il a été possible d'estimer avec plus de précision les défauts des systèmes précédents, essentiellement le FK5, non dépourvus de rotations résiduelles.

Comme nous l'avons dit précédemment, il est possible de définir un système de référence à partir de la dynamique d'objets observés depuis la Terre. Ainsi, les théories planétaires permettent de définir le repère dans lequel évoluent les corps du système solaire à partir de la détermination de l'orbite héliocentrique du barycentre Terre-Lune. De cette orbite, est déduit un système de référence dans lequel seront exprimées les orbites des planètes intérieures et extérieures. Ce système est appelé système de référence dynamique. Il se caractérise par un système de masses (celui de la solution planétaire), un plan de référence (écliptique) et une origine (équinoxe) moyens, à une époque donnée et diffère selon que l'on considère les théories DExxx ou VSOPxx. Il est donc fondamental d'utiliser, couplées à une théorie planétaire donnée, les définitions d'ecliptique, d'obliquité et de système de masses qui lui sont associés. Afin de souligner ce point, notons que les solutions planétaires de l'Institut de mécanique céleste (analytiques) et du Jet Propulsion Laboratory (numériques) n'utilisent pas les mêmes définitions d'équinoxe et d'écliptique dynamiques moyens. Ainsi, dans les théories analytiques, l'orbite moyenne de la Terre est fixée pour une époque de référence donnée en enlevant aux composantes du moment cinétique vrai issu de la théorie analytique les termes dépendant des longitudes moyennes des planètes et des arguments de la Lune. D'autre part, le repère de référence des solutions numériques est défini relativement à l'une des réalisations primaires du système de référence conventionnel, autrement dit, à partir des observations optiques, radar et VLBI des planètes utilisées au cours de l'ajustement des so-

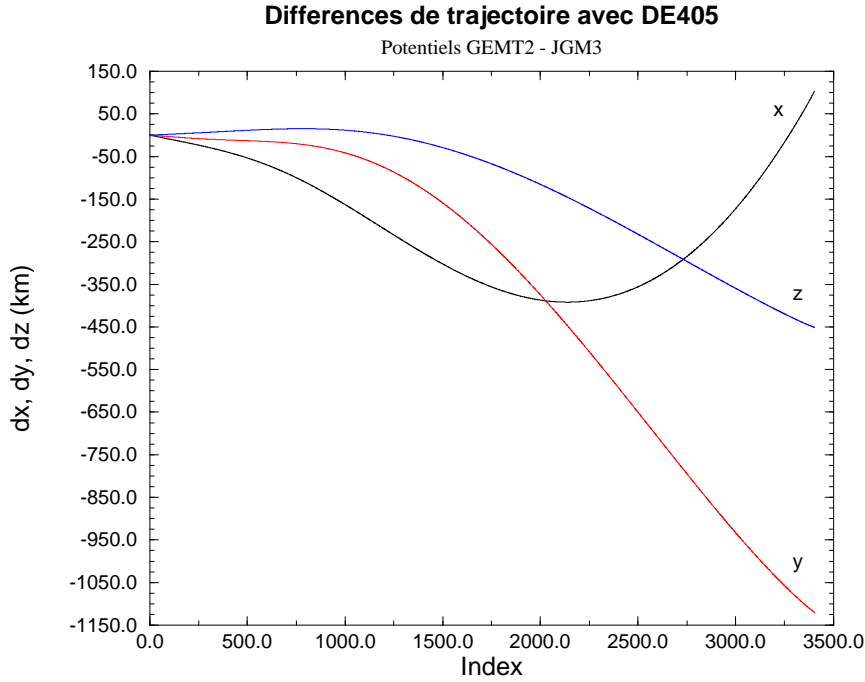


FIG. 2 – Comparaison entre les solutions intégrées issues de Mint et calculées avec des valeurs de masses planétaires et de potentiels différents et DE405

lutions numériques. Ainsi, le système déduit des éphémérides DE200 est issu de l’ajustement de cette théorie à des observations raccordées au FK4. De même, l’ajustement des solutions DE403 et DE405 a été effectué en utilisant, entre autres, des données optiques raccordées à l’ICRF, via Hipparcos, induisant un système de référence lié à l’ICRF.

La notion de système de référence *terrestre* n’intervient pas directement dans les études et le calcul des trajectoires interplanétaires. Cependant, celle-ci doit être précisée si l’on cherche à effectuer une restitution des orbites par le biais d’observations réalisées au sol, et notamment par celui des très précises et très délicates (en terme de traitement) observations DSN et VLBI. De par leur qualités astrométriques (précision de localisation d’une sonde interplanétaire de l’ordre de la centaine de mètres), le traitement de ces données nécessite une définition rigoureuse des repères terrestres, constantes et modèles de rotation de la Terre. Cette définition doit être cohérente avec les repères, constantes et modèles de la mécanique céleste. Pour garantir cette cohérence, nous utiliserons comme système de référence terrestre, l’ITRF [Boucher, 1990]. Ce système est géocentrique, le calcul du centre de masse de la Terre incluant l’atmosphère et les océans. Son échelle est celle d’un repère terrestre local au sens de la théorie relativiste de la gravitation. Son orientation est initialisée par celle définie par le BIH en 1994.0 et la dérive séculaire de cette orientation ne comporte pas de résidus de rotation globale par rapport à la croûte. l’IERS a mis en place un algorithme [IERS, 1996] permettant de transformer des coordonnées d’objets observés ou de stations au sol exprimées dans l’ITRF dans l’ICRF. Cette transformation s’écrit, sous forme de produit matriciel :

$$[CRS] = P.N(t).R(t).W(t).[TRS] \quad (1)$$

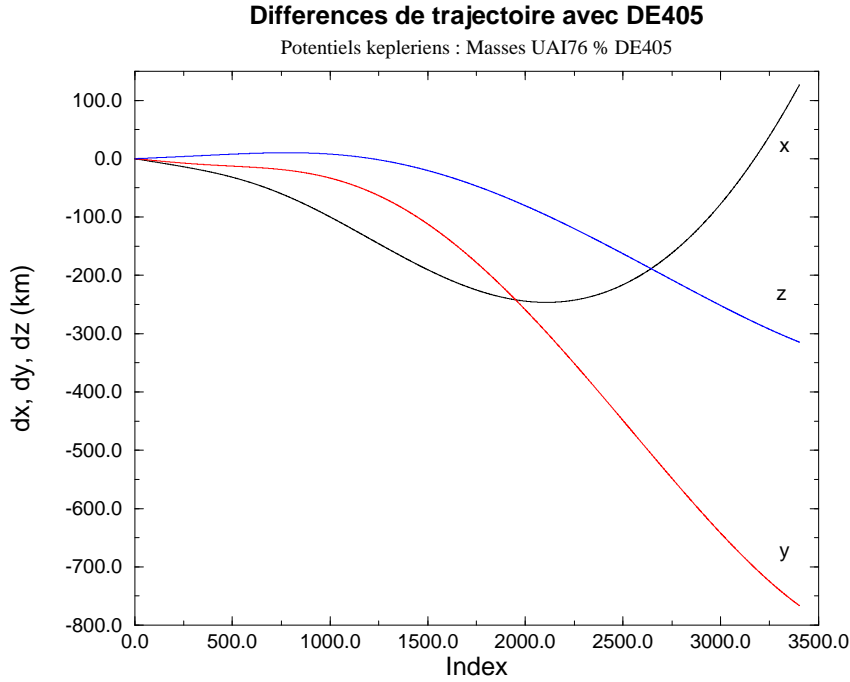


FIG. 3 – Comparaison entre les solutions intégrées issues de Mint et calculées avec des valeurs de masses planétaires et de potentiels différents et DE405

Ainsi si $[\text{TRS}]$ représente un vecteur position-vitesse dans l'ITRF, alors le vecteur position-vitesse dans l'ICRF, $[\text{CRF}]$ est calculé à partir de l'équation 1 où P et $N(t)$ représentent les matrices de precessions-nutation basées sur le modèles de Lieske [Lieske, 1977] et Wahr [Wahr, 1981]. W représente la rotation du repère céleste induite par la position du pôle céleste dans l'ITRF. Ces positions sont publiées régulièrement pas l'IERS. R représente la rotation apparente de la Terre, par le biais du temps sidéral vrai de Greenwich défini par Aoki et al [Aoki et al, 1991]. La donnée de ces constantes permet de compléter la définition du système de référence céleste adopté, puisqu'elle permet de lier celui-ci au système de référence terrestre ITRF et par là aux observations au sol.

4 Repères utilisés en mécanique spatiale

Nous allons présenter les notions couramment utiliser lors des analyses de missions interplanétaires. Ce point nous permettra de mettre en évidence comment et pourquoi ces définitions rejoignent celles posées par la communauté scientifique de l'Union Astronomique Internationale. Les deux repères EME2000 et MMEQ UAI ont été définis par les équipes d'analyse des missions interplanétaires du JPL/NASA. C'est dans ces deux repères que sont exprimées l'ensemble des trajectoires calculées au JPL. Afin de pouvoir comparer nos orbites aux leurs, nous allons analyser les notions génériques d'EME2000 et de MMEQ UAI [Mase, 1998].

4.1 EME2000

L' EME2000, acronyme de Earth Mean Equator and Equinox of Epoch J2000, est un repère de référence inertiel au sens où aucun terme de Coriolis n'est induit dans les équations du mouvement par la nature même du repère. Le centre de ce repère est le centre de masse terrestre. Plus précisément, l'EME2000 est défini à partir de 3 axes donnant 3 directions : la normale au plan de l'équateur moyen J2000 (Oz), celle du point vernal moyen J2000 (Ox) et enfin la direction formant avec les 2 précédentes un trièdre orthogonal. Aucun système de masse, aucune théorie planétaire, théorie de précession, de nutation et de mouvement du pôle ne sont spécifiés. Donc, en suivant les définitions précédentes relatives au système et repère de référence, on ne peut pas qualifier ce repère EME2000 de repère de référence ou de système de référence puisqu'aucune des informations permettant d'identifier entièrement le système n'est donnée. Cependant, on pourra qualifier ce repère de repère *générique* c'est-à-dire qu'il permet de définir un repère précis mais dont l'identification concrète s'effectue à l'aide de théories planétaires, de système de masse et de théories de la rotation de la Terre qu'il reste à préciser ou qui peuvent évoluer au cours du temps. Ainsi, il est possible de définir un EME2000 à partir de la solution DE200 du mouvement des planètes et du système de masse (solution de masses) de l'UAI76, mais aussi de définir un autre EME2000 à partir de la nouvelle solution DE405 et de son système de masse propre. Chacun de ces 2 repères pourra être dénommé EME2000.

Nous avons donc fait le choix de nous fixer pour définition de l'EME2000 le système d'axes EME2000 calculé à partir de :

1. la solution numérique DE405/LE405 du mouvement des neuf planètes du système solaire et de la Lune
2. la solution de masses de DE405/LE405 issue de l'ajustement des solutions numériques aux observations.
3. une modélisation de la rotation de la Terre par les théories de précession de Lieske [Lieske, 1977] et nutation de Wahr [Wahr, 1981], et la définition du temps sidéral de Aoki et al [Aoki et al, 1991]
4. des paramètres d'orientation de la Terre (mouvement du pôle terrestre, correction (UT1-UTC) et corrections de nutation) proposés par l'IERS (séries EOP).
5. une solution du potentiel préconisée par l'UAI [UAI, 1996], le modèle JGM-3 [Tapley et al, 1995]

A partir de ces différents éléments, il devient possible de matérialiser complètement l'EME2000 et d'effectuer rigoureusement l'ensemble des changements de repères nécessaires à l'orbitographie de la sonde. Les paramètres d'orientation de la Terre (séries EOP) sont déterminés *a posteriori* par l'IERS à partir d'observations VLBI de sources extra-galactiques et sont disponibles, accompagnées de quelques sous-programmes d'exploitation, sur le serveur web de l'IERS à l'adresse <http://hpiers.obspm.fr/iers/>. Il est à noter que dans le cadre de l'analyse de mission, il n'est pas possible de prendre en compte ces paramètres dans le sens où leur exploitation à moyen et long terme (plusieurs jours) n'est pas permise à cause des irrégularités de la rotation de la Terre.

4.2 MMEQ UAI

Comme nous l'avons vu précédemment le système d'axe et le système de référence EME2000 permettent d'imposer un cadre à l'orbitographie interplanétaire de la sonde. Lors de son approche de Mars, il est admis qu'un repère de référence aérocentrique parait plus adéquat pour l'analyse de

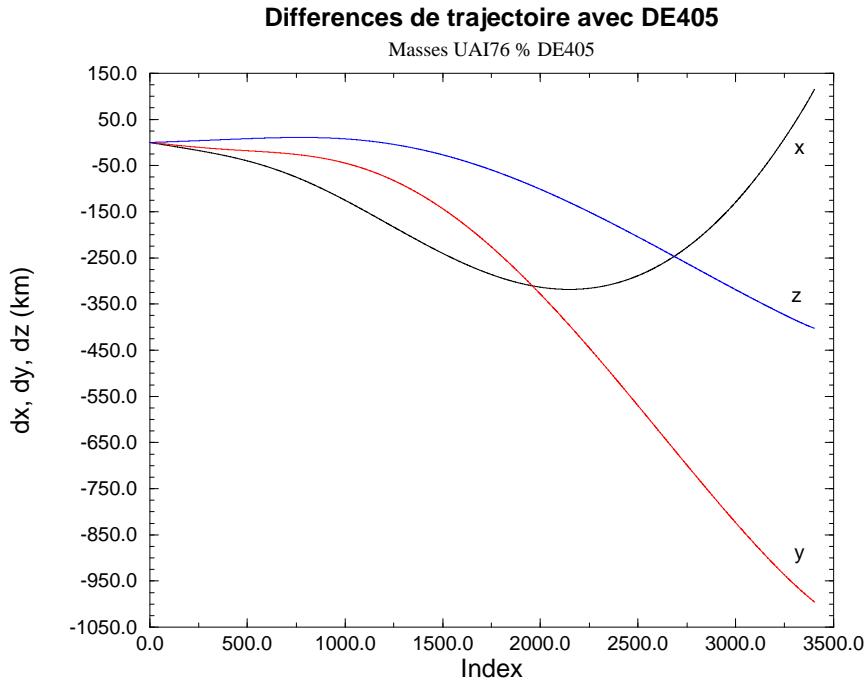


FIG. 4 – Comparaison entre les solutions intégrées issues de Mint et calculées avec des valeurs de masses planétaires et de potentiels différents et DE405

mission. C'est pourquoi, on choisit lors de l'arrivée de la sonde au voisinage de Mars un système de coordonnées centré au centre de masse de la planète et ayant comme plan de référence le plan perpendiculaire à l'axe moyen de rotation de Mars (équateur de Mars) à une date donnée. Cette définition est complétée par la donnée d'une direction matérialisée par le vecteur UAI correspondant à la direction d'intersection entre le plan moyen de l'équateur de Mars à la date donnée et le plan équatorial de l'EME2000. On appelle Q la projection du nœud ascendant de l'équateur moyen de Mars de la date choisie sur l'équateur EME2000. Là encore, la définition du MMEQ UAI est une définition générique puisque qu'aucune précision n'est apportée quant à la théorie dynamique de Mars, ou à celle de sa rotation ou du système de masses. Par cohérence avec notre définition du système de référence EME2000, nous avons choisi de définir le MMEQ UAI comme un système de référence secondaire, puisque découlant en partie de l'EME2000, et tel que sont utilisées :

1. la solution numérique DE405/LE405 du mouvement de Mars
2. la solution de masses de DE405/LE405 issue de l'ajustement des solutions numériques aux observations.
3. une modélisation de la rotation de Mars issue du modèle d'orientation du pôle par Davies et al [Davies et al, 1996] et/ou des théories de précession et de nutation par Bouquillon et Souchay [Bouquillon and Souchay, 1999].
4. une solution du potentiel issue de la mission Mars Global Surveyor de degré 50x50

5 Réalisations de l'EME2000 : DE200-DE403-DE405

Suivant les définitions précédentes, et dans un esprit de cohérence avec les notions de système de référence dynamique inertiel préconisées par l'UAI, nous avons donc décidé de choisir les solutions numériques du mouvement des planètes du système solaire développées au JPL, comme réalisation des concepts de EME2000 et MMEQ 2000 et plus particulièrement DE405/LE405 (Developed Ephemeris/Lunar Ephemeris 405). Celle-ci est la dernière solution numérique du Jet Propulsion Laboratory mise en place dans le cadre de la préparation des missions spatiales interplanétaires JPL/NASA [Standish, 1998]. Cette version 405 est une amélioration de la version précédente, DE403, à partir de laquelle a été défini le premier système de référence dynamique lié au système de référence cinématique inertiel, l'ICRS. Comme nous l'avons vu précédemment, c'est sur ce système de référence dynamique défini par DE403 puis par DE405 qu'ont été mis en place les repères conventionnels EME2000 et MMEQ UAI utilisés actuellement par le JPL en analyse de mission. Dans ce paragraphe, nous allons préciser les principales caractéristiques des solutions numériques du Jet Propulsion Laboratory en général et de DE405 en particulier, puis nous préciserons les points d'amélioration et de modifications apportés à ces solutions depuis DE200.

5.1 Généralités

Les solutions DExxx du JPL sont basées sur l'intégration numérique des équations du mouvement des neuf planètes du système solaire et de la Lune. C'est en 1972, qu'Oesterwinter et Cohen [Oesterwinter and Cohen, 1972] développèrent la première théorie numérique complète des planètes du système solaire, Lune comprise. Cette théorie basée sur l'algorithme d'intégration de Cowell et Adams [Cohen et Hubbard, 1961] et [Krogh, 1972], constitue la base des théories numériques actuellement développées au Jet Propulsion Laboratory. Les équations sont établies dans l'équateur et l'équinoxe B1950 ou J2000 et centrées au barycentre du système solaire. Des modifications importantes ont été apportées à cette première solution – notamment la prise en compte plus systématique et plus précise d'effets relativistes et des potentiels astéroïdaux – mais la méthode de calcul reste très similaire. Le système de référence dynamique issu de la solution planétaire DExxx est mis en place par raccordement de l'orbite héliocentrique de la Terre au plan de l'écliptique. Ce raccordement s'effectue par ajustement des conditions initiales de cette orbite aux observations optiques, radar et VLBI des planètes intérieures et extérieures. Ainsi, le repère de référence dans lequel ont été exprimées ces observations devient, par le biais de l'ajustement des conditions initiales de l'orbite terrestre, le nouveau repère de référence dynamique. C'est pourquoi spécifier l'ensemble des observations utilisées lors de l'ajustement des théories planétaires revient à définir un repère de référence.

Comme nous venons de le voir, l'utilisation de tels types d'observations dans une détermination des conditions initiales d'une solution planétaire permet de définir un nouveau repère et un nouveau système (avec ajustement du système des masses) de référence.

5.2 Evolution DE200-DE403

Jusqu'à DE200, les éphémérides du JPL étaient raccordées à des systèmes de référence non-inertiels de type FK4-FK5 car la grande majorité des observations utilisées lors de l'ajustement étaient des données optiques, exprimées dans le FK4 ou le FK5. A partir de DE403, le raccordement s'effectue directement dans l'ICRS par le biais des observations tracking VLBI de Magellan

(Vénus) et de Galileo (Jupiter). Le lien entre le repère défini à partir de DE200 et l'ICRF a été établi par Folkner [Folkner, 1994] et s'écrit :

$$\hat{\mathbf{r}}_{\text{IERF}} \approx \hat{\mathbf{r}}_{\text{DE200}} + \mathbf{A}(t) \times \hat{\mathbf{r}}_{\text{DE200}} \quad \text{et} \quad \hat{\mathbf{h}}_{\text{IERF}} \approx \hat{\mathbf{h}}_{\text{DE200}} + \mathbf{A}(t) \times \hat{\mathbf{h}}_{\text{DE200}}$$

où $t = \text{JED } 2447435.5$ (1 octobre 1988),

$$\text{et } 206265 \mathbf{A}^T = [+0.002 \pm 0.002, +0.012 \pm 0.003, +0.006 \pm 0.003],$$

Le vecteur \mathbf{A} représente, en secondes de degré, des petites rotations selon les axes Ox, Oy et Oz respectivement. Ses coordonnées dépendent du temps de façon mineure du fait de l'incertitude de DE200 sur l'orbite terrestre (0.04 seconde de degré par siècle). $\hat{\mathbf{r}}$ et $\hat{\mathbf{h}}$ représentent respectivement les vecteurs positions et vitesses d'un objet exprimées dans l'IERF et dans DE200. La solution des masses est elle aussi modifiée, mais les théories de précession-nutation restent identiques à celles du système de référence précédent, lié à DE200 [Lieske, 1977] pour la précession et [Wahr, 1981] pour la nutation. Par convention (IERS Technical Notes 21, 1996), on identifie l'aspect *dynamique* de l'ICRS au système de référence déduit de DE403.

5.3 Evolution DE403-DE405

La version DE405 [Standish, 1998] ne diffère pas fondamentalement de la version DE403. Quelques observations supplémentaires ont été ajoutées à l'échantillon d'ajustement notamment des données VLBI complémentaires déduites du suivi des sondes Magellan, Galileo et Ulysses [Folkner, 1996], [Folkner, 1992-94], [Folkner, 1996-98] déjà utilisées dans DE403 et des observations CCD de planètes géantes sur fond de sources extra-galactiques [Stone, 1998], [Morrison, 1998]. Ces apports ont permis d'affiner le raccordement entre le repère de référence dynamique (déduit de l'ajustement de l'orbite héliocentrique de la Terre aux observations) et l'ICRF. Des dérives séculaires de DE403 ont été mises en lumière par comparaison à la nouvelle solution. Le repère de référence déduit de DE405 peut se déduire de celui de DE403 par :

$$\hat{\mathbf{r}}_{\text{DE405}} \approx \hat{\mathbf{r}}_{\text{DE403}} + \mathbf{B}(t) \times \hat{\mathbf{r}}_{\text{DE403}}$$

$$\hat{\mathbf{h}}_{\text{DE405}} \approx \hat{\mathbf{h}}_{\text{DE403}} + \mathbf{B}(t) \times \hat{\mathbf{h}}_{\text{DE403}}$$

où

$$206265 \mathbf{B}^T = [+ 0.0003 - 0.0002 t, -0.0003 + 0.0001 t, + 0.0032 - 0.0009 t],$$

avec t le nombre de siècles depuis J2000. Les trois composantes du vecteur \mathbf{B} représentent, en secondes de degré, des petites rotations autour des axes Ox, Oy et Oz respectivement.

Le passage entre le repère de référence dynamique lié à DE200 et celui de DE405 s'effectuera donc par composition des deux corrections précédentes. De même que lors du passage de DE200 à DE403, les solutions de masses sont modifiées car certaines d'entre elles (Saturne et Uranus) restent encore déterminées par ajustement de leurs orbites aux observations. Pour l'ensemble des autres planètes, la détermination des masses s'effectuent au cours des missions spatiales par télémétrie ou altimétrie de la sonde, induisant ainsi des estimations beaucoup plus précises que par le biais de la dynamique de la planète. Nous résumons dans le paragraphe 6 l'ensemble de ces solutions de masses pour DE403 et DE405. Les théories relatives à la rotation de la Terre ne sont pas modifiées.

6 Données numériques

Ici, sont regroupées les constantes caractéristiques de la solution numérique DE405 qu'il convient d'utiliser lors de tout calcul basé ou faisant appel à cette solution planétaire. Ceci inclu

en conséquence la mise en place des repères conventionnels EME2000 et MMEQ UAI et tout changement de repères dérivés.

Tab 1 - Standish (1998) : Constantes primaires de DE405

JED SPAN : 2305424.50 (1599 Dec 09) to 2525008.50 (2201 Feb 20)			
	[au ³ /day ²]	[GM _{Sun} /GM _i]	[km ³ /sec ²]
AU	149597870.691 [km/au]		
CLIGHT	299792.458 [km/sec]		
EMRAT	81.30056 [GM(earth)/GM(moon)]		
GM1	0.4912547451450812... × 10 ⁻¹⁰	6023600 .	22032.080...
GM2	0.7243452486162703... × 10 ⁻⁰⁹	408523 .71	324858.599...
GM3	0.8887692390113509... × 10 ⁻⁰⁹	332946 .050895...	398600.433...
GM4	0.9549535105779258... × 10 ⁻¹⁰	3098708 .	42828.314...
GM5	0.2825345909524226... × 10 ⁻⁰⁶	1047 .3486	126712767.863...
GM6	0.8459715185680659... × 10 ⁻⁰⁷	3497 .898	37940626.063...
GM7	0.1292024916781969... × 10 ⁻⁰⁷	22902 .98	5794549.007...
GM8	0.1524358900784276... × 10 ⁻⁰⁷	19412 .24	6836534.064...
GM9	0.2188699765425970... × 10 ⁻¹¹	135200000 .	981.601...
GMS	0.01720209895 ²	1 .	132712440017.987...
GMM	0.1093189565989898... × 10 ⁻¹⁰	27068700 .387534...	4902.801...
GMB	0.8997011346712499... × 10 ⁻⁰⁹	328900 .561400	403503.233...
	[au ³ /day ²]	[GM _i /GM _{Sun}]	[km ³ /sec ²]
MA0001	0.1390787378942278... × 10 ⁻¹²	4.7 × 10 ⁻¹⁰	62.375...
MA0002	0.2959122082855911... × 10 ⁻¹³	1.0 × 10 ⁻¹⁰	13.271...
MA0004	0.3846858707712684... × 10 ⁻¹³	1.3 × 10 ⁻¹⁰	17.253...

Table 2 - Conventions IERS (1996) : Valeurs des masses planétaires de IAU 1976, DE200 et DE403, exprimée comme inverse de leur rapport à la masse solaire.

Planete	1976 IAU	DE200	DE403	Reference for DE403 value
Mercure	6023600.	6023600.	6023600.	Anderson <i>et al.</i> , 1987
Venus	408523.5	408523.5	408523.71	Sjogren <i>et al.</i> , 1990
Terre & Lune	328900.5	328900.55	328900.560392...	Williams <i>et al.</i> , 1995
Mars	3098710.	3098710.	3098708.	Null, 1969
Jupiter	1047.355	1047.350	1047.3486	Campbell and Synott, 1985
Saturne	3498.5	3498.0	3497.898	Campbell and Anderson, 1989
Uranus	22869.	22960.	22902.98	Jacobson <i>et al.</i> , 1992
Neptune	19314.	19314.	19412.24	Jacobson <i>et al.</i> , 1991
Pluton	3000000.	130000000.	135200000.	Tholen and Buie, 1996

Table 3 - Conventions IERS (1996) : Constantes secondaires issues des solutions DE403/LE403 (première colonne) et DE405/LE405 (deuxième colonne) .

Echelle (km/au)	149597870.691	149597870.691
Echelle (secs/au)	499.0047838061...	499.0047838061...
Vitesse de la lumière (km/sec)	299792.458	299792.458
Obliquité	23°26'21.4120	23°26'21.4119
rapport des masses Terre - Lune	81.300585	81.300585

7 References

- Aoki S., The new definition of universal time, *Astron. Astrophys.*, 105 :359–361, January 1982.
- Arias E.F., Charlot P., Feissel M., and Lestrade J.F., The extragalactic reference system of the International Earth Rotation Service, ICRS, *Astron. Astrophys.*, 303 :604–608, November 1995.
- Berthier J., Serveur d'éphémérides du Bureau des longitudes : Librairie et programme de calcul EPROC - Guide de l'utilisateur (v1.02) *Notes Scientifiques et techniques du Bureau des longitudes*, nov. 1998.
- Boucher C., Definition and realization of Terrestrial Reference Systems for monitoring Earth rotation, In *Variations in earth rotation*, pp.197-201
- Bouquillon S., Souchay J., Precise modeling of the precession-nutation of Mars, *Astron. Astrophys.*, 345 :282–297, nov. 1999.
- Davies M.E., Abalakin V.K., Bursa M., Lieske J.H., Morando B., Morrison D., Seidelmann P.K., Sinclair A.T., Yallop B., and Tjuflin Y.S., Report of the IAU/IAG/COSPAR Working Group on cartographic coordinates and rotational elements of the planets and satellites : 1994, *Celestial Mechanics and Dynamical Astronomy*, 63 :127–148, 1995.
- ESA, The HIPPARCOS and TYCHO Catalogues (vol. 1-17), In *European Space Agency SP-1200 (1997)*, pages 0+, 1997.
- Feissel M. and Mignard F., The adoption of ICRS on 1 January 1998 : meaning and consequences, *Astron. Astrophys.*, 331 :L33–L36, March 1998.
- Folkner W.M., Preliminary results from VLBI measurements of Venus, *Jet Propulsion Laboratory Interoffice Memorandum*, 1992-94.
- Folkner W.M., Charlot P., Finger M.H., Williams J.G., Sovers O.J., Newhall X.X., and Standish E.M., Determination of the extragalactic-planetary frame tie from joint analysis of radio interferometric and lunar laser ranging measurements, *Astron. Astrophys.*, 287 :279–289, 1994.
- Folkner W.M., McElrath T.P., and Mannucci A.J., Determination of position of Jupiter from Very-Long Baseline Interferometry Observations of Ulysses, *Astron. Journal.*, 112 :1294+, sept. 1996.
- Folkner W.M., Private Communications, 1996-98.
- Fraysse H., Francillout L., Rousseau S., and Labourdette P., 2005 MSR Orbiter sizing mission, *Note technique CNES, DTS/MPI/MS/AM/2000-029*, fev. 2000
- Kovalevsky J., Preliminary report of the work of the subgroup on coordinate frames and origins, In *IAU Colloq. 127 : Reference Systems*, pages 17+, 1991.
- Krogh F.T. *Lectures in mathematics*, 1972.
- Lieske J.H., Lederle T., Fricke W., and Morando B., Expressions for the precession quantities based upon the IAU 1976 system of astronomical constants, *Astron. Astrophys.*, 58 :1–2, June 1977.
- Lindgren L. and Kovalevsky J., Linking the Hipparcos Catalogue to the extragalactic reference system, *Astron. Astrophys.*, 304 :189+, December 1995.
- IERS conventions (1996), *IERS Technical report*, Juil. 1996, ed. McCarthy D.D..
- Marsh, J. G. and Lerch, F. J. and Putney, B. H. and Felsentreger, T. L. and Sanchez, B. V., The GEM-T2 gravitational model, *Journal of Geophysical Research*, 95,22043–22071, dec. 1990

- Mase R.A., Update to Mars coordinates frame definitions, *Jet Propulsion Laboratory Interoffice Memorandum*, 312.B 015-99, 1998.
- Mignard F. and Froeschle M., Linking FK5 to ICRF, *The New International Celestial Reference Frame, 23rd meeting of the IAU, Joint Discussion 7, 22 August 1997, Kyoto, Japan.*, 7 :E24+, 1997.
- Oosterwinter C. and Cohen C., New orbital elements for Moon and planets, *Celestial Mechanics*, 5 :317-395, 1972.
- Standish E.M., Orientation of the JPL ephemerides, DE 200/LE 200, to the dynamical equinox of J2000, *Astron. Astrophys.*, 114 :297-302, oct 1982.
- Standish E.M., JPL planetary and lunar ephemerides, DE403, *Jet Propulsion Laboratory Interoffice Memorandum*, 1995.
- Standish E.M., JPL planetary and lunar ephemerides, DE405, *Jet Propulsion Laboratory Interoffice Memorandum*, 1998.
- Stone R. C., CCD Positions for the Outer Planets in 1996-1997 Determined in the Extragalactic Reference Frame, *Astronomical journal*, 116, 1461-1469, sept. 1998.
- Tapley, B. D. and Watkins, M. M. and Ries, J. C. and Davis, G. W. and Eanes, R. J. and Poole, S. R. and Rim, H. J. and Schutz, B. E. and Shum, C. K. and Nerem, R. S. and Lerch, F. J. and Marshall, J. A. and Klosko, S. M. and Pavlis, N. K. and Williamson, R. G., The Joint Gravity Model 3, *Journal of Geophysical Research*, 101, 28029-28049, dec. 1996
- UAI, Proceedings of the XVIth general assembly Grenoble, 1976 *Trans. IAU XVI B*, Reidel, Dordrecht
- Wahr J.M., The forced nutations of an elliptical, rotating, elastic and oceanless Earth, *Geophys. Journal of Royal Astronomical Society*, 64, 705.