

# Application des techniques d'animation 3D à la magnétosphère terrestre

■ Bruno KATRA, Patrick ROBERT

*Centre d'étude des Environnements Terrestre et Planétaires (CETP/CNRS)*

## Mots clés

Magnétosphère terrestre,  
Application interactive,  
3D,  
Immersion,  
Mission spatiale,  
Java,  
Interface homme-machine

Depuis sa découverte dans les années 50, la magnétosphère terrestre, cette « bulle » magnétique qui enveloppe et protège la Terre du vent solaire, est un sujet d'étude qui intrigue, passionne et motive toute une communauté scientifique, qui cherche à mieux en comprendre la forme et les propriétés, ainsi que les phénomènes dont elle est responsable sur Terre comme les aurores boréales et australes. Et si une application immersive en 3D nous permettait de voyager au cœur de celle-ci comme dans un jeu vidéo ?

## 1. Introduction

Le terme même de magnétosphère n'étant pas forcément familier à tout le monde, il convient tout d'abord de le définir. De façon synthétique, la **magnétosphère terres-**

**tre** est une sorte de cavité autour de la Terre dans laquelle le champ magnétique d'origine interne est confiné dans un espace limité à cause de l'interaction entre ce champ et le vent solaire constitué de particules énergétiques émises

### L'ESSENTIEL

La magnétosphère terrestre fait l'objet depuis longtemps de nombreuses études visant à en définir la géométrie, les propriétés et le comportement. Des modèles de champ magnétique magnétosphériques tels que celui de Tsyganenko existent et ont été corroborés depuis près de 20 ans par des mesures in situ effectuées par des satellites de différentes missions spatiales internationales (ESA, NASA). Les missions satellitaires anciennes comme les plus récentes (à 4 ou 5 satellites, comme CLUSTER ou THEMIS), et l'analyse de leurs données, permettent d'appréhender aujourd'hui la magnétosphère en 3 dimensions. Notre projet est de fournir dans un premier temps une application interactive et immersive représentant la magnétosphère en 3D et animée dans le temps, basée sur le modèle théorique de Tsyganenko. L'approche que nous désirons apporter est de pouvoir se promener dans cette scène 3D animée sur le modèle d'un jeu vidéo du type FPS (*First Person Shooter*) : promenade virtuelle où l'on voit à travers les yeux d'un sujet. Dans un deuxième temps, il faudra pouvoir superposer au modèle dans lequel on se déplace les données issues des satellites afin, d'abord, de pouvoir effectuer une comparaison entre théorie et expérience, mais aussi et surtout de pouvoir donner un contexte à grande échelle des phénomènes locaux (en espace et en temps) observés par les satellites, comme par exemple les ondes de surface qui naissent et se déplacent à la surface de la magnétosphère. L'application a pour vocation d'être multi-plates-formes, open-source et évolutive afin de pouvoir intégrer les résultats de missions spatiales à venir.

### SYNOPSIS

The terrestrial magnetosphere has been for a long time the subject of many studies to define its geometry, properties and behaviour. Magnetospheric magnetic field models such as Tsyganenko exist and have been corroborated in nearly 20 years by local measurements made by satellites of various international space missions (ESA, NASA...). The satellite missions, old and newer with (4 or 5 spacecrafts), and corresponding data analysis, allow scientists to get a better knowledge of the magnetosphere in 3 dimensions. Our project is to provide an interactive and immerse application representing the 3D, time-animated magnetosphere based on the theoretical model of Tsyganenko. The approach that we want to bring is to be able to walk in this 3D animated scene like in an FPS video game (First Person Shooter): virtual walk where we see through the eyes of the walker. The second innovation would be to superimpose on the model in which you move the data from satellites, and so to be able to do not only a comparison between theory and measurement, but above all to give a general context at a large scale of the magnetic regions of space, where local and transients phenomena occurs, as for example the waves propagating at the surface of the magnetosphere. The application is designed to be multi-platform, open-source and evolving in order to integrate the results of future space missions.

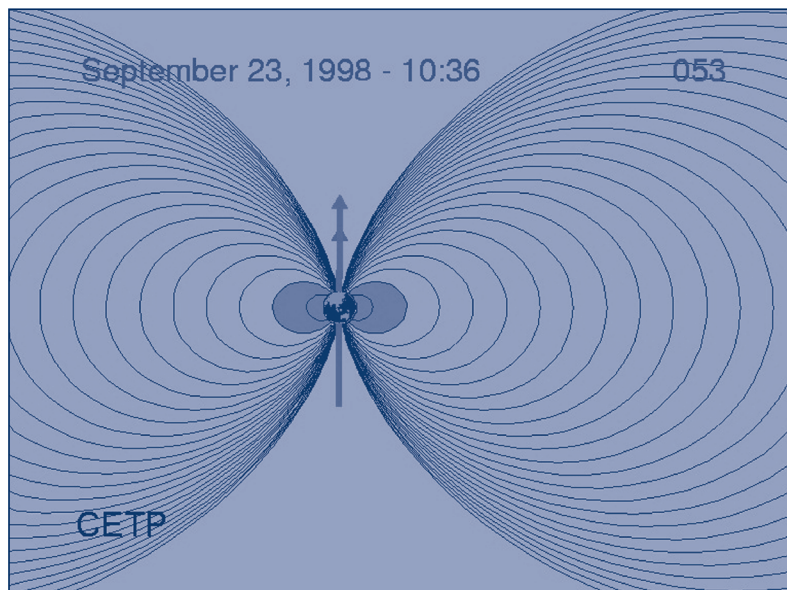


Figure 1. Le champ dipolaire de la Terre, en l'absence de vent solaire.

en continue par cette immense bombe à hydrogène en explosion permanente qu'est le Soleil.

On sait en effet depuis longtemps que la Terre se comporte comme un aimant géant et qu'il existe donc, de fait, un **champ magnétique** autour de celle-ci. Ce fait est connu depuis le 16<sup>ème</sup> siècle, époque à laquelle William Gilbert, médecin et chercheur à la cour anglaise, publie une étude qui propose cette interprétation pour expliquer le phénomène de la boussole. C'est historiquement la première fois que l'on parle du champ magnétique de la Terre, qui est un premier acteur indispensable pour la formation d'une magnétosphère.

Ainsi, en première approximation, le champ magnétique de la Terre se comporte comme le champ d'un dipôle classique (Cf. figure 1), forme qui rappelle la célèbre expérience des cours de physique/chimie de notre enfance : la limaille de fer placée sur une feuille de papier par dessus un aimant droit.

Il faudra attendre 1958 et l'observation de la ceinture de radiation par la mission EXPLORER 1 de la NASA (*National Aeronautics and Space Administration*), pour apporter la preuve effective de son existence et faire apparaître le 2<sup>ème</sup> grand acteur : **le vent solaire**. En effet, il apparaît dès lors que le champ magnétique de la Terre n'est plus celui produit par un aimant droit, car il est fortement déformé par le vent solaire qui lui confère une forme plus proche de celle d'une comète (Cf. figure 2)<sup>1</sup> : les lignes de force du champ magnétique interne, initialement dipolaires et symétriques autour de l'axe du dipôle magnétique, sont déformées par le vent solaire, qui crée une cavité fermée nommée magnétosphère, et une onde de choc en amont de cette cavité.

<sup>1</sup> Le calcul de la géométrie de la magnétosphère a été effectué à partir du modèle de champ de Tsyganenko et à l'aide d'une bibliothèque spécialement développée par le CETP.

Le vent solaire est un flux de plasmas chauds (majoritairement des ions et des protons) tirant leur origine de la forte activité nucléaire du Soleil. Ces flux sont éjectés dans toutes les directions de l'univers à des vitesses de l'ordre de 400 km/s et sont **nocifs à la vie sur Terre et à l'environnement**. C'est l'interaction entre ce vent solaire et le champ magnétique de la Terre qui crée cette bulle protectrice, que l'on a appelée magnétosphère, et qui agit donc comme un bouclier qui dévie ces flux de plasmas mortels.

Il y a donc 2 éléments qui conditionnent l'existence et la forme de la magnétosphère :

- **interne** : le champ magnétique naturel de la Terre, dont l'origine est lié à un effet dynamo du magma de fer en fusion du noyau ;
- **externe** : le vent solaire, qui déforme le champ magnétique et interagit avec celui-ci pour former une cavité où ce champ est confiné.

Ainsi, toute planète dotée d'un champ magnétique et baignant dans un vent solaire, comme c'est le cas de la Terre, est entourée d'une magnétosphère, dont la forme et les caractéristiques varient en fonction de ces paramètres. Il en existe par exemple autour de Jupiter et Saturne, et c'est probablement aussi le cas des exoplanètes magnétisées (en dehors du système solaire).

La manifestation visuelle la plus connue de l'interaction entre champs magnétique et vent solaire reste les aurores polaires (Cf. figure 3) : c'est un phénomène spectaculaire et insolite où, à la suite de la pénétration de particules chargées dans l'atmosphère, le ciel se colore de draperies ou de rubans lumineux. Ces observations sont connues depuis l'antiquité, et craintes comme une manifestation surnaturelle ou divine, ou encore comme le bord du monde supposé plat de l'époque.

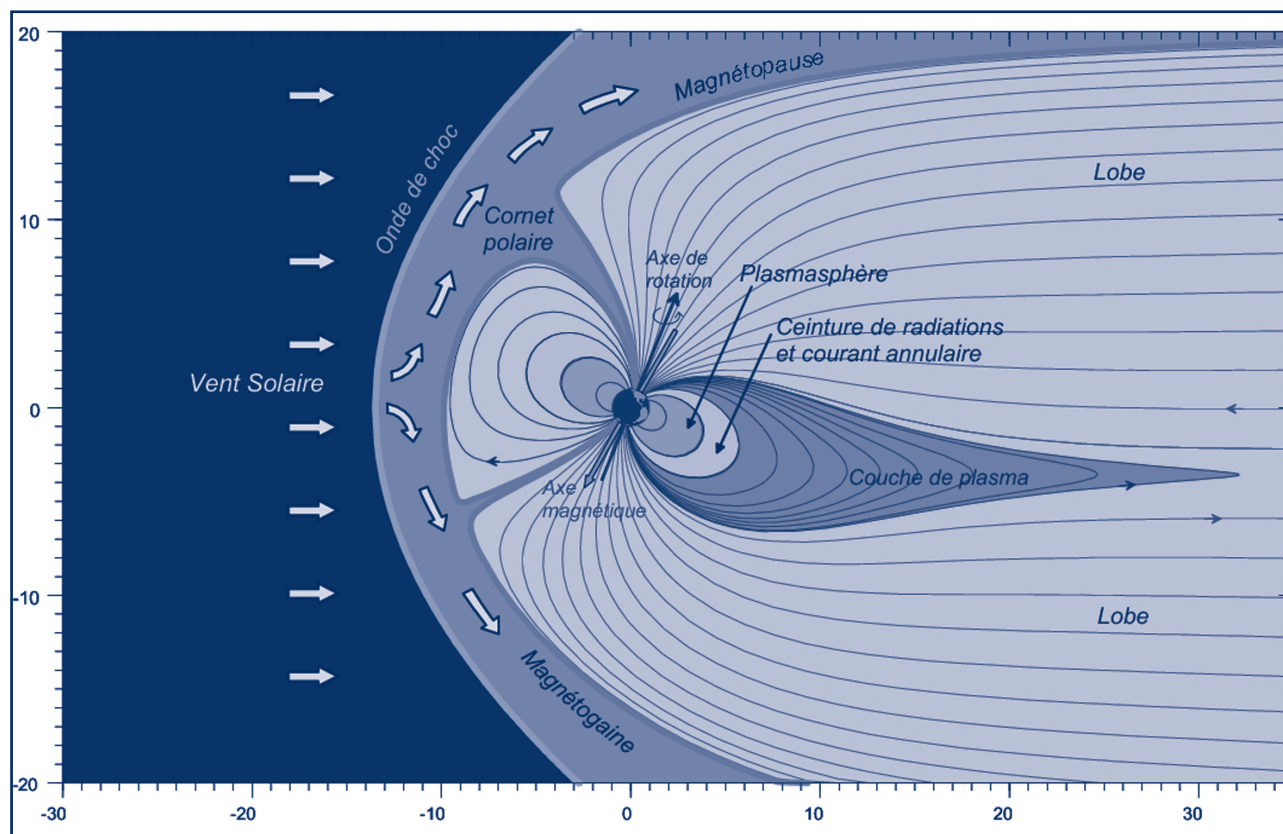


Figure 2. Visualisation des lignes de force du champ magnétique de la Terre, représentant la magnétosphère, en présence de vent solaire.

## 2. L'étude de la magnétosphère

L'étude de la magnétosphère revêt 2 facettes bien distinctes : **la théorie ou modélisation**, qui définit de façon mathématique et physique le sujet d'étude, et les **mesures in situ** à l'aide d'expériences embarquées sur des satellites. Dans le premier cas on essaie, en posant les conditions initiales les plus complètes et réalistes possibles, de décrire des événements physiques en simulant les interactions qui vont s'opérer entre le système étudié et les éléments externes. Dans notre cas, il existe par exemple depuis 1987, le modèle de Tsyganenko (dont de nombreuses améliorations ont été faites depuis) qui est un modèle de référence décrivant le champ magnétique de la magnétosphère, et dans lequel des données expérimentales ont été injectées pour définir certains paramètres. Ce modèle prend en entrée un point de l'espace, un indice d'activité solaire, et fournit en sortie la ligne de champ magnétique passant par ce point. L'autre facette que nous évoquions précédemment est **l'observation par satellite**, qui fournit de vraies valeurs relevées in situ au moyen de magnétomètres embarqués. Elles permettent dans un premier temps de corroborer ou non les modèles théoriques et donc de les affiner ou de les corriger. Elles permettent ensuite et surtout de révéler des événements nouveaux que ne peuvent pas mettre en évidence les modèles, qui ne décrivent que la forme générale, indépendamment des phénomènes

locaux et transitoires. Par exemple, il se passe à la surface de la magnétosphère des effets analogues à ceux qui se passent à la surface des océans, comme par exemple des effets de houles, de mini tornades, ou de déferlement de vagues, à ceci près qu'il s'agit de plasmas et de particules chargées plutôt que d'eau et de vent.

De nombreuses missions spatiales passées, présentes ou futures de l'ESA (*European Space Agency*) et de la NASA, ont pour objet l'observation et l'étude des phénomènes de la magnétosphère. Pour ne citer que les plus connues : GEOS (ESA) en 1977-78, ISEE (NASA) en 1977-78, également INTERBALL (ESA/NASA/Russie et Japon) en 1995-96, CLUSTER II (ESA) en 2000, THEMIS (NASA) en 2006, et prochainement MMS (NASA) en 2014. Les enjeux de l'étude et de la compréhension de la magnétosphère sont nombreux et s'étendent à des sujets d'études connexes de différentes disciplines :

- quels sont les mécanismes responsables des aurores polaires ?
- dans quelle mesure, ou dans quelles conditions, peuvent-elles être nocives à la santé ?
- quels sont les impacts du vent solaire sur l'environnement ?
- quels sont les mécanismes responsables du champ magnétique interne de la Terre ?
- comment se forment les ondes électromagnétiques



Figure 3. Exemple d'aurore boréale observée en Alaska.

observées par les satellites ? D'où viennent-elles et où vont-elles ? Comment interagissent-elles avec les particules venant du Soleil ?

Plus généralement, la magnétosphère offre un terrain d'études gigantesque et unique pour observer des phénomènes magnétiques et particuliers à haute énergie et mieux comprendre ainsi la dynamique de l'environnement magnétique et particulière de notre Terre et d'autres planètes analogues.

### 3. Problématique

Une fois l'existence de la magnétosphère reconnue et avérée par les instruments et les chercheurs, il survient un premier problème : il faut la représenter ! En effet, un champ magnétique dans l'absolu se mesure en chaque point de l'espace avec une direction et une intensité, donc de prime abord la magnétosphère est une immense pelote de vecteurs, de fait peu facilement représentable. On peut toutefois regrouper ces vecteurs en lignes de champs projetées dans un plan, ce qui nous offre le type de représentation 2D assez répandu comme celle de la figure 2, ou encore grouper astucieusement des familles de lignes de force pour obtenir des représentations 3D de type « pelure d'oignon » comme celles de la figure 4.

Cependant, ce qui apporte une vraie valeur ajoutée est la représentation en 3D des différentes frontières et des singularités. Seule la modélisation nous permet de décrire toute la magnétosphère mais on voit tout de suite qu'on a immédiatement envie de pouvoir superposer à des zones particulières de la magnétosphère les mesures in situ dont on dispose grâce aux observations satellites, afin de pouvoir se focaliser sur des phénomènes transitoires et locaux (des perturbations en des endroits précis, et d'une durée limitée). Cela nous amène à un aspect bien particulier de la problématique de représentation, qui pour l'instant n'a jamais été beaucoup exploité, à savoir la représentation temporelle : animer les lignes de champs en temps réel afin de les voir évoluer sur des cycles de 24 heures par exemple ou même sur des échelles saisonnières. Des codes développés au CETP par Patrick Robert permettent déjà cette représentation en 2D (voir [2]), mais une représentation 3D animée serait un gain considérable pour l'appréhension globale de la forme de la magnétosphère et de son comportement à des endroits spécifiques (déchirements de lignes de champs par exemple). Bien évidemment, la représentation en 3D soulève de nouveaux éléments de réflexion : en effet, qui dit 3D dit scène, référentiel, sujet et déplacement. A partir du moment où l'on peut représenter la magnétosphère en 3D et animée, on doit pouvoir manipuler cette scène simplement :

- pouvoir changer le point de vue (zoom, positions d'observation) ;

Représentation tridimensionnelle du champ magnétique terrestre au moyen du logiciel AVS sur machine Stellar/FPS-350.  
P. Robert - CNRS/CETP, 1990



Représentation tridimensionnelle du champ magnétique terrestre au moyen du logiciel AVS sur machine Stellar/FPS-350.  
P. Robert - CNET-CNRS/CRPE, 1990



Figure 4. Exemples de représentation de portions de magnétosphère en « pelure d'oignon » au moyen du logiciel AVS, sur machine Stellar/FPS-350 (voir [1]).

- faire des coupes dans des plans ;
- superposer de nouveaux éléments : données issues des satellites de différentes missions, orbites des satellites d'observation, etc. ;
- fonctionnalités de lecture : lecture, pause, accélérer ou ralentir le temps.

Avec les outils et les techniques actuels, l'incorporation, l'animation et la manipulation d'objets 3D simples (ou bien même d'une combinaison d'objets simples) tels que des cubes, boules, cylindres ou pyramides sont relativement aisées, seulement la magnétosphère est un ensemble de surfaces 3D complexes : un mécanisme de poupées russes ayant pour objet des sortes de tores déformés par des transformations affines complexes, voire même de façon non linéaire. On est contraint de calculer les lignes de champs une à une et, à chaque instant, de les regrouper avec pertinence en familles ayant des propriétés géométriques communes, et de trouver des modes de représentation viable impliquant de bien choisir les lignes à représenter. C'est une partie importante du travail, nécessitant la création d'algorithmes astucieux, et qui incombe pleinement au chercheur en fonction de ces contraintes et de ses connaissances de la topologie du champ magnétique réel.

Ces aspects rendent assez difficile la création rapide de scènes simples et, plus généralement, montrent bien la difficulté de faire des représentations 3D significatives et néanmoins simples de la magnétosphère.

Il faut enfin noter que la complexité de la représentation influe directement sur un aspect très important du projet : le calcul proprement dit des lignes de champs. Il existe en effet deux façons d'aborder le sujet : on peut estimer que le temps de calcul est acceptable et calculer à la demande les lignes de champs, on peut aussi mettre en place un système client-serveur où le client irait télécharger les lignes de champs nécessaires à la visualisation qu'il désire auprès d'un serveur distant où serait stockée une base de données contenant les lignes préalablement calculées. Les deux solutions offrent des avantages non négligeables mais aussi des lourdeurs qu'il faut considérer, comme la maintenance d'un serveur ou l'intégration de codes d'une tierce partie pour effectuer le calcul à la demande.

#### 4. Le projet : contraintes et choix techniques

Dans le cadre d'un mémoire d'ingénieur en partenariat avec le CNAM de Paris (Conservatoire National des Arts et Métiers), les auteurs du présent article ont eu pour objectif de développer une application informatique permettant la représentation 3D et la manipulation interactive de la magnétosphère.

#### 4.1. Description de la demande

- Offrir une représentation 3D du modèle de la magnétosphère animée en fonction du temps (temps réel ou élastique).
- Fournir une représentation dynamique et immersive : pouvoir se déplacer comme un sujet dans l'espace entourant la magnétosphère animée ou bien fixer une vue suivant les satellites en orbite par exemple.
- Pouvoir visualiser les trajectoires des satellites et leurs orbites dans la magnétosphère et en 3D.
- Pouvoir comparer de façon ludique, rapide et intuitive, les données du modèle et les données issues d'expériences de mesures embarquées sur satellites.
- Fournir un contexte à grande échelle des lignes de force et des frontières de la magnétosphère pour y positionner les phénomènes locaux et transitoires observés expérimentalement.
- Pouvoir afficher en même temps que les trajectoires des satellites, et en animation synchronisée, les données mesurées par ceux-ci pour voir à quels endroits de la magnétosphère correspondent certains événements transitoires intéressants.
- Pouvoir exporter les animations sous forme de fichiers vidéo, dans un format standard, afin de pouvoir les inclure dans des présentations ou de les rendre disponibles sur le Web.
- L'application doit pouvoir tourner sur des ordinateurs de puissance moyenne, c'est-à-dire ayant au plus 5 ans.

Le projet a commencé début 2008 et doit déboucher début 2009 sur une application pourvue d'une IHM (Interface homme-machine) permettant la visualisation ainsi que le contrôle des différents paramètres.

Il serait souhaitable que l'application soit multi-plate-forme voire même intégrable comme application Web. Du point de vue de la licence, le projet est développé sous licence libre afin que ce produit puisse être largement diffusé.

#### 4.2. Fonctionnalités du produit

- Installation simplifiée avec un exécutable qui s'occupe de l'initialisation de l'application (vérification des pré-requis, ...).
- Choix d'une date et d'une plage de temps puis visualisation de la Terre et de la magnétosphère à la date choisie en 3D sous forme d'enveloppes magnétiques en pelure d'oignon : calcul à la demande ou téléchargement à partir d'une base locale ou distante.
- Déplacement à la souris et au clavier dans l'univers 3D créé en changeant le point de vue.
- Export des animations 3D sous forme de vidéos (AVI, MPEG4...).
- Visualisation et animation des positions et trajectoires d'orbites sur la plage choisie pour les 4 satellites CLUSTER mais aussi d'autres missions présentes,

passées ou à venir (voir le site de CLUSTER pour plus de détail, [3]).

- Affichage des résultats des satellites en fonction de leur position. Exemple : on a une animation de la magnétosphère et des satellites CLUSTER en 3D avec à droite les mesures de champs magnétiques et électriques, et les données auxiliaires le long de la trajectoire des satellites.
- Comparaison locale entre le modèle de Tsyganenko et le champ réellement mesuré. Exemple : pendant une animation, on peut faire un arrêt sur image, choisir un plan parmi les 4 faces du tétraèdre formé par les 4 satellites de CLUSTER et tracer le champ mesuré à cet instant en superposition du champ prédit par le modèle à cet endroit.
- Si possible, il serait souhaitable que l'application soit scriptable : que l'on puisse agir via un script ou un interpréteur de commande sur le comportement, l'aspect et les paramètres divers des objets, caméras et lumières afin de pouvoir réaliser des présentations ou automatiser des démonstrations.
- Pour le point important du calcul des lignes de champs, il a été décidé d'implémenter une solution hybride utilisant différents moyens pour obtenir les lignes nécessaires aux visualisations demandées par les utilisateurs. Cette solution est détaillée un peu plus loin (voir *Présentation du produit*).

Un soin particulier a été apporté au choix de l'environnement de développement. Après avoir dressé un état de l'Art du sujet, il s'est avéré qu'il n'existait que peu d'études ou de projets similaires actuellement. Nous avons donc examiné tout un ensemble de logiciels, langages, solutions commerciales et divers outils permettant la création et la manipulation de scènes 3D avec les critères suivants :

- quelles fonctions sont disponibles dans l'API 3D (gestion d'animations en 3D) ?
- peut-on scripter les animations ?
- l'application peut-elle être multi-plate-forme ?
- peut-on calculer les lignes de champs en temps quasi réel ou faut-il les télécharger d'une source locale ou distante ?
- outil propriétaire ou logiciel libre ?

Parmi les solutions étudiées (Blender, Java3D, Adobe Director, Dassault Virtools, Flash, ...) et aux vues des tests effectués, des fonctionnalités désirées et du savoir-faire des participants à ce projet, c'est la solution Java/Java3D qui s'est détachée des autres et ce, pour plusieurs raisons : l'API Java3D est évoluée et robuste (gestion avancée des événements, IHM, morphing), Java est multi-plate-forme et dispose d'API évoluée en réseau et en calcul qui offre la possibilité de calcul ou de téléchargement du modèle de magnétosphère. L'interfaçage est possible avec un langage de script interactif : il y a de nombreux projets

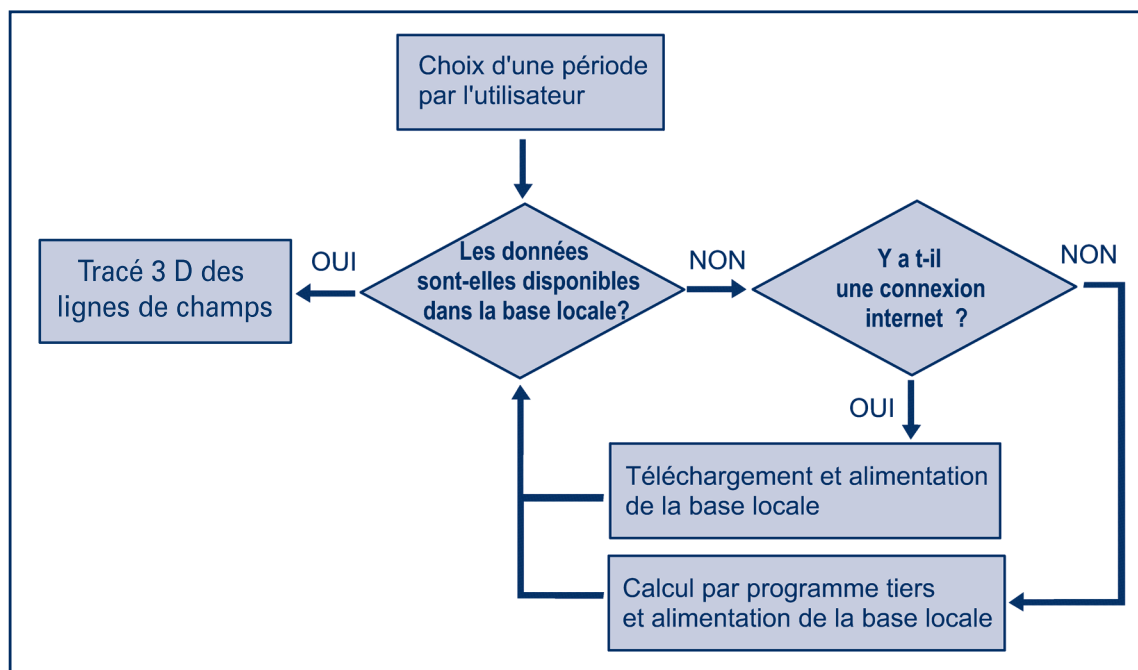


Figure 5. Organigramme de la récupération des coordonnées des lignes de champs.

existants et documentés (Jython par exemple à base de scripts Python). Enfin, le déploiement d'application Java peut s'avérer simple et transparent pour l'utilisateur via le mécanisme Java Web Start qui permet l'installation et la configuration d'une application distante sur un poste client directement par le Web en utilisant un fichier de petite taille contenant l'adresse de l'application et les paramètres divers d'installation (voir [4] et [5]).

## 5. Présentation du produit

A l'heure de la publication de cet article, le projet est encore en cours de développement dans les délais prévus. L'architecture de déploiement et de mise à disposition des données est en phase de test, ainsi que l'application cliente permettant la visualisation et la manipulation. L'ouverture au public d'un site Web dédié devrait voir le jour dans le courant du premier trimestre 2009. L'installation de l'application se fera comme prévue par Java Web Start en récupérant sur le site Web un fichier permettant le téléchargement et l'installation automatique.

Une fois l'application lancée, l'utilisateur doit choisir une période pendant laquelle les lignes de champs vont être générées et animées en fonction du temps. La solution que nous avons choisie est hybride entre le calcul à la demande et le pré-calcul, inspirée par des systèmes existants comme celui de Google Earth : une fois la période demandée par l'utilisateur, l'application regarde d'abord si les lignes demandées sont présentes dans une base locale (sur le poste client), si non, elle essaie d'ouvrir une connexion vers un serveur dédié où sont stockées des coordonnées de lignes de champs et télécharge les lignes nécessaires

afin de les stocker sur la base locale. En dernier recours, s'il n'y a pas de connexion Internet disponible, elle lance le calcul des lignes en local et elle complète la base locale (Cf. figure 5).

L'importance d'une base locale persistante se complétant au fur et à mesure des requêtes nous est apparue comme inévitable dans la mesure où l'expérience prouve que, statistiquement parlant, les chercheurs vont souvent redemander les mêmes dates pour leurs études et leurs démonstrations. A partir de cette considération, on voit bien que les temps de rapatriement des lignes de champs diminuent au fur et à mesure de l'utilisation de l'application, la base locale se complétant petit à petit.

Une fois les lignes de champs récupérées et tracées, l'utilisateur peut démarrer, arrêter, accélérer ou ralentir l'animation et se déplacer au cœur de l'animation à l'aide du clavier et de la souris avec un système de navigation classique des jeux vidéo de type « *First Person Shooter* », où l'on se déplace en voyant au travers des yeux d'un sujet : les flèches du clavier dirige le déplacement du sujet (avant, arrière, translation à gauche et à droite) alors que la souris dirige la direction dans laquelle les « yeux » pointent. On dispose aussi d'un tableau de bord, de visualisation, sur le côté de l'écran offrant le contrôle aux différents paramètres tels que la distance et la vitesse, ainsi que des options pour faire apparaître les satellites et leur tracé d'orbite sur la période demandée pour différentes missions spatiales (Cf. figure 6).

La méthode d'animation choisie est le *morphing* plutôt que le simple affichage cadencé d'une série d'images. La différence notable qu'apporte le *morphing* est certaine-



Figure 6. Interface graphique permettant la visualisation 3D de la magnétosphère et l'examen simultané des données observées par un des 4 satellites de CLUSTER.

ment la création d'images intermédiaires par interpolation. Cette méthode offre une meilleure fluidité de l'animation (pas de discontinuité ou de décrochage) et peut permettre de calculer moins de lignes : les lignes intermédiaires étant interpolées, on n'a plus besoin de les calculer !

On notera aussi la présence d'onglets supplémentaires au-dessus de la fenêtre de visualisation comme l'onglet « Cropped View » permettant de définir différents plans de coupe dans la magnétosphère (Cf. figure 6).

## 6. Applications

En dehors de l'aspect ludique d'un tel produit, son enjeu scientifique est beaucoup plus sérieux qu'il n'y paraît. En effet, tous les phénomènes importants se produisant à

l'intérieur de la magnétosphère, comme par exemple les sous orages magnétiques qui sont de brusques reconfigurations du champ magnétique dans la queue de la magnétosphère (coté nuit) et qui conduisent à de fortes émissions d'ondes et de précipitation de particules (dont les fameuses aurores polaires), nécessitent de connaître la topologie à grande échelle des lignes de champs au cours du temps. De même, tous les phénomènes situés à la surface de la magnétosphère (la magnétopause) s'organisent autour du champ moyen, de la forme générale de la magnétosphère (onde se propageant à la surface, onde de dérives se propageant en azimut, ondes guidées par les lignes de force, etc.). Tout ces phénomènes, qui apparaissent en un endroit particulier, sont en fait fortement reliés à d'autres phénomènes se produisant à un autre endroit : ainsi, on a longtemps cru que les aurores polaires étaient dues à la préci-

pitation de particules du Soleil pénétrant à l'intérieur de la magnétosphère par ses points faibles que sont les cornets polaires ; en fait, elles résultent d'une suite d'interactions et de cheminements de particules beaucoup plus complexes à travers toute la magnétosphère.

Ainsi, on a besoin en permanence d'une représentation dans l'espace et dans le temps, et à large échelle, de l'ensemble de la topologie des lignes de force du champ magnétique, pour comprendre et situer dans l'espace les phénomènes observés au cours du temps, dans une magnétosphère constamment changeante. Un tel outil, lorsqu'il sera achevé, et disponible pour tous sur n'importe quelle machine, et en particulier sur un PC portable, sera précieux et apprécié par toute une communauté scientifique.

## Références

- [1] Quelques représentations 2D et 3D de la magnétosphère, [http://pro.cetp.ipsl.fr/Images\\_magnetospheres\\_2D/](http://pro.cetp.ipsl.fr/Images_magnetospheres_2D/), [http://pro.cetp.ipsl.fr/Images\\_magnetospheres\\_3D/](http://pro.cetp.ipsl.fr/Images_magnetospheres_3D/)
- [2] Film pédagogique de présentation de la magnétosphère, <http://cluster.cetp.ipsl.fr/tsy87/mainframe.html>, [http://pro.cetp.ipsl.fr/CD\\_TSYGANENKO\\_87\\_v1.5/](http://pro.cetp.ipsl.fr/CD_TSYGANENKO_87_v1.5/) <http://cdpp.cesr.fr/downloads/site/mainframe.html>
- [3] Site Web officiel de la mission CLUSTER 2, <http://cluster.cetp.ipsl.fr/accueil/framepa.html>
- [4] Présentation et démos Java3D, <https://java3d.dev.java.net/>
- [5] Technologie Java Web Start, <http://java.sun.com/javase/technologies/desktop/javawebstart/index.jsp>

## Les auteurs

**Patrick Robert** est entré au CNRS en 1977, après un doctorat en géophysique spatiale en 1972, en qualité d'ingénieur de recherche au CRPE, où il a travaillé pendant 8 ans dans le cadre de la physique des plasmas spatiaux et de la magnétosphère terrestre sur le traitement des premières données satellitaires de ce type (GEOS), en collaboration avec le CNES. Il a ensuite pris en charge pendant 9 ans le département de traitement des données, puis créé et dirigé jusqu'en 2000 le département informatique du CETP. Après son expérience sur GEOS et son travail sur la préparation du projet des 4 satellites CLUSTER de l'ESA, il développe depuis des méthodes de traitements de données spécifiques et des simulations. Il a aussi réalisé les traitements du satellite chinois « Double-Star-Probe » et s'est investi récemment sur les 5 satellites de THEMIS de la NASA, lancés en février 2007, où il a participé aux développements techniques et études scientifiques en collaboration avec l'université de Berkeley. Parallèlement aux activités expérimentales, il poursuit depuis très longtemps des modélisations et des représentations 2D et 3D de la magnétosphère terrestre. Pour en savoir plus : <http://pro.cetp.ipsl.fr/>

**Bruno Katra** a d'abord exercé à mi-temps au CETP en parallèle de ses études, de 2000 à 2004, où il était chargé de la conception et de la réalisation de divers sites Web pour la mise à disposition des données des missions CLUSTER (ESA) et Double Star. Il travaille aussi en amont sur le développement et le déploiement de chaînes de traitement liées à ces 2 missions et mène différentes études et développements sur le traitement et la distribution de contenu multimédia. Après l'obtention d'une Maîtrise en Informatique, il est embauché au CNRS en 2004 comme ingénieur d'études, affecté au CETP. Il y pilote des chaînes de traitement, réalise des interfaces homme-machine en Java et développe des logiciels d'analyse de données pour différents départements de chercheurs du CETP. Depuis le début de l'année, il travaille sur un mémoire consacré au sujet sus cité, en vue de l'obtention d'un diplôme d'ingénieur au CNAM.