

AUVERGNE

Sciences

N° 67 - décembre 2007

**DE COPERNIC À GALILÉE,
L'ÉGLISE ET LA SCIENCE**

**INTRODUCTION À LA MÉTÉOROLOGIE
DE L'ESPACE**

**TOISES, MUIDS, POTS ET LES AUTRES,
LES MESURES EN FRANCE AVANT 1789**

BULLETIN DE L'ADASTA

ASSOCIATION POUR LE DÉVELOPPEMENT DE L'ANIMATION SCIENTIFIQUE ET TECHNIQUE EN AUVERGNE



Michel NARANJO

Nicolas Copernic, érudit du XVI^e siècle, avide de savoir, s'investit dans tous les domaines : théologie, médecine, mathématiques, économie et astronomie. Il confirme les résultats d'Aristarque de Samos qui, en -208 s'était opposé au géocentrisme ; il avait déclaré que la terre tournait autour du Soleil et sur elle-même. En 1632 et 1633 eut lieu le **procès de Galilée**, à propos de la publication d'un ouvrage ouvertement favorable à l'héliocentrisme. Lors d'une conférence du **Professeur Louis Avan** dans le cadre de la « Fête de la Science 2006 » le public fut enthousiasmé par le récit de cette période s'étendant de « **Copernic à Galilée** », qui marqua une rupture entre la science et la religion. Pour notre revue « Auvergne-Sciences » il nous a fait l'honneur d'un important article en six tableaux, décrivant minutieusement quels furent les apports scientifiques dans cette période, et montrant le développement prodigieux de la science qui suivit.

En 1981 **Jean Paul II** nomma une commission d'étude composée de théologiens, de savants et d'historiens, afin « de faire disparaître la défiance que le procès de Galilée oppose encore, dans beaucoup d'esprits, à une concorde fructueuse entre science et foi ». A la tête de cette commission se trouvait le Cardinal Poupard, conférencier invité au Colloque Pierre Teilhard de Chardin à Clermont-Ferrand en 2005, auquel l'ADASTA était associée entre autres en publiant un numéro spécial de la revue « Auvergne-Sciences » consacré aux « Savants et Inventeurs d'Auvergne ». La procédure de réhabilitation largement avancée par Jean-Paul II sera-t-elle achevée par Benoît XVI ? L'ADASTA prendra sa part dans les débats attendus dans le cadre de l'Année Mondiale de l'Astronomie en 2009 en intensifiant ses animations à l'aide de ses planétariums à destination de tous les publics, et en mettant sa revue « Auvergne-Sciences » au service de cette manifestation mondiale.

Au XXI^e siècle, la météo de l'espace fait l'objet d'une recherche scientifique, et le **Professeur Vincent Barra** nous montre comment la connaissance de celle-ci peut permettre de comprendre certains problèmes climatiques. La recherche c'est aussi l'expérience Atlas au CERN nous permettant de découvrir ce qui s'est passé 10^{-12} secondes après le Big Bang. Notre ami **Claude Lanet**, délaissant momentanément ses volcans et ses « cailloux », nous a relaté la passionnante visite que les membres de l'ADASTA et de la SFEN ont effectuée en juin dernier à Genève.

La physique se nourrissant de mesures il est fort intéressant de se transformer quelques instants en historien pour suivre les explications du **Professeur Pierre Charbonnier**. Il nous montre comment les unités d'avant 1789 avaient leur logique et étaient fortement ancrées dans la conscience collective locale, le système métrique ayant apporté, outre la simplification, la correspondance des mesures entre elles.

L'année 2008 s'annonce fertile en conférences de l'ADASTA faisant une large place aux problèmes environnementaux dont notre revue « Auvergne-Sciences » se fera l'écho.

Michel NARANJO,
Président de l'ADASTA

Merci à nos sponsors



Comité de rédaction de la Revue Auvergne-Sciences

Président : Paul Avan

Rédacteur en chef : Philippe Choisel

Membres : Jocelyne Allée, Nathalie Andréoletti, Georges Anton, Vincent Barra, Jean-Claude Capelani, Jean Chandezon, Luc Dettwiller, Paul-Louis Hennequin, Michel Naranjo, Annie Ville.

Photo de couverture : Crédit au Professeur Louis Avan

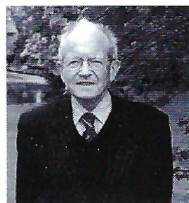
Remerciement également aux auteurs des autres photos.

Impression : Imprimerie Porçu - Cournon d'Auvergne

© Toute reproduction partielle ou totale interdite. Les articles publiés sont de la responsabilité exclusive de leurs auteurs

De Copernic à Galilée, l'Eglise et la Science	3
Introduction à la météorologie de l'espace	19
Toises, muids, pots et les autres, les mesures en France avant 1789	25
Compte-rendu de la visite SFEN ² /ADASTA	33
Fête de la Science 2007	35

De Copernic à Galilée - L'Église et la science en six tableaux



Par **Louis AVAN**

Professeur Honoraire du CNAM

(Conservatoire National des Arts et Métiers de Paris), Membre actif de l'ADASTA

D'après la conférence donnée le 12 octobre 2006 à l'Ecole Supérieure de Commerce de Clermont-Ferrand en partenariat avec l'ADASTA – Maison de l'Innovation, dans le cadre de la Fête de la Science

PREMIER TABLEAU - SITUATION A LA NAISSANCE DE COPERNIC :

1057 : Première observation de la Comète de Halley par les Chinois

Vue partielle de la Tapisserie de la Reine Mathilde (Bayeux). Fig. 1 (En fin d'article)

Le 14 février 1473, Nicolas Copernic naît à Torun en Pologne. Les descriptions d'un Univers géocentrique – la Terre fixe au centre du monde selon Aristote et Ptolémée -, règnent sans partage et sans correction depuis plus de mille ans. **L'Almageste**, en arabe « La Très Grande Composition » (en 13 volumes)... l'Almageste, oeuvre magistrale, domine la science astronomique du II^{ème} au XVI^{ème} siècle de notre ère.

Publié de 127 à 141 à partir des résultats accumulés depuis Hipparque (II^{ème} siècle avant J.C.) – déterminant la position et la luminosité d'environ 800 étoiles – à partir également des observations sur les planètes, Ptolémée déduit les dimensions et les vitesses de rotation des « épicycles et déférents ».

Ptolémée doit à Hipparque l'idée de décrire le mouvement des planètes à l'aide de deux mouvements circulaires : chaque planète, Mercure, Vénus, Mars, Jupiter est supposée décrire un petit cercle à une vitesse uniforme

(l'épicycle) tandis que son centre se déplace, uniformément, sur un grand cercle appelé **déférent**.

On remarque que le centre du déférent est lui-même voisin du centre de la Terre, laquelle est supposée fixe au centre de l'Univers. Le système de Claude Ptolémée est « géocentrique ». Les résultats de Ptolémée sont si précis, globalement, que l'Almageste devient « La Bible des Astronomes ». Par exemple : dates et caractéristiques des éclipses sont prévues avec plus de certitude longtemps à l'avance. Les boucles rétrogrades de Mars sont expliquées. Fig.3 (En fin d'article)

Mais Ptolémée a été obligé de compliquer le mouvement de la Lune : le centre du cercle déférent est excentré par rapport à la Terre et le point par rapport auquel le mouvement de la Lune est uniforme est lui-même décalé : ce point s'appelle l'**équant**. Moyennant cette « tricherie géniale » Ptolémée montre que quatre données de l'observation suffisent pour déterminer mathématiquement les éléments de composition des mouvements circulaires uniformes.

Trois composantes distinctes se mêlaient dans l'Almageste :

- Une vision du monde (la cosmologie)
- Un outil mathématique puissant (la trigonométrie sphérique)
- Une astronomie pratique : pour plus de 1000 étoiles, la voûte céleste répond à la description de Ptolémée.

Pendant 13 siècles, les astronomes n'apporteront que des **aménagements** « cosmétiques » au modèle Ptolémaïque.

Arrière-plan historique...

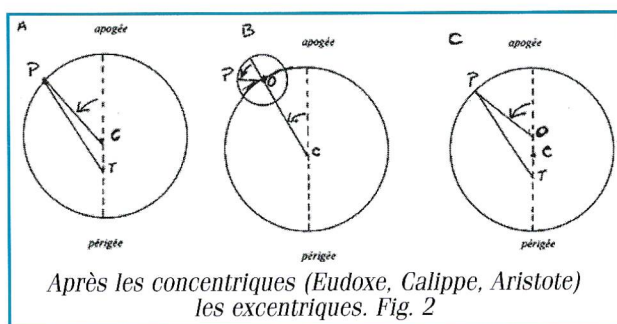
Et tout d'abord, le « géocentrisme hémocentrique ».

« C'est avec Parménide et son affirmation de la sphéricité de la Terre et du Ciel que l'on peut commencer à parler de géocentrisme »

Platon fut l'un des premiers à établir un lien entre la perfection divine et la perfection des figures géométriques (Saint Augustin, dans les « Dialogues philosophiques » Desclée de Brouwer. 1955 p. 364 n'hésite pas à étayer ses considérations sur l'âme par des « démonstrations empruntées à la géométrie »). Dans un célèbre passage du Timée, 36c-d, Platon met en scène le demiurge partageant l'âme du monde en deux bandes formant la lettre grecque Chi (X : l'angle aigu figuré par cette lettre grecque correspondrait à l'angle entre le plan de l'équateur céleste et le plan de l'écliptique).

Cette scène indiquerait une perception relativement claire de deux phénomènes distincts : d'une part l'entraînement du ciel des fixes et des planètes dans leur révolution quotidienne vers l'Ouest, d'autre part celui propre aux planètes dans leur révolution sidérale vers l'Est avec des vitesses inégales (un lien particulier entre Mercure, Vénus et le Soleil est reconnu : une période sidérale d'un an leur est attribuée – erreur géocentrique qui subsistera jusqu'à Copernic).

Pour Platon, dans le Livre VII des Lois (821b – 822 c), « parler d'errance pour les planètes est blasphématoire puisque ces objets célestes sont des dieux »... « chacun de ces astres parcourt en effet la même route, et non pas plusieurs, mais en cercle une seule (route) toujours, tandis qu'en apparence multiple est la trajectoire ». On rencontre ici avec Platon la naissance du mouvement circulaire à vitesse uniforme qui sera systématisée par Aristote – et conservée ! par Copernic et Galilée !!



Aristote, prolongeant les tentatives d'Eudoxe et de Callipe, pose d'abord le « premier Mobile », sphère ultime entraînant les étoiles fixes dans leur révolution diurne. Puis il pose un système global de sphères corporelles formant une totalité « organique » entre le Ciel ultime et la dernière sphère de la Lune.

« A corps simple, mouvement unique » (De Caelo I, 2) et les sphères célestes sont des corps simples.

Raisons physiques à l'appui, et quoi qu'il en soit de l'absence de pertinence de certaines d'entre elles, Aristote postule l'unité, la finitude, l'éternité et la sphéricité du Cosmos. En plus des quatre éléments d'Empédocle (terre et eau, air et feu), répartis en sphères concentriques, il y a dans le Cosmos un cinquième élément, l'éther, dont l'essence est d'accomplir éternellement un mouvement circulaire uniforme autour du centre de ce même Cosmos. Pour Aristote le géocentrisme devient une réalité nécessaire et évidente. Et, parce que ce mouvement circulaire uniforme se distingue radicalement du mouvement rectiligne par l'absence de contraire, l'incorruptibilité du Ciel en est une conséquence nécessaire (Aristote. Métaphysique. Paris. 1953. p 699. n.6).

Le rayonnement prestigieux de la science grecque : Pythagore, Euclide, Eratosthène, Archimède. Hipparque qui, lui, avait remarqué, par comparaison avec une observation ancienne de Timocharis – qu'en un peu plus de 150 ans l'Épi de la Vierge, s'est déplacé de 2 degrés d'arc ! ... tout cela nous semble avoir conforté pendant près de 1900 ans, le privilège de la circularité des orbites... Toujours est-il que Ptolémée, le premier, est tributaire d'Aristote.

Ptolémée ajoutait que les mouvements « des cinq planètes, du Soleil et de la Lune », réguliers et uniformes « sont propres à la nature des choses divines, lesquelles sont étrangères aux disparités et désordres... »

Dans cette perspective historique, n'oublions pas que vers -320, le savant grec Héraclide du Pont émettait l'hypothèse que la Terre tourne sur elle-même... tandis qu'anticipant sur Copernic, Aristarque de Samos fut un peu plus tard l'un des premiers à concevoir l'idée d'une double rotation de la Terre sur elle-

même comme Héraclide – et autour du Soleil : ce qui le fit accuser d'impie. Ces hypothèses furent ensuite longtemps occultées.

● ● ● ● ● DEUXIEME TABLEAU - NICOLAS COPERNIC

**(Nikolaus Koperniki)
Astronome polonais
(Torun 1473 – Frauenburg 1543)**

Copernic est d'abord étudiant à Cracovie. Nous résumons les principales périodes de sa vie :

Election comme chanoine (il ne sera jamais prêtre) en 1495. Il rejoint Bologne (Italie) pour y préparer un doctorat en droit canon (1496), mais semble marquer une préférence pour l'astronomie. Il devient l'assistant de l'astronome Domenico Maria Novara. Le 9 mars 1497 à 24 ans, Copernic réalise sa première observation astronomique ; la Lune occulte l'étoile Aldebaran vers onze heures du soir. Copernic utilisera cette observation pour estimer la parallaxe lunaire.

Le 6 novembre 1500 : observation à Rome de l'éclipse partielle de Lune.

27 juillet 1501 : Copernic se présente devant le chapitre de Frauenburg et obtient 2 années supplémentaires pour terminer son doctorat en droit canon, et étudier la médecine. Docteur en droit canon devant l'Université de Ferrare le 31 mai 1503. Retour définitif en Pologne. Double activité : astronomie, gestion de fermages du chapitre. En 1517 : « Essai sur la frappe de la monnaie ».

Vers 1513, en tout cas avant le 1^{er} mai 1514 : premier écrit astronomique (manuscrit anonyme et sans titre aujourd'hui nommé « Commentariolus ». « Il fallait bien que l'intuition d'Aristarque refasse surface un jour ou l'autre » (Pierre-Noël Mayaud). [Déjà Anaxagore, de 500 à 448 avant J.C, avait été condamné pour impiété pour avoir affirmé que le Soleil est une boule de feu plus grande que le Péloponèse]. Le manuscrit de 6 feuillets expose la théorie d'un « auteur » qui affirme que « La Terre se déplace tandis que le Soleil reste immobile. » En fait, selon le troisième postulat du

« Commentariolus » : « Tous les orbés entourent le Soleil qui se trouve pour ainsi dire au milieu d'eux tous, et c'est pourquoi le centre du Monde est au voisinage du Soleil ».

En tout cas, dès 1514, Copernic a choisi une forme d'héliocentrisme comme système du Monde.

« De Revolutionibus orbium caelestium », « De la Révolution des orbés célestes », véritable Almageste des temps modernes, amorce de la grande révolution astronomique et physique, est très probablement en gestation dès 1520. Il n'est pas certain qu'il ait eu l'intention de publier un jour cet ouvrage, malgré l'insistance de son ami le plus proche, Tiedemann Giese (1480 – 1550), alors évêque de Chemlo. A l'automne 1535, Copernic annonce au secrétaire du roi de Pologne qu'il avait rédigé de nouvelles tables planétaires « qui devaient servir de bases au calcul d'un almanach beaucoup plus exact que ceux qui étaient alors en circulation ». Copernic souhaitait que ces tables planétaires soient publiées. Le manuscrit ne sera jamais édité.

George Joachim Von Laudun, dit Rhéticus, (1514-1574) unique disciple que Copernic eut de son vivant, fit une copie du manuscrit, en y apportant, avec l'accord de l'auteur, des corrections mineures.

Le Duc Albert de Saxe fut prié par Rhéticus, le 29 août 1541, d'intervenir auprès de l'Electeur et de l'Université de Wittenberg. Le Duc répondit, mais il semble que l'autorisation de publication de « De Revolutionibus orbium caelestium » ne fut accordée ni par l'Electeur, ni par l'Université.

En 1542, Rhéticus parvient à publier, sans difficulté, à Wittenberg, un ouvrage purement technique de Copernic « De lateribus et angulis triangulorum ». Le problème était différent pour « De Revolutionibus orbium caelestium » dans une citadelle luthérienne, Wittenberg. Les réactions anti-coperniciennes y étaient très fortes (l'Eglise catholique devait « se rattraper » contre cet ouvrage majeur : « De la Révolution des orbés célestes »).

Rhéticus prit un congé et gagna Nuremberg où résidait l'imprimeur Pretreius, favorable à Copernic. C'est chez lui que furent imprimés, en juin 1542, les deux premiers livres « De Revolutionibus » à la fin mai 1542. Copernic composa une très belle dédicace au Pape Paul III, plaidoyer en faveur de la liberté d'expression, plein de vigueur intellectuelle et de courage.

*Lorsque je me représentais combien **absurde** allaient estimer ma doctrine ceux qui savent être confirmée par le jugement de nombreux siècles l'opinion que la terre est immobile au milieu du ciel comme si elle en était le centre, moi qui, au contraire affirme que la terre se meut, j'ai longuement hésité. (f.iiv)*

*Comme j'agitais en moi-même ces idées, le mépris qui était à craindre en raison de la nouveauté de l'**absurdité** de mon opinion m'avait presque poussé à interrompre définitivement l'oeuvre que j'avais commencée. (f.iiir)*

*[Après avoir parlé de personnes « très éminentes et savantes » le poussant à publier], il se peut, disaient-elles que toute **absurde** que paraisse maintenant au plus grand nombre ma doctrine du mouvement de la terre, elle ne doive en obtenir que plus d'admiration et de faveur, une fois qu'on aura vu par l'édition de mes commentaires les ténèbres de l'**absurdité** dissipées par les plus claires démonstrations. (f.iiir)*

*[Après avoir rappelé que des auteurs anciens avaient envisagé le mouvement de la terre], l'occasion m'étant ainsi donnée, j'ai commencé moi aussi d'envisager le mouvement de la terre. Et bien que l'opinion semblât **absurde**, néanmoins, dès lors que je savais que d'autres avaient eu la liberté d'imaginer (**ingere**) n'importe quels cercles en vue d'expliquer les phénomènes célestes, j'estimais qu'on me permettrait sûrement à moi aussi d'examiner si, en supposant quelque mouvement pour la terre, on pouvait trouver des explications de la révolution des orbites célestes plus solides (**firmiores**) que celles de mes prédécesseurs. (f.iiir)*

Si d'aventure de vains discoureurs qui, tout en étant totalement ignorants des mathématiques, prétendent néanmoins juger de ces matières et qui, en raison de quelque passage de

*l'écriture malignement détournée (**deterquere**) dans le sens de leur opinion, osent blâmer et attaquer mon ouvrage, eh bien ! je ne me soucie aucunement d'eux ; mieux même, je méprise leur jugement comme téméraire. (f.iiiiv)*

Suit aussitôt, dans le même style, la célèbre invective contre Lactance, ce « **piètre mathématicien** ». Puis la **Dédicace** s'achève en évoquant la réforme du calendrier débattue au Concile du Latran sous Léon X et encore en suspens en 1543 ; Copernic, sur ce point, peut avancer avec raison que sa détermination de la longueur de l'année tropique apporte un élément essentiel qui permettra de réaliser cette réforme.

(Pierre-Noël Mayaud). « Le Conflit entre l'Astronomie nouvelle et l'Écriture Sainte aux XVII^{ème} et XVIII^{ème} siècles » Volume I (sur un total de 6 volumes) Ed. Honoré Champion. 2005. p. 202-203.

Rhéticus ne put rester longtemps à Nuremberg pour surveiller toute l'édition. Pretreius confia la tâche de réviseur à un autre ami, Andreus Oslander, éminent pasteur luthérien, passionné de mathématiques, qui écrivit une lettre préface (non signée). Elle diminuait considérablement la portée de l'héliocentrisme. Beaucoup y virent l'oeuvre de Copernic, présentant le système héliocentrique comme une hypothèse parmi d'autres, « fiction » calculatrice un peu plus efficace que la fiction ptoléméenne.

Copernic voulait bien livrer au public des colonnes de chiffres, mais non les principes novateurs sur lesquels ces chiffres étaient fondés. Il pensait, comme il l'écrit au livre I de « De Revolutionibus » qu'il fallait « ne confier les secrets de la philosophie qu'à des amis fidèles et à des proches, et ne pas mettre ces secrets par écrit, ni les révéler à n'importe qui. ». Le risque d'une condamnation par l'Église n'était pas la seule cause des hésitations de Copernic... Perfectionniste, il considérait que ses observations nécessitaient des vérifications incessantes. Il continuait à enseigner les principes de sa théorie et même devant le pape Clément VII (Jules de Médicis) qui approuve ses travaux et lui demande formellement de les publier. Fig.4. Explication

héliocentrique de la rétrogradation de Mars. (En fin d'article)

Lorsque le 1^{er} mai 1536 le Cardinal Nicolas Schönberg (1472-1537) offrit de faire copier à ses frais les oeuvres de Copernic, ce dernier ne lui communiqua rien et ne permit aucune copie... Seuls quelques amis fidèles et quelques proches (Giese, Waposki (secrétaire du roi de Pologne), Schönberg) eurent connaissance du lent cheminement, de la véritable méditation, suivis par l'esprit de Copernic. Ce lent cheminement finit par atteindre Rhéticus. C'est ainsi que la « Narratio prima », résumé des thèses coperniciennes fut publiée anonymement à Gdansk. Philipp Melanchton, principal guide de l'Allemagne luthérienne eut l'honneur de recevoir les premiers feuillets de la « Narratio » en cours d'édition. L'accueil fut plutôt bon et la sortie de l'opuscule d'une soixantaine de pages ne provoqua pas l'explosion redoutée par Copernic. En 1541, 2 années plus tard, la deuxième édition de « Narratio prima », signée par Rhéticus, vit le jour à Bâle.

Ainsi Copernic laissa-t-il imprimer son « De Revolutionibus » et entreprit les retouches finales à son manuscrit. Fin 1542 Copernic était gravement malade. Souffrant des effets d'une attaque de paralysie, puis d'une hémorragie cérébrale, il mourut le 24 mai 1543. La tradition veut qu'un exemplaire de l'édition de Nuremberg de « De Revolutionibus » lui soit parvenu alors qu'il était sur le point d'expirer.

Sens et limite d'une Révolution

En 1543, Copernic offre au monde savant un nouveau système cosmologique en **contradiction totale avec les apparences et le vécu immédiat**.

De Revolutionibus propose :

- Un outil mathématique rigoureusement identique à celui de Ptolémée,
- Une astronomie pratique ni plus ni moins efficace que celle de Ptolémée...mais dans cette astronomie pratique, opératoire, foisonnent les épicycles, les excentriques et les épicycles d'épicycles, autant et peut-être plus que dans Ptolémée. Certains résultats de Copernic sont moins précis que ceux de Ptolémée.

Deux verrous ont sauté avec Copernic :

- Le géocentrisme (mais quelle bombe à retardement !) est remplacé par l'héliocentrisme copernicien.
- L'équant de Ptolémée.

Conséquences de la théorie copernicienne :

« Copernic explicite le point de départ de sa « découverte » : il met en rapport les mouvements des autres planètes avec le mouvement circulaire de la Terre.

Dans le système de Ptolémée, le Soleil, Mercure et Vénus ont la même période de révolution (1 an) et leurs positions respectives sont choisies a priori.

Copernic fut le premier à prédire les positions de Vénus et de Mercure, à établir avec une précision remarquable l'ordre et les distances des planètes connues. Il comprit que Mercure et Vénus étaient les plus proches du Soleil et qu'elles tournent plus rapidement que prévu par Ptolémée. ». Dans le tome premier de la véritable « Somme » qu'il a écrite, P. N. Mayaud souligne l'exactitude remarquable des dimensions obtenues par Copernic, avec comme conséquence une réduction d'un facteur voisin de deux du rayon de l'ensemble des sphères planétaires. « On ne peut qu'admirer la maîtrise du « mathématicien » qui ne craint pas de maintenir ce résultat particulier à l'encontre d'une tradition séculaire ». (P. N. Mayaud Loc. cit. p. 201-205).

Ce qui est capital dans « De Révolutionibus » et P.N. Mayaud le souligne à juste titre, c'est que « leur (les planètes) ordre est déclaré absolument nécessaire : « Le Ciel est si bien agencé qu'on ne peut rien changer sans introduire une confusion dans l'univers entier, confusion que représentent les mouvements des planètes si on ne le rapporte pas au mouvement de la Terre autour du Soleil, ou bien, autre exemple, la grandeur aberrante des épicycles de Mars et de Vénus dans la théorie de Ptolémée (leur rayon serait environ du sept dixièmes de celui du déferent au lieu de 4/10 pour Mercure, 2/10 pour Jupiter, 1/10 pour Saturne ». Rappelons qu'à l'époque de Copernic, les trajectoires **réelles** des planètes autour du Soleil sont inconnues.

De plus Copernic distingue soigneusement deux périodes : Fig. 5 Oppositions et conjonctions (En fin d'article)

La période synodique **S**, temps qui s'écoule entre 2 configurations identiques, telles que vues de la Terre.

- par exemple d'une opposition à la suivante, ou d'une conjonction à la suivante. Conjonction : Mars, par exemple, derrière le Soleil, vue de la Terre ; opposition : Terre entre Mars et Soleil.

La période sidérale **P**, période orbitale réelle. Périodes synodiques et sidérales des planètes. Fig. 6. (En fin d'article)

$$1/P = 1/T \pm 1/S$$

T : période orbitale de la Terre

Nous donnons un seul tableau, celui des distances moyennes des planètes au Soleil, en unité astronomique.

Distances moyennes des planètes au Soleil (en u.a.)

1 u.a. = 1,496. 10⁸ km. Fig.7

Autres conquêtes coperniciennes :

Période et amplitude de variations de « l'obliquité de l'écliptique » (angle formé par la trajectoire annuelle apparente du Soleil avec l'équateur céleste, période et amplitude de la précession : sous l'influence de la Lune, l'axe de rotation diurne de la Terre trace dans le ciel un cercle. L'obliquité varie de 23°52' à 23°28' en 3434 années, et la précession, selon une période de 1717 années a une amplitude de variation de 1° 10' [Aujourd'hui l'axe de la Terre pointe à 1° de l'Etoile polaire]. A cette dernière variation se superpose la variation à longue période, d'environ 26000 ans, au taux de 50,2 secondes d'arc par an. P.N. Mayaud note que « Copernic est ici totalement indépendant des Tables Alphonsines rédigées après 1292, à l'initiative du roi de Castille Alphonse X » : celui-ci avait convoqué des astronomes à sa cour. Le travail fut dirigé par Isaac ben Saïd et un médecin, Jahenda ben Mose Cohen ; la période de précession d'une dérive d'ailleurs linéaire était évaluée à 49000 ans. La première traduction latine des Tables Alphonsines remonte à 1483.

Au niveau des insuffisances, P.N. Mayaud (Loc. cit p.211) relève « l'imperfection dramatique » du système de Copernic dans la comparaison avec Ptolémée des « théories des longitudes ». Dans un postulat du Commentariolus, Copernic s'exprime ainsi : « tous les orbites entourent le Soleil qui se trouve pour ainsi dire au milieu d'eux tous, et c'est pourquoi le centre du Monde est au voisinage du Soleil ». Mais ce centre du Monde va devoir lui-même être lentement mobile par rapport au Soleil.

La suppression de l'équant de Ptolémée, de ce point de vue, n'a pas été bénéfique. Une « composante géométrique » subsiste pour les planètes autres que la Terre et le système de Ptolémée n'est pas moins bon que celui de Copernic, en « théorie des longitudes ».

D'autres « objections » seront opposées par les anti-coperniciens :

- Le mouvement « simple » circulaire uniforme, unique, d'Aristote, s'oppose radicalement au triple mouvement diurne, annuel, « précessif » de Copernic.
- La rotation diurne entraînerait, selon Ptolémée, des effets catastrophiques : comment se fait-il que les corps terrestres accompagnent la Terre dans son mouvement de rotation ? On ne connaissait pas les effets réels, non catastrophiques, de la force inertielle de Coriolis.
- Les dimensions de l'Univers étant sous-estimées à l'époque, et Copernic y avait contribué en divisant par 2 la distance de Saturne, la parallaxe annuelle, image du mouvement annuel de la Terre, devait atteindre plusieurs degrés d'arc.

Planète	Distance moyenne (Copernic)	Valeur moderne
Mercure	0,38	0,39
Vénus	0,72	0,72
Terre	1,00	1,00
Mars	1,52	1,52
Jupiter	5,22	5,20
Saturne	9,07	9,54

Fig.7

Copernic rejette donc la sphère des fixes à très grandes distances : un vide immense entre Saturne et la sphère des fixes était contraire à la physique aristotélicienne de l'époque.

Notons, la parallaxe annuelle de Proxima du Centaure, 0,777 seconde d'arc pour un peu plus de 4 années lumière (1,30 parsec) : **la distance en parsec est l'inverse de la parallaxe annuelle.**

1pc = $3,09 \cdot 10^{13}$ km = 3,26 al.

Tout cela explique la difficile réception de la nouveauté copernicienne. **Cette réception fut très faible.**

La cosmologie n'est pas innocente : celle de Ptolémée s'appuie sur la physique d'Aristote. Copernic propose une nouvelle cosmologie héliocentrique sans faire oeuvre de physicien, et cette cosmologie est incompatible avec celle d'Aristote. Tycho Brahé (1546-1601), astronome des générations suivantes, fera gagner un facteur 10 à la précision des observations. Il refusera l'héliocentrisme copernicien et imaginera un système mixte entre celui de Ptolémée et celui de Copernic. En fait, l'héliocentrisme sera très peu « reçu » faute de preuves expérimentales « éclatantes » mettant hors jeu la cosmologie de Ptolémée.

Il faudra attendre Galilée (qui a vu les phases de Vénus et les 4 premiers satellites de Jupiter et aura donc des raisons de suivre l'astrologie copernicienne)... Galilée est le premier assaut (le 2^e assaut sera de Kepler) ouvrant le chemin qui conduira à la « victoire » de Newton.

En 1543, l'Acte de Naissance de la « Révolution Copernicienne » est scellé, « De Revolutionibus » est aussitôt attaqué par les théologiens protestants qui considéraient que l'idée d'un Univers héliocentrique contredisait la Bible. Les théories de Copernic, raisonnaient-ils, pourraient conduire le peuple à penser qu'ils ne sont qu'une simple partie de l'ordre naturel, et non les maîtres de la nature, le centre autour duquel tout est ordonné. Tels étaient les points de vue de Melanchton, Clavius (catholique), Tycho...

A cause de cette situation, et peut-être d'une incrédulité générale – problème de culture et pas seulement d'une lecture littérale de la Bible –

quant à un Univers **non** géocentrique, il n'y eut qu'une douzaine de scientifiques, entre 1543 et 1600, à embrasser la doctrine de Copernic (et plus tard le père Marin Mersenne).

En fait, avant Galilée et Newton le bouleversement du Monde opéré par la Théorie de Copernic repose essentiellement sur l'unité qu'elle introduit en Cosmologie ; fondée sur la relativité du mouvement, donnée essentielle, et moderne, elle séduit avant tout par l'explication donnée aux paradoxales stations et rétrogradations.

La forme précise des trajectoires des planètes restait à découvrir. Kepler relèvera ce défi.

● ● ● ● ● TROISIEME TABLEAU – PREMIERES CONDAMNATIONS :

Giordano BRUNO (Naples 1548 – Rome 1600)

Philosophe, dominicain, copernicien déclaré, Bruno critique la philosophie d'Aristote et particulièrement sa cosmologie, affirme que les étoiles étaient d'autres soleils, autour desquels tournaient d'autres planètes. Giordano Bruno va plus loin que Copernic : panthéiste, il affirme l'éternité et l'unité de la substance et paraît annoncer Spinoza. Il est partisan de la multiplicité des mondes intelligents.

Son ouvrage : « Expulsion de la bête triomphante » critique les croyances religieuses dans un style touffu.

Son procès, après une vie errante, intervient à son retour à Venise où il est livré à l'Inquisition par celui-là même (le patrium Mocenigo) qui l'y avait invité.

Le cardinal Bellarmin préside le long procès. Giordano Bruno est condamné à mort et brûlé vif à Rome en 1600.

• 24 février 1616, le pape Paul V condamne les idées coperniciennes comme contraires aux Ecritures (sans utiliser le mot « hérésie ») ; (en 1611, Paul V avait reçu Galilée et l'avait empêché de s'agenouiller en arrivant).

• 1633, quatre-vingt dix ans après la mort de Copernic, Galileo Galiléi est

emmené de force à Rome pour comparaître devant le Tribunal de l'Inquisition.

● ● ● ● ● QUATRIEME TABLEAU : REGARDS SUR TYCHO BRAHE ET JOHANNES KEPLER.

1- TYCHO BRAHE - Astronome danois, (Knudstrup 1546 – Prague 1601).

« *Stella nova* »

En 1572, **Tycho Brahé** détecte l'apparition d'une nouvelle étoile dans la constellation de Cassiopée, elle est plus brillante que Vénus, puis son éclat diminue. Après 18 mois, elle devient invisible.

Par la méthode de parallaxe, Tycho Brahé déduit qu'il s'agit d'une étoile lointaine **Stella Nova**. C'est la première « *Nova* » découverte, publiée en 1573.

En 1575, cette découverte attire l'attention du roi du Danemark qui décide de financer un magnifique observatoire baptisé « Uraniborg », (Château du ciel). Tycho Brahé observe les mouvements de la Lune, il est le premier à tenir compte de la réfraction de la lumière et dresse - à l'oeil nu - un catalogue de 777 étoiles. Astronome génial entre tous, Tycho Brahé, en 1557, avant l'invention de la lunette astronomique, tente de mesurer la parallaxe d'une comète brillante. Il s'aperçoit qu'elle est trop petite pour être mesurée. Puisqu'il pouvait mesurer celle de la Lune il fallait donc absolument que la comète soit beaucoup plus loin qu'elle ! « Il y avait donc dans le Ciel « des changements » loin de la Terre et non prévus par Aristote ».

[Utilisant toute l'instrumentation rassemblée à Uraniborg, Tycho Brahé essaye de tester l'idée de Copernic quant au mouvement de la Terre autour du Soleil. Il argumente que si la Terre était en mouvement, alors les étoiles proches verraient leurs positions décalées par rapport « à la sphère des fixes » lorsque nous orbitons autour du soleil.

Tycho Brahé échoue dans la découverte de la parallaxe correspondante. Il conclut que la Terre était au repos et le système de Copernic faux. En réalité, les étoiles, même proches, sont si éloignées qu'une observation à l'œil nu ne peut détecter le décalage des positions stellaires, décalage qui a été confirmé par les observations au télescope].

Mis en disgrâce après l'avènement de *Christeus IV* (1588), Tycho Brahé rejoint la Bohême et s'y installe avec son équipe, dont Kepler, à partir de 1601. Il se remet au travail, mesurant la position des planètes avec une précision de 1 minute d'arc ! et commence l'élaboration des « Tables rodolphus », ou tables Rodolphines (il est désormais le protégé de Rodolphe II à Prague). Ses observations sur le mouvement de la planète Mars, (10 oppositions), permettront à Kepler de réformer l'astronomie. Kepler sera le dépositaire des records incomparables établis par Tycho Brahé.

2 Johannès KEPLER - Astronome allemand, (Weil, Wurtemberg 1571 - Ratisbonne 1630)

Grâce à la « théorie visionnaire » de Copernic, aux observations accumulées par Tycho Brahé, Kepler se pose en précurseur de la physique moderne, tout en fondant sa démarche sur les « Polyèdres de Platon ». Fig. 8 - Les deux premières lois de Kepler (En fin d'article)

- Disciple puis successeur de Tycho Brahé, il utilise les données de Tycho sur Mars. Il arrive à la conclusion, (1^{ère} loi) que les trajectoires des planètes autour du Soleil sont elliptiques, le mouvement circulaire n'étant pas compatible avec les trajectoires observées au télescope.
- Le rayon vecteur reliant la Planète au Soleil balaie une aire proportionnelle au temps employé à la décrire, (2^{ème} loi).

En 1609, Kepler publie les deux premières lois puis la troisième, (proportionnalité entre carré de la période orbitale T^2 et cube a^3 du grand axe de l'« ellipse trajectoire » de la planète [1619]. Fig. 9

En fait Kepler ouvre la voie à Newton. En 1611, Kepler construit un télescope dioptrique.

Optique :

Kepler définit le rayon lumineux, explique la réflexion de la lumière et montre que la réfraction atmosphérique dévie les rayons de tous les astres.

En 1627, année des « Tabulae rodolphinae », Kepler présente l'« Ephémérides des planètes » fondé sur les 3 lois. Il prédit le passage, en 1631, de la planète Mercure entre la Terre et le Soleil, (observée par Gassendi). Les lois de Kepler confirment la pertinence de la théorie copernicienne.



CINQUIEME TABLEAU :

Galileo GALILEI dit Galilée (né à Pise en 1564, mort en résidence surveillée à Arcetri en 1642)

Galileo Galilei. Fig. 10 Musée d'Histoire des Sciences. Florence (en fin d'article)

Fils du musicien Vincenzo Galilei,

- Galilée est d'abord étudiant en médecine et en philosophie d'Aristote à Pise.

- En 1583, à 19 ans, en observant le balancement d'un lustre dans la cathédrale de Pise, Galilée remarque que la période de balancement du lustre est indépendante de son amplitude : c'est la découverte de « l'isochronisme des petites oscillations. » Fig. 11. Galilée est fasciné par le Campanile, appelé « Tour de Pise »
- En 1586, Galilée entreprend une première remise en cause de la philosophie d'Aristote.

Inspiré par le génie d'Archimède, il devient le premier grand expérimentateur de l'époque moderne avec « Expériences sur Terre ».

Invention de la balance hydrostatique pour mesurer la densité (densité d'objet pesé dans l'eau).

- En 1589, à 25 ans, Galilée devient Professeur à l'Université de Pise. Il y enseigne Ptolémée !

Mais sa profonde compréhension de l'astronomie - déjà- le conduit à une double rupture : Ptolémée et Aristote.

- En 1592 mort de son père. Il devient Professeur à l'université de Padoue, il y effectue des recherches fructueuses.

- En 1597, début d'une correspondance avec Kepler, auteur du « Mystère du Monde » puis des « trois Lois » dont la 1^{ère} sur l'ellipticité des orbites planétaires. Kepler comptait sur Galilée pour une défense du système héliocentrique... Mais Galilée porte tout son intérêt sur les théories mécaniques, et néglige la première loi de Kepler.

- 1600 : expériences sur la chute des corps : mesure du temps mis par une bille pour rouler jusqu'en bas d'un plan incliné.

- 1602 : la trajectoire d'un projectile est une parabole.

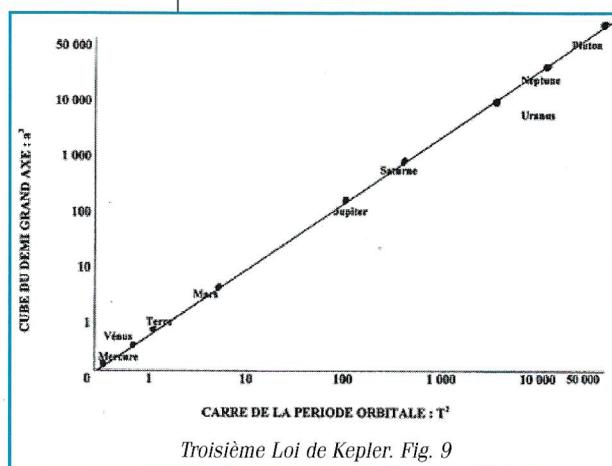
1604 : une « supernova » est observée dans le ciel de Padoue. Galilée se passionne - pour et contre - le système aristotélien des cieux fixes et immuables. La supernova (1054) a donné lieu à la « Nébuleuse du Crabe » NASA Fig.12. (en fin d'article)

Supernova 1987 A. NASA Fig. 13 (en fin d'article)

- 1609 : s'inspirant des travaux de l'opticien Hans Lippershey sur les lunettes, Galilée en construit une 30 fois plus puissante. Il n'est pas l'inventeur de la Lunette astronomique... Il la perfectionne... et la pointe vers le ciel.

- 1610 : le 16 mars, publication du « Siderus Nuncius », (le « Messenger céleste » ou « Messenger des Etoiles »...), 100 pages qui révolutionnent l'Astronomie. La Lune n'est plus un disque plat mais se révèle montagneuse et pleine de cratères.

(*) La Voie lactée est faite de myriades d'étoiles, de nombreuses nébuleuses et d'amas d'étoiles d'une profondeur vertigineuse dans la sphère céleste.



Nouveaux regards sur le Ciel : Du ciel de Galilée à l'Astronomie Gamma. Fig. 14 (en fin d'article)

« Siderus Nuncius » est suivi de près par l'observation des phases de Vénus, puis découverte des quatre premières lunes-satellites de Jupiter (Io, Callisto, Europa, Ganymède).

(*) Observation des taches solaires (publiées en 1613).

• Galilée « pris au piège »

L'observation des phases de Vénus est certainement l'événement dont le retentissement dans toute l'Europe fut énorme : elle manifeste - cette observation - de manière définitive, la non validité du système de Ptolémée pour lequel Mercure et Vénus tournaient autour de la Terre.

Les phases de Vénus établissent leur parfaite corrélation avec la distance angulaire de la planète par rapport au Soleil : Vénus orbite bien autour du Soleil. Les Phases de Vénus. Fig. 15 (en fin d'article)

[L'existence des quatre lunes de Jupiter apporte une preuve moins définitive Elle peut s'intégrer dans le « compromis géométrique » de Tycho Brahé ; la Terre centre pour la Lune et le Soleil, le Soleil centre pour les autres planètes.]

• 24 avril 1611 : Bellarmin a demandé aux professeurs du collège romain une consultation concernant l'ensemble de ces découvertes. Leur réponse est une confirmation du sérieux des découvertes de Galilée. Parmi les quatre signataires de la réponse du 24 avril 1611, le Jésuite et mathématicien allemand Clavius hésite à accepter la réalité des montagnes lunaires mises en évidence par Galilée. En 1612, avant de mourir, **Clavius** laisse entendre qu'il faut revoir « l'astronomie officielle (de l'Eglise) ».

Galilée - depuis son séjour à Rome en 1611, où Paul V l'avait reçu avec honneur, milite activement en faveur du système héliocentrique de Copernic. A une question posée par Galilée, le cardinal **Conti**, dans sa réponse du 4 juillet 1612, manifeste une inquiétude évidente par rapport à des objections scripturaires.

• Mai 1613, un fabuleux carnaval est organisé à Florence à l'occasion du baptême du fils de Cosme II Médicis, lui-même fils de Christine de

Lorraine, grande duchesse de Toscane : Galilée est à l'honneur. Le char de Jupiter parade, décoré des astres médicéens...

1613 marque aussi le coup d'envoi de la guerre contre Galilée.

- Le premier coup est dirigé contre l'un de ses élèves, **le père Castelli**, bénédictin et professeur de mathématiques à **Pise**.

- C'est seulement le 12 décembre 1613, c'est à dire après la publication des Lettres sur les taches solaires, où il prend catégoriquement position en faveur du système de Copernic, que le « conflit avec l'écriture » entre vraiment - en quelque sorte - dans l'histoire de Galilée :

Galilée est le disciple, plus que tous les théologiens de son époque, du grand Augustin dans les Confessions (Livre XXII^{ème} § 37) « De même qu'en son étroit bassin, une source est plus abondante et par les cours d'eau qu'elle alimente, arrose un plus large terrain qu'aucun de ces cours d'eau qui, sortis d'elle, baignent toute une série de régions ; pareillement le récit du dispensateur de votre parole où devraient puiser tant d'interprétations à venir, fait jaillir ces quelques mots bien simples un flot de transparente vérité, d'où chacun tire à sa guise la part de vrai qu'il peut pour la développer ensuite en **longues sinuosités verbales...** Leurs interprétations portent la même trace marquée de la même accoutumance aux conceptions charnelles... »

« Ainsi donc (XXX, 41) si l'on me demande quelle est, parmi ces interprétations, celle à laquelle songeait Moïse, j'oublierais le vrai langage de ces confessions si je ne vous avouais que je n'en sais rien ! » (Malgré sa simplicité, l'écriture se prête à d'innombrables commentaires : herméneutique biblique refusée par les adversaires de Galilée !

Dès mars 1613, Christine, mère de Cosme de Médicis reçoit à dîner un professeur de Pise qui interroge le père Castelli : les théories de Copernic sont-elles contraires à l'écriture ? Castelli, bénédictin et copernicien, n'esquive pas la discussion et calme les inquiétudes éveillées par ses adversaires chez Christine de Lorraine. Le lendemain, Castelli rapporte l'incident à Galilée. Celui-ci décide de ne pas laisser

Castelli seul dans cette affaire. Il lui envoie une lettre : la « célèbre lettre à Castelli », 21 décembre 1613.

« Certaines choses que vous avez dites et que m'a rapportées le seigneur Arrighetti ont été pour moi l'occasion de considérer à nouveau l'appel à l'écriture Sainte dans les disputes de la philosophie naturelle... [...] »

J'aurais seulement ajouté que si l'écriture ne peut errer, certains de ses interprètes et commentateurs le peuvent et de plusieurs façons dont l'une des plus communes et des plus graves serait de s'en tenir toujours au sens littéral. »

Sur le plan scientifique, Galilée a - presque - tout gagné jusque là ! « Mais ses ennemis ont réussi la première partie de leur plan. Ils l'ont attiré sur le plan religieux, scripturaire. Il leur reste à déclencher le scandale ». Le 21 décembre 1614, dans la chapelle du couvent Santa Maria Novella de Florence, un dominicain, Caccini, choisit pour thème de son sermon une phrase de la Bible : « Hommes de Galilée pourquoi regardez-vous le ciel ? ». A part ce jeu de mots, il s'agit d'une région de Palestine, le sermon est une violente attaque contre Copernic et Galileo Galilei.

Dès le lendemain, le supérieur dominicain de **Caccini** s'excuse auprès de Galilée, déplorant de se trouver responsable des « bestialités » de n'importe lequel de ses 40 000 moines. En même temps Caccini reçoit de son frère une lettre lui reprochant de s'être fait embrigader par Lodovico delle Colombe, professeur adversaire de Copernic et Galilée.

La fin de l'année 1614 est un tournant. Dans « Siderus Nuncius » et « Lettre sur les taches solaires », Galilée n'avait pas pris position publiquement vis-à-vis de l'écriture.

• Un adversaire, **Lorini**, recopie et trafique la lettre à Castelli.

• Caccini se présente aux inquisiteurs de Pise : il demande à témoigner pour « soulager sa conscience », sur « les erreurs de Galilée » : « les galiléistes considèrent Dieu - non pas comme une hypothèse - mais comme un accident !

Un autre la lettre truquée de Lorini en est la preuve. Poussés par Caccini et Lorini les inquisiteurs de Pise transmettent le dossier à l'Inquisition de Rome (20 mars 1615). Le premier procès Galilée est ainsi engagé... Mais il faut interroger tous les témoins cités par Caccini... A Florence, le 25 novembre 1615, sera prise la décision de mise en examen de la « Lettre sur les taches solaires ».

Événement est intervenu et qui va peser très lourd. Au début de 1615 paraît à Naples un petit opuscule du père **A. Foscarini**, provincial des Carmes. Cet opuscule est entièrement consacré à une tentative de conciliation du système de Copernic avec l'Écriture Sainte. Bellarmine reçoit ce livre en mars 1619. Copernicien convaincu, théologien de renom, Foscarini demande, en effet, son avis au Cardinal **Bellarmin**.

Bellarmin lui répond le 12 avril 1615 : « l'utilisation de la théorie de Copernic n'est pas mauvaise tant que l'on se borne à une description mathématique des phénomènes... Mais affirmer que le Soleil est vraiment au centre du système, c'est une attitude très dangereuse, et non seulement de nature à indigner philosophes et théologiens, mais aussi à faire du tort à notre Sainte foi en contredisant l'Écriture... ».

Cette lettre se termine par un argument qui atteste à quel point les adversaires parlent une langue différente « l'homme qui a écrit : « la Terre est éternellement au repos, le Soleil se lève et se couche... » c'est Salomon lui-même qui tenait toute sa sagesse de Dieu lui-même ; il est invraisemblable qu'il ait pu faire une déclaration contraire à la vérité prouvée... ou susceptible d'être prouvée ».

Bellarmin place ainsi Foscarini et indirectement Galilée, devant un choix très clair : ou bien ils présentent les dires de Copernic comme une hypothèse mathématique commode, sans plus, et l'Église ne leur fera aucun ennui ; ou bien ils insistent pour y voir une réalité du monde, et c'est l'Inquisition.

Pendant 1700 ans, les autorités religieuses ont ainsi interdit, au nom de la Bible et d'Aristote, de mélanger Ciel et Terre !

Galilée est catholique, et respecte l'Église et la religion. Il risque à la

fois de voir sa science interdite et la religion coupable d'injustices graves. Galilée décide de venir à Rome pour convaincre l'Église que Copernic et l'Écriture ne sont pas en contradiction.

Auparavant, approfondissant la lettre à Castelli, il prend le temps de rédiger soigneusement ses idées et de prouver la non-contradiction entre l'Écriture et l'astronomie nouvelle. C'est l'admirable lettre à Christine de Lorraine (1615) dont le pape Jean-Paul II dira et écrira (Discours à l'Académie pontificale des Sciences, 31 octobre 1992) « qu'elle est comme un petit traité d'herméneutique biblique », précisant même : « Paradoxalement, Galilée, croyant sincère s'est montré plus perspicace sur ce point que ses adversaires théologiens ».

Extrait de la lettre à Christine de Lorraine. « L'après Galilée ».
Loc.cit. p.45

« Galileo Galilei à Madame la Sérénissime Grande-Duchesse Mère[I..Ia] [309] J'ai découvert il y a peu d'années, comme le sait bien votre Altesse Sérénissime, de nombreuses particularités dans le ciel qui étaient invisibles jusqu'à notre époque. Soit en raison de leur nouveauté, soit en raison de plusieurs conséquences qui en découlent, ces découvertes en venant s'opposer à des propositions naturelles (naturelle) communément reçues dans les écoles des philosophes ont excité contre moi un grand nombre de leurs professeurs comme si j'avais placé de mes propres mains ces choses dans le ciel pour troubler la nature et les sciences. Oubliant d'une certaine manière que la multiplicité des vérités concourt à la recherche, au développement et à l'établissement des sciences et non pas à leur affaiblissement ou à leur destruction, et se montrant dans le même temps plus attachés à leurs propres opinions qu'aux vraies, ils se sont employés à nier et à essayer d'infirmer ces nouveautés dont les sens eux-mêmes auraient pu les rendre certains s'ils avaient voulu les regarder avec attention. A cette fin, ils ont produit diverses choses, et ont publié des écrits remplis de vains discours ; et, ce qui rend leur erreur plus grave, ils les ont parsemés de témoignages

des Écritures Sacrées, empruntés à des passages qu'ils n'ont pas bien compris et qui sont éloignés de l'objet de la discussion. Ils ne seraient pas tombés dans cette erreur s'ils avaient porté attention, à un témoignage (documento) très utile que nous donne [310] saint Augustin ; il concerne le fait de procéder avec précaution pour atteindre une décision définitive à propos des choses obscures et difficiles à comprendre par la voie du seul raisonnement (discorso) ; traitant de certaines conclusions naturelles touchant aux corps célestes, il écrit ceci : « Mais maintenant, gardant toujours la prudence d'une pieuse réserve, nous devons sur ce sujet obscur ne rien tenir pour vrai à la légère de peur que nous ne haïssions d'aventure, par amour de notre erreur, ce que la vérité pourrait nous découvrir plus tard bien que cela ne puisse en aucune manière être contraire aux livres saints soit de l'ancien testament soit du nouveau » (De Gen. Ad lit. , II, 18] »

Nous n'en sommes pas là en 1615. Pendant 2 mois, à Rome, Galilée, se bat nuit et jour... Il convainc sans peine ceux qu'il rencontre que l'astronomie nouvelle n'est pas incompatible avec les Saintes Écritures... Seulement il n'arrive pas à rencontrer les acteurs importants – dont Bellarmine, et ses amis, à leur tour, trouvent porte close.

En désespoir de cause, Galilée demande à Cosme de Médicis d'envoyer au cardinal **Orsini** une lettre personnelle lui sommant d'intervenir. Orsini obtient une entrevue avec le Pape, qui lui laisse entendre que Galilée ferait mieux d'abandonner.

1616. Galilée finit par obtenir une audience de Bellarmine le 26 février 1616. Galilée savait que le cardinal était persuadé de la fausseté des accusations de Caccini contre lui. Il arrivera donc à l'entrevue le cœur battant... Mais Bellarmine, Jésuite, est entouré des Dominicains les plus importants. La décision a été prise la veille : l'Inquisition a rendu un décret : « L'idée que la Terre tourne autour du Soleil est idiote, absurde, philosophiquement et formellement hérétique, car elle contredit explicitement la doctrine de la Sainte Écriture... ».

Galilée a perdu cette première « manche » du combat sans jamais avoir pu rencontrer ses adversaires. La décision de mise à l'index des oeuvres de Copernic est lue en chaire, communiquée aux inquisitions et nonciatures locales ; et les ouvrages correspondants saisis en toute hâte.

Une question juridique demeure, non totalement résolue aujourd'hui, malgré l'analyse serrée de Pierre-Noël Mayaud (loc. cit). Elle concerne le degré de liberté de recherche laissée à Galilée (ou l'absence d'une telle liberté) : Galiléo Galilei a-t-il reçu officiellement – et pas seulement **en privé** comme il l'affirmera au terrible procès de 1633 – l'interdiction, sous peine d'emprisonnement « d'enseigner ou défendre une doctrine et une opinion de ce genre : « le Soleil centre immobile du monde, et la Terre mue, même d'un mouvement diurne »... « interdiction également d'en traiter » ?

La prescription (« Precetto ») a-t-elle été notifiée devant notaire et témoin, comme l'exigeait le document n°20 du 25 février 1616. La question du « precetto » pèsera lourdement sur le futur procès de 1633. P.N. Mayaud, très sévère à l'égard de Galilée, estimant qu'à la date de 1616, les arguments de Galilée en faveur de la rotation de la Terre « ne sont pas contraignants » - ce qui était exact pour la « preuve par les marées » présentée dans le « *Discorso del flusso e reflusso del mare* » adressé au jeune cardinal Orsini – P.N. Mayaud donc conclut, après une analyse serrée, à l'authenticité du « precetto ».

Pour d'autres, s'appuyant sur l'absence de l'original du « precetto » (avec signatures) dans le volume 1181, document 20 des actes du Saint-Office, le precetto est un faux. Quoi qu'il en soit, le problème posé est crucial, et nous sommes redevables à Galilée d'avoir contribué, brillamment et tragiquement à la résoudre : la liberté de recherche scientifique – en particulier dans le domaine de l'astronomie, science fondamentale entre toutes – pouvait-elle être limitée, brisée ? Le cardinal Robert Bellarmine, qui estimait hautement Galilée, écrivait le 12 avril 1615, dans sa lettre au carme Foscarini : « *Si jamais l'orbitation terrestre venait à être démontrée*

comme certaine, alors les théologiens devraient revoir leurs interprétations des passages bibliques apparemment opposés aux nouvelles théories coperniciennes, de façon à ne pas traiter de fausses des opinions dont la vérité aurait été prouvée : « Je dis que, s'il était vraiment démontré que le Soleil est au centre du monde et la Terre au troisième ciel, il faudrait alors procéder avec beaucoup de circonspection dans l'explication des Ecritures qui paraissent contraires à cette assertion, et plutôt dire que nous ne les comprenons pas, que de dire que ce qui est démontré est faux ».

Il est vrai que le même cardinal **Bellarmin**, lors de l'audience au cours de laquelle il avait enjoint à Galilée de ne « tenir ou défendre », la théorie copernicienne, ajoutait qu'elle pouvait être discutée comme « pure supposition mathématique » (26 avril 1616).

- De 1616 à 1623, Galilée mène une vie studieuse dans sa maison de Bellosguardo près de Florence. L'année 1618 est marquée par l'apparition observée par Galilée, de trois comètes. Maffeo Barberini, futur pape sous le nom d'Urbain VIII, habite lui-même près de Florence à Barberino. Il encourage Galilée à écrire un nouvel ouvrage de réflexion sur « La méthode de la Science ». Robert Bellarmine, le Jésuite de l'Inquisition – à qui l'on doit également la révision de la Vulgate – meurt en 1621.

- 1623 : Galilée est l'objet d'un pamphlet de Orazio Grassi sur la nature des comètes. Galilée, se sentant plus libre maintenant que Barberini, son ami et protecteur est devenu pape, réplique par le « *Saggiatore* » : « L'Essayeur ». Dans cette brillante polémique sur la réalité physique et la nouvelle méthode scientifique, Galilée distingue entre propriétés de la matière dites primaires parce que **mesurables**, et les autres (par exemple l'odeur). Il y écrit sa célèbre proclamation : « *Le Livre de la Nature est écrit en caractères mathématiques* ». Le pape Urbain VIII reçoit la dédicace de l'ouvrage avec enthousiasme... Notons qu'à cette époque Galilée refuse le caractère supra-lunaire des comètes et ne suit donc pas Tycho Brahé.

- En 1624, Galilée vint de nouveau à Rome, espérant obtenir la révocation

du décret de 1616. Il se heurte à un refus, mais obtient **l'autorisation**, d'Urbain VIII, « d'écrire sur « les systèmes du monde » ptolémaïque et copernicien, à condition d'en maintenir l'équivalence. De plus « *l'homme ne peut prétendre connaître la réalité du monde « parce que Dieu pourrait avoir réalisé les mêmes effets à partir de voies inimaginables humainement* ». Enfin « *Galilée ne doit pas restreindre la toute puissance de Dieu* ». Ces instructions lui sont communiquées, par écrit, par le Censeur principal, Niccolo Riccardi. Galilée revient donc à Florence.

- Février 1632, après une longue gestation – neuf années – le « *Dialogo di Galileo Galilei sopra i Massimi Sistesma del Mondo Tolemaico, e Copernicco, proponimendo indeterminatemente le ragioni Filosofiche, e Naturali tanto per l'una, quanta per l'altra* » sort des presses à Florence. L'introduction de l'adverbe « indeterminatemente » répond à l'injonction du pape. L'ouvrage porte les « imprimatur » du Vicaire Général et de l'Inquisiteur Général de Florence : « imprimatur en italiques datés du 11 septembre 1630 ». L'imprimatur romain, d'abord ajouté en lettres droites et non daté, sera ensuite retiré...

Le « Dialogue sur les deux principaux systèmes du monde, ptolémaïque et copernicien » est un ouvrage magistral, écrit en langue vulgaire, donc accessible, dans un style alerte, souvent pittoresque et polémique : Sagredo, Simplicio et Salviatti, les trois personnages de Galilée, sont les avocats respectifs de Ptolémée, Aristote et Copernic. Dès sa parution l'ouvrage suscite un tumulte d'applaudissements et de cris de louange dans toute l'Europe continentale. L'ouvrage est considéré comme un chef d'oeuvre littéraire et philosophique.

Rappelons que dans les premiers mois de 1632, Urbain VIII se trouve dans une situation politique difficile : il est accusé de trahir la cause des catholiques en Europe (la guerre de Trente Ans est alors à son apogée). Quant au « Dialogue » lui-même, les Jésuites donnent à croire au pape que l'ouvrage « *enseigne une science plus dangereuse que « Luther et Calvin réunis* ». De plus, Galilée, par la voix de Salviatti, défenseur de Copernic, attaque durement la cosmologie d'Aristote. N'oublions pas que la découverte des phases de

Vénus par Galilée s'opposait directement à la théorie de Ptolémée, et l'annulait en quelque sorte. Enfin Barberini – Urbain VIII - pense que Simplicio, l'aristotélécien, le caricature lui-même. Le pape est donc en colère. Mais l'ouvrage est couvert par l'imprimatur complet des autorités ecclésiastiques de Florence, et Urbain VIII veut continuer à protéger Galilée. La seule solution logique et légale était donc l'interdiction. Urbain VIII ne convoque donc pas le Tribunal de l'Inquisition, mais une congrégation particulière présidée par son neveu, le cardinal Fr. Barberini ; nous sommes le 5 septembre 1632.

« La situation se renverse du 11 au 18 septembre ». Trois faits interviennent : Le « Dialogue » est reconnu comme totalement copernicien, Nicolo Riccardi a appris que « depuis douze ans », Galilée tient cette opinion et la répand dans tout Florence. « Pire, le célèbre « precetto » est redécouvert : au regard de ses adversaires, Galilée a désobéi. Compte tenu des normes en vigueur au Saint-Office, la suite est inévitable : le jeudi 23 septembre, l'Inquisiteur de Florence reçoit l'ordre de signifier « à ce même Galilée » de comparaître à Rome devant le Commissaire Général du Saint-Office. Galilée, malade, refuse le voyage. Le pape insiste, menaçant de le faire venir enchaîné. Galilée arrive donc à Rome en février 1633. Il est « suspecté d'hérésie ».

En attendant le procès, Galilée est traité avec respect : il logera dans l'appartement de l'ambassadeur de Toscane, et pendant le procès, dans celui du Procureur fiscal du Saint-Office.

Le Consultant Général de l'Inquisition demandait une simple réprimande. La décision du Saint-Office tombe le jeudi 16 juin 1633, en présence du pape. Le **precetto**, dont le poids a été déterminant, n'est pas mentionné dans l'énoncé du jugement, lequel reprend les arguments de 1616 : Galilée « a tenu et cru une doctrine fautive et contraire aux Ecritures Sacrées et Divines » etc... **Il est condamné à « se rétracter » et « sera emprisonné à vie ! ».**

Le mercredi 22 juin 1633, le « coupable » est contraint d'abjurer à genoux (et en latin) : « *Moi, Galileo Galilei, fils de feu Vincenzo Galilei de Florence, âgé de 70 ans, jugé person-*

nellement par ce tribunal, et agenouillé devant Vous, les très éminents et révérents Seigneurs Cardinaux, Inquisiteurs généraux de la République chrétienne contre la dépravation hérétique, ayant sous les yeux les Saints Evangiles et posant sur eux mes propres mains, je jure que j'ai toujours cru, que je crois en ce moment et croirai dans l'avenir avec l'aide de Dieu, à tout ce que la Sainte Eglise catholique et apostolique soutient, prêche et enseigne. »

[Galilée est forcé de reconnaître ensuite l'existence du precetto, dont il a contesté toute connaissance officielle pendant le procès].

...« J'ai donc été reconnu gravement suspect d'hérésie pour avoir soutenu et cru que le Soleil était le centre de l'univers, qu'il était immobile, et que la Terre n'était pas le centre du même univers, et qu'elle tournait ». Galilée conclut ainsi : « Moi, susnommé Galileo Galilei, ai abjuré, juré, promis, et me suis engagé comme il est mentionné ci-dessus ; et en témoignage de bonne foi, de ma propre main, ai souscrit la présente déclaration de mon abjuration, que j'ai récitée mot par mot. A Rome, au couvent de Minerve, ce 22 juin 1633. Moi Galileo Galilei, ai abjuré comme il est mentionné ci-dessus, de ma propre main ».

Remis debout, Galilée aurait chuchoté « *Epur si muove* » (« Et pourtant elle tourne »). Légende sans doute, mais qui exprime la vraie personnalité de Galilée (un portrait de Galilée, daté de 1640, porte bien cette inscription).

Dès le lendemain, la sentence de condamnation à vie est commuée par les cardinaux en résidence surveillée perpétuelle. Le Pape ordonne que Galilée retourne d'abord à l'ambassade de Toscane puis il l'autorise à se rendre chez l'archevêque de Sienne, ami « très cher et très ancien ».

En fait Galilée s'est donné à lui-même tous les arguments pour se faire critiquer ! « *Même s'il fut en réalité livré à des adversaires implacables, il a tout fait pour qu'il en soit ainsi : « Il proclamait que lui seul avait un oeil de lynx et atteste que par lui seul s'est montrée à tout le genre humain la vérité, que Clavius s'est trompé par ignorance, sur la Lune et ses*

montagnes, que Tycho perd la tête, que Kepler juge puérilement ses affaires. » (N. Cabéi, Jésuite Rome 1645).

Mais surtout deux arguments de poids devaient être, tôt ou tard, lancés à l'encontre du « Dialogue ». (A des époques différentes, deux hommes ont pourtant tout essayé, à leur manière pour protéger Galilée : le pape Urbain VIII et même Bellarmin).

- Pour Bellarmin, « *il eut mieux valu concéder l'insuffisance de la preuve apportée à la rotation de la Terre sur elle-même par les marées* ».

- En 1633, plusieurs consultants du Saint-Office **ont été capables de prouver la vanité de la théorie galiléenne des marées**, or cette théorie est présentée comme preuve irréfutable du mouvement annuel et diurne de la Terre. En réalité elle ne contribue pas à fonder la valeur de l'ouvrage : Galilée nie l'influence de la Lune sur les marées et critique même Kepler à ce sujet (dans la quatrième journée du Dialogue). Dans *Astronomia Nova*, Kepler évoque déjà, dès l'introduction, une physique de la gravité.

- Galilée, dans cet ouvrage majeur ne traite pas que des mouvements de la Terre : chute des corps dans l'air, dans l'eau, sur des plans inclinés, intervalles musicaux sont testés avec une admirable précision. A la suite de tout un ensemble de circonstances – dont ses propres travaux expérimentaux – **Galilée néglige les lois de Kepler découvertes de 1609 à 1619**. Par ses observations astronomiques il a repoussé les limites de l'univers observable. En deux années après la découverte des quatre satellites de Jupiter, il a établi des tables relativement précises des révolutions de ces planètes médicéennes et proposé leurs fréquentes éclipses comme moyen de détermination de longitudes sur Terre et sur Mer.

Il aurait pu s'appuyer, pour son argumentation relative aux mouvements de la Terre, sur la précision de ses observations des taches solaires, de leurs mouvements apparents et les conclusions qu'on peut en tirer par rapport aux rotations du Soleil et de la Terre : preuve moins directe sans doute que celle des phases de Vénus : la corrélation entre ces phases et les distances angulaires de la planète au Soleil montre que Vénus tourne bien autour du Soleil.

Galilée ignore la première loi de Kepler : il estime que les orbites planétaires doivent être circulaires (et non elliptiques, comme Kepler vient de le découvrir) « afin de maintenir l'harmonie de la structure du cosmos » d'une part, et d'autre part pour maintenir toute la force du principe d'inertie qu'il vient de découvrir : Galilée, qui a combattu l'astronomie d'Aristote fondatrice du système ptolémaïque, conserve son privilège de la circularité des orbites, « condition du mouvement parfait ».

Le rayonnement de Galilée, à Sienne, provoque une dénonciation anonyme qui arrive à Rome. Ce sera donc, à partir de décembre 1633, le retour à Arcetri près de Florence, pour une « résidence surveillée », jusqu'à la mort en 1642.

Bien que confiné, Galilée maintient une prodigieuse activité intellectuelle, jusqu'à la fin. En 1634, il achève le « **Discorsi e dimonstrazioni mathematiche intorno a due nuove scienze attenenti alla meccanica** » (« Dialogue concernant deux nouvelles sciences »). Cette œuvre fondamentale, sans doute la plus accomplie, avait été commencée à Sienne. Elle sera publiée à Leiden (Editions Elsevier) en 1638. Sans aucune réaction de Rome. D'après certaines sources, le manuscrit a transité par Paris. Galilée y récapitule ses premières expériences « terrestres » et ses méditations profondes sur les principes de la mécanique. Les deux nouvelles sciences évoquées par le titre sont : la résistance des matériaux et la cinématique. **L'exposé sur les mouvements accélérés des corps en chute libre, est souvent considéré comme la « Pierre Angulaire de la Physique Moderne ».**

Dans la première partie, Galilée démontre la loi du mouvement rectiligne uniformément accéléré :

$$x = 1/2 at^2 + v_0t + x_0.$$

Dans la seconde partie il analyse le difficile problème de la trajectoire d'un projectile. Cette trajectoire est déterminée par la composition de deux mouvements :

- le premier, vertical, est provoqué par la gravité
- le second, horizontal, est commandé par l'inertie.

La courbe résultante correspond à ce que les Grecs désignaient, dans

l'Antiquité, sous le nom de parabole. L'ultime découverte de Galilée au télescope concerne les « libérations », balancements périodiques diurnes et mensuels de la Lune – qui nous permettent d'observer 59 % de la surface de notre satellite. Cette observation, réalisée en 1637, précédait de quelques mois la cécité totale de Galilée. « *Mais la flamme de son génie* » ne s'éteignit pas pour autant : correspondance scientifique, prévision d'application du pendule à la régulation des horloges, mise en oeuvre par le physicien **Christian Huygens** en 1656. De plus, il poursuivit la formation de ses disciples **Vincenzo Viviani** et **Evangelista Torricelli**, leur dictant ses idées sur la théorie des chocs.

Galilée mourut le 8 janvier 1642, année de la naissance d'Isaac Newton.

Les extraordinaires progrès dont nous sommes redevables à Galilée sont dus à l'application de l'analyse mathématique dans les problèmes de physique. Galilée fut le premier à unir mathématiques et physique de manière à associer leurs forces, leurs potentiels. Il est ainsi devenu capable d'unifier phénomènes célestes et terrestres en une seule vue d'ensemble. Galilée a créé le concept moderne de l'expérience, qu'il appelait épreuve (plan incliné, parabole). Il anticipe sur Newton. En mécanique, « *il a balisé le chemin et pavé la route pour Isaac Newton* ». Admirable expérimentateur, dans son « Discours sur les choses qui flottent » (1612), Galilée utilisait le principe des vitesses virtuelles pour démontrer les théorèmes les plus élémentaires d'hydrostatique, déduire l'équilibre d'un fluide dans un siphon et travailler sur les conditions de maintien à la surface de corps submersibles. En 1607, il construit une forme élémentaire de thermomètre à air. En 1610, il découvre le moyen d'adapter son télescope pour observer des objets très petits. Il ne fit la connaissance avec le microscope qu'en 1624 et aussitôt, lorsqu'il en vit un à Rome, avec une ingéniosité caractéristique, il lui apporta plusieurs perfectionnements. Expérimentateur et théoricien génial, Galilée n'est-il pas un peu, le précurseur du grand Enrico Fermi. A Florence, en l'église de la « Santa Croce », le cénotaphe monumental de

Galilée est voisin du médaillon de Fermi ! Fig.16 (en fin d'article)

Nous ne pouvons que regretter, avec Serguei S. Averintsev de l'Université Lominesov, Moscou, « que ce qui était, en fait « un conflit entre culture comme trésor et culture comme dynamique » soit devenu un problème, à la suite d'une confusion, tant pour le Magistère de l'Eglise que la conscience des croyants ; cette confusion fut créée par l'alliance entre le christianisme et Aristote. La réflexion philosophique de ce dernier est devenue partie intégrante du Magistère ». (in « Après Galilée » Loc.cit. p. 111). Le Magistère lui-même n'avait-il pas oublié Thomas d'Aquin ?!

Sans avoir « *l'ardeur à expérimenter* » de son maître **Albert le Grand** – celui qui avait, par expérience, mis à bas les prétentions des alchimistes – **Thomas d'Aquin** tenait très fort à l'exactitude des renseignements scientifiques. « *Il les recherche et les recueille avidement partout : chez les Grecs, chez les Arabes, chez les commentateurs anciens et récents : Alexandre, Themistius, Philopon, Simplicius (auteur d'une remarquable interprétation du « de Caelo » d'Aristote), Averroès etc...Il a tout lu : ce spéculatif intrépide est aussi un laborieux érudit. Ce n'est pas à la Renaissance que s'est éveillée l'estime de la savante antiquité : elle anime tout le Moyen-Âge (Latin et Arabe) et Saint Thomas en particulier* ». (D'après Joseph de Tonquédec in « Questions de Cosmologie et de Physique chez Aristote et Saint Thomas » Ed. J. Vrin. 1950. p. 71).

Mais là où Thomas d'Aquin, apôtre exigeant de la mise en oeuvre de toutes les capacités de connaissance, et disciple d'Aristote, s'en est montré plus digne par son génie et son esprit de liberté, **le faisant naître de nouveau, mais avec une autre vie, vraiment transformé**, les adversaires de Copernic et Galilée ont omis de « lire Thomas d'Aquin comme il désirait être lu », et là se trouve précisément l'une des carences du Magistère dans la mise en oeuvre de l'Inquisition : **or Saint Thomas n'a pas cru que la Révolution chrétienne de l'amour rabaisait une si haute idée de l'intelligence pour faire désormais primer « l'élan aveugle » sur la lumière.**

Nous nous appuyons ici sur la très longue et très forte introduction de la

Somme Théologique par Marie-Joseph Nicolas O.P. Thomas avait le sens du progrès de la pensée à travers les siècles. Un progrès beaucoup moins dû à des changements matériels et techniques (auxquels Thomas ne songeait pas) « *qu'à la force propre, d'ailleurs toujours libre et faillible, de la pensée humaine se développant dans le temps* » (H.J. Nicolas. Loc.cit).

Deux textes de Thomas illustrent et renforcent ces propos : le premier dans la Somme Théologique (II.C2 97.a.1) : « *Il est naturel à l'esprit humain d'arriver par degrés de l'imparfait au parfait. C'est pourquoi nous voyons dans les sciences spéculatives que ceux qui ont philosophé les premiers ont laissé des résultats imparfaits, qui ont ensuite été rendus plus parfaits par leurs successeurs* », le deuxième est extrait d'un ouvrage moins connu de Thomas d'Aquin : la « *Tabula Libri Ethicorum* » imprimé à Paris en 1271-1272, au moment où St. Thomas s'apprête à rédiger son commentaire de « *l'Ethique à Nicomaque* » d'Aristote. Tombée dans l'oubli depuis la fin du XV^{ème} siècle, la « *Tabula* » a été éditée pour la première fois par l'Édition Lémire en 1971. Dans cette œuvre inachevée, Thomas entend faire œuvre de sagesse, mais son texte est un mélange d'exigence et de négligence, de clarté dans la pensée et de **liberté dans la forme**. On y retrouve toute la physionomie intellectuelle de Thomas, jusque, nous dit Jean-Pierre Torrell, O.P., ces mille détails que le faussaire ne pourrait pas copier (Torrell, *Initiation à Saint Thomas d'Aquin – sa personne et son œuvre* – Ed. Cerf/Fribourg. 1993. p. 336). Ainsi prend tout son poids l'affirmation de Thomas « *Le temps est d'une certaine manière l'inventeur (c'est-à-dire le découvreur) de la vérité et le bon collaborateur (de la pensée humaine)* » (I. Ethicorum, leçon 11). Thomas très moderne ici conçoit l'effort théologique dans la lumière d'amour d'une foi qui progresse vers l'intelligence. Avant et plus que les membres du tribunal de l'Inquisition, Galilée avait compris et vécu cette exigence. Dans cette crise de l'héliocentrisme, Thomas d'Aquin nous apparaît encore plus aujourd'hui comme disciple d'Augustin d'Hippone. Et nous ne pouvons résister à la joie de rappeler un dernier

texte du « *pédagogue de Dieu* ». Il s'agit d'un extrait de « *la Genèse au sens littéral* » : Augustin déplore l'assurance stupide – ou la stupidité assurée – des ces chrétiens qui s'appuient sur ce qu'ils s'imaginent savoir des Écritures pour contredire aux vérités, pourtant fondées sur la raison et l'expérience, énoncées par les savants (même imparfaitement dans le cas du *Dialogo de Galilée*), savants chrétiens ou non. Nous sommes en 414-415 : « *Les regardant extravaguer, l'incroyant se retiendra de pouffer. Le plus contrariant n'est pas tant qu'on ait envie de rire de gens qui sortent des âneries. C'est plutôt qu'aux yeux de ceux qui ne partagent pas notre foi, nos auteurs sacrés vont passer pour avoir soutenu des opinions de ce genre, et on les tiendra pour ignares* » (La *Genèse au sens littéral*. I. 10.39). (Traduction de Lucien Jerphagnon dans « *Augustin et sa Sagesse* ». Desclée de Brouwer. 2006 – p. 86). On ne peut pas ne pas penser avec Jerphagnon, aux infailibles autoproclamés qui ont condamné Galilée ou à ceux qui un peu plus tard jetèrent l'anathème contre Lamark et Darwin. Vraiment Augustin lui aussi demeure actuel, et d'une sévérité qui dépasse les mises au point de Jean-Paul II.

● ● ● ● ●

SIXIEME TABLEAU – L'ÉGLISE ET LA SCIENCE OU « LES LEÇONS DE L'HISTOIRE »

L'Histoire ne manquera pas, longtemps encore, de porter des jugements plus ou moins sévères sur les condamnations de 1616 et 1633.

L'Église catholique reconnaît aujourd'hui clairement qu'elle a commis une imprudence et une faute, au nom d'une pseudo-fidélité à l'Écriture où elle a paru ignorer de façon étonnante les mises en garde d'Origène – réhabilité tout récemment il est vrai – et surtout de Saint Augustin. Trop dépendante également d'Aristote, elle a porté un jugement sur une proposition naturelle, objet de Science – même si elle ne paraissait pas encore prouvée au regard des arguments apportés par Galilée et Copernic, et si elle n'était retenue que par un petit nombre d'astronomes. Nous devons à Jean-Paul II une

réhabilitation solennelle de Galilée, en même temps qu'un appel « *aux uns et aux autres* » sur la nécessité d'une « *conscience avertie du champ et des limites de ses propres compétences* » (Académie pontificale des Sciences. 31 octobre 1992 in « *Après Galilée Science et foi : nouveau dialogue* » par le cardinal Paul Poupard. Desclée de Brouwer. 1991. p 101). Le même Jean-Paul II résume ainsi le bilan du procès de Galilée : « *Le problème que se posent les théologiens de l'époque est celui de la compatibilité de l'héliocentrisme et de l'Écriture* ».

« *Ainsi la science nouvelle, avec ses méthodes et la liberté de recherche qu'elles supposent, obligeait les théologiens à s'interroger sur leurs propres critères d'interprétation de l'Écriture. La plupart n'ont pas su le faire. Paradoxalement, Galilée, croyant sincère, s'est montré plus perspicace sur ce point que ses adversaires théologiens* ». (Loc. cit. p 102). Evoquons brièvement quelques points-clés historiques de l'après Galilée, liés au progrès de l'astronomie et de la mécanique :

- 1655 : Huygens découvre les « *Anneaux de Saturne* » et donne un peu plus tard une définition physique exacte de la force centrifuge.
- 1666 : un autre précurseur immédiat de Newton, G. A. Borelli, garde encore de Kepler l'idée d'un mouvement des planètes dû à la rotation du corps central : Soleil, Jupiter.
- 1666 également : Newton comprend que la force de gravité responsable de la chute d'une pomme est de même nature que celle qui provoque la rotation de la Lune autour de la Terre.
- 1667 : l'astronome français **Adrien Auzout** perfectionne le micromètre à fils mobiles qui sert à mesurer les diamètres apparents des astres. Le procédé améliore considérablement les performances des lunettes astronomiques.
- 1671 – 1672 : **Jean-Dominique Cassini** découvre deux nouveaux satellites de Saturne. Ils obéissent à la troisième loi de Kepler (relation période orbitale/grand axe de l'ellipse - trajectoire).
- 1675 : Römer effectue la première évaluation de la vitesse finie de la lumière grâce à l'interprétation qu'il fit du retard ou de l'avance des éclipses des satellites de Jupiter selon que celui-ci est en conjonction ou en opposition.

- 1687 : « Philosophica Naturalis Principia Mathematica » de Newton, publiés à Londres, (« Les principes mathématiques de la philosophie naturelle »), structurent la Mécanique en trois lois fondamentales : après l'assaut de Galilée, victoire de Newton, qui déduit des lois de Kepler l'expression de la force d'interaction gravitationnelle en « $F = G * Mm / r^2$ ».

G se révélera être une constante universelle. La victoire de Newton est aussi celle de l'héliocentrisme.

- 1718 : **Edmund Halley** montre que certaines étoiles se sont déplacées depuis Ptolémée.

- 1728 : **James Bradley**, astronome britannique, découvre « l'aberration astronomique » due à la composition du mouvement de la Terre autour du Soleil et de celui de la lumière émise par une étoile. La plus grande valeur possible due au mouvement orbital de la Terre, caractérisé par « v/c » est de 21 secondes d'arc. (Constante d'aberration). L'aberration maximale due au mouvement de rotation diurne est beaucoup plus petite : 0,3 seconde d'arc.

- 1748 : Bradley est au courant de la mesure de l'aplatissement du sphéroïde terrestre (dû à l'action gravitationnelle de la Lune). Cette mesure fut effectuée en Laponie et au Pérou de 1735 à 1744 (Le diamètre équatorial dépasse de 43 kilomètres le diamètre polaire).

La Terre vue du Cosmos (NASA).
Fig. 17 (en fin d'article)

Bradley effectue la première mesure précise de précession-rotation de l'axe de la Terre qui en résulte et de nutation due à l'inclinaison de l'orbite de la Lune par rapport à l'écliptique. Il en résulte une légère perturbation sur la direction de rotation de l'axe de la Terre. Dans le repère géocentrique l'axe de rotation de la Terre fait un angle de $23^{\circ}27'$ avec le plan de l'écliptique et décrit autour de la normale à ce plan un cône en 25770 ans. La nutation entraîne une ondulation de quelques secondes d'arc. La partie prépondérante due à la Lune a une période de 18,66 ans.

- 1758 : A partir des lois de Newton ? Halley prédit que la comète déjà observée en 1607 et 1682 devrait passer en 1758 : observée initialement le soir de Noël 1757 – anniversaire de la naissance de Newton – elle passe au périhélie en



Influence de la précession et de la nutation sur la direction de l'axe de rotation de la Terre. Fig. 18

mars 1759 et fut baptisée « Comète de Halley »

Comète de Halley. NASA Fig. 19 (en fin d'article)

- 1757 : Dès cette année – 29 ans après la preuve formelle optique apportée par Bradley, le pape Benoît XIV – qui promeut l'enseignement des sciences historiques et naturelles dans un sens libéral et entretient une vaste correspondance avec le monde savant – révoque le jugement de 1633 et fit réviser l'Index en faveur de Copernic et Galilée. Benoît XIV fit donner par le Saint-Office l'**imprimatur** à la première édition des œuvres complètes de Galilée [Par négligence, ou incompetence du Secrétaire de l'Index **Ricchini**, la note parle de retrait seulement partiel (de l'Index)].

Malgré ce décret, des réticences demeurèrent quant à la vision copernicenne. En 1820, la publication des « Eléments d'optique et d'astronomie » de Gettele, professeur à la Sapienza de Rome, se heurta au refus d'imprimatur du « maître du **Sacré Palais** ». Pie VII donna une sentence favorable en 1822, sentence confirmée par Grégoire VI en 1833. La controverse prend fin avec la publication en **1846** du nouvel Index où il n'est plus question ni de Copernic, ni de Galilée : (P.N. Mayaud Loc. cit. p 299 et cardinal Paul Poupard Loc cit. p.95-96).

Entre temps, en 1836, le théorème de la force de Coriolis sur la composition des accélérations conduit à montrer que les courants atmosphériques et océaniques sont la trace de la rotation diurne de la Terre. Le théorème de Coriolis donnait tout son poids, plus de 200 ans plus tard, à l'esquisse de preuve de rotation de la Terre donnée par Galilée à partir de l'existence des vents alizés !

- 1851 : Léon Foucault constitue un pendule simple en suspendant à la

voûte du Panthéon (latitude $\lambda = 48$ degrés 51 minutes d'arc) une masse de 28 kg accrochée au bout d'un fil de 67 m de long. Il repère le point extrême des oscillations par les encoches faites à chaque période par le pendule sur un tas de sable. Il constate que ce point tourne dans le sens horaire de 3,10 minutes d'arc par période, ce qui correspond à un tour complet en $T = 31$ heures 47 minutes. La mécanique classique confirme ce résultat et prévoit en un lieu de latitude λ , une période $T = T_0 / \sin \lambda$. $T_0 = 23$ h 56mn 4s étant la durée du jour sidéral. Ce phénomène traduit, en terme scientifique, le caractère non galiléen – lié à la rotation diurne - du référentiel terrestre. Il s'analyse simplement au pôle ($\lambda = 90^{\circ}$) : la Terre fait en T_0 un tour complet dans le sens d'Ouest en Est « sous le pendule » dont les oscillations sont fixes par rapport au repère galiléen lié aux étoiles.

A la fin du XIX^{ème} siècle, l'Eglise et la Science paraissent triomphantes, et comme munies d'une « double infaillibilité » : « l'infaillibilité pontificale » est promulguée en 1870, tandis qu'en 1890, Marcellin Berthelot proclame « *La science donne l'explication de tout* », phrase qui se répercute jusqu'au Carmel de Lisieux, où Thérèse écrit à sa soeur aînée, trois semaines avant de mourir en 1897, « *La science donnera bientôt l'explication de tout* ».

Plus modeste que Berthelot, Lord Kelvin, le grand thermodynamicien écrit « *L'essentiel est connu. Tout ce qui reste à découvrir, ce sont des détails* »

Les détails vont s'appeler : Rayons X, Radioactivité, Physique Nucléaire, Relativité restreinte et générale, Mécanique quantique, etc... Aucun savant n'osera plus dire « *la Science est achevée* » ou « *la Science donne l'explication de tout* »...

Niels Bohr, l'un des fondateurs de la théorie quantique, regrettait qu'on demande à la Science d'être un savoir complet.

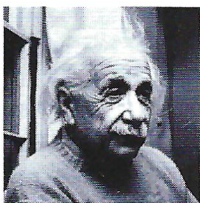
Ce que nous connaissons de l'Univers représente à peine 5% de sa masse totale faite de matière noire et d'énergie sombre : redoutables défis pour les astrophysiciens et théoriciens du XXI^{ème} siècle.

Principe d'incertitude, fondamental, d'Heisenberg, Théorème d'incomplétude de Gödel...sont là comme des « vigies », « clés d'humilité »... Toute

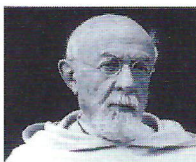
découverte scientifique nouvelle suscite des interrogations encore plus vastes et plus profondes.

Et l'Eglise dans tout cela ? Des éclairs de génie de l'Eglise catholique percent le ciel des époques plus ou moins récentes, Rerum Novarum de Léon XIII, l'appel à la paix de Benoît XV en pleine Guerre Mondiale (1916-1917)... Des nuits sombres également, décret du Saint-Office et encyclique Pacendi de Pie X contre les « déviations du modernisme ». L'évolution de Darwin est visée et il faudra beaucoup de temps (Jean-Paul II) pour que l'évolution soit reconnue non plus comme hypothèse dangereuse, mais comme véritable théorie scientifique. Teilhard de Chardin paiera son adhésion à cette théorie, notamment, de 30 ans d'exil. Fort heureusement Pie XI crée l'Académie Pontificale des Sciences totalement ouverte à des savants de toutes origines ; l'Observatoire de Castel Gandolfo le passionne plus que les ors du Vatican. Il écrit « Quadragesimo Anno » et deux encycliques contre le communisme et le nazisme.

Arrive le concile Vatican II, « le bol d'air » de la déclaration de la Liberté religieuse, forme essentielle de la Liberté humaine, le développement de l'œcuménisme, la lettre à **Jean-Paul II** des quarante théologiens demandant le droit à la liberté de recherche (parmi eux **Joseph Ratzinger** et son turbulent ami Hans Küng).



Deux pionniers :
Albert Einstein et
Marie-Joseph
Lagrange. Fig. 20.



Conclusion : Les drames de Copernic et surtout de Galilée nous livrent un enseignement qui reste d'actualité « Au temps de Galilée, il était inconcevable de se représenter un monde qui fût dépourvu d'un point de référence physique absolu. Et comme le cosmos alors connu était pour ainsi dire contenu dans le seul système solaire, on ne pouvait situer ce point de référence que sur la Terre ou sur le Soleil. Aujourd'hui, après Einstein et dans la perspective de la cosmologie contemporaine, aucun de ces deux points de référence n'a plus l'importance qu'ils présentaient alors »...

[Déjà la mécanique newtonienne fixait comme point de référence du système solaire, non point le Soleil, mais le centre de gravité du système « Soleil + Planètes avec leurs satellites »]... « Cette remarque ne vise pas, cela va de soi, la validité de la position de Galilée dans le débat, elle entend indiquer que souvent, au-delà de deux visions particulières et contrastées, il existe une vision plus large qui les inclut et les dépasse l'une et l'autre... *« Les diverses disciplines du savoir appellent une diversité de méthode »*...

Jean-Paul II conclut en rappelant le double mode de développement. « *Le premier comprend la culture, la recherche scientifique et technique, c'est à dire tout ce qui appartient à l'horizontalité de l'homme et du cosmos. Le second mode concerne ce qu'il y a de plus profond dans l'être humain* ». La transcendance est la dimension verticale.

« *Le scientifique, qui prend conscience de ce double développement et en tient compte, contribue à la restauration de l'harmonie* ». (Jean-Paul II. Discours à l'Académie des Sciences. 31 octobre 1992. Loc. cit.). Après des siècles d'incompréhension est venu le temps du respect de toute recherche, commandée par l'exigence d'une intelligibilité toujours plus grande – celle de la science, celle de la foi : foi en l'homme et sa pleine dignité, foi en Dieu pour les croyants à condition de ne pas le confondre avec une création de l'imagination. Est venu aussi avec la recherche inassouvie d'intelligibilité, le temps du dialogue : et le C.E.R.N., Centre Européen de Recherches Nucléaires, créé et rassemblant dès 1950 des ingénieurs, administrateurs, scientifiques appartenant à des nations en guerre cinq ans plus tôt. Le C.E.R.N., premier pôle de l'Europe de la Science, réunit dans le dialogue et la recherche d'intelligibilité de l'infiniment petit extrême, des femmes et des hommes de toutes origines, ethnies, religions, philosophies. Galilée est à l'honneur au C.E.R.N. « *Ce qu'il y a, dans le monde, d'éternellement incompréhensible, c'est qu'il est compréhensible* » disait Einstein, oui : compréhensible, jusqu'à un certain point, **en tout cas objet de recherche d'intelligibilité**, au regard de la Science.

Un dernier mot sur les Etudes bibliques aujourd'hui. Elles auraient

réjoui St. Augustin et surtout Galilée.

Le fondateur de l'Ecole biblique de Jérusalem en 1890, puis de la Revue biblique en 1892, le père Marie-Joseph Lagrange, dominicain, s'est d'abord heurté à la méfiance et à la condamnation. Ses découvertes faisaient peur à certains responsables de la hiérarchie romaine. Intrépide dans sa foi et la rigueur de ses recherches, Marie-Joseph Lagrange est aujourd'hui pleinement reconnu pour sa qualité d'initiateur de l'étude critique des textes bibliques. Il nous offre la conclusion ultime de ces notes et réflexions :

« *Qu'il y ait une question biblique pour les hommes d'Eglise comme il y a une question sociale pour les hommes d'Etat, c'est ce qu'il est difficile de ne pas reconnaître [...] Et cette question biblique comporte une solution scientifique [...] mais il y a le devoir de demander à la science la réponse aux questions que la science soulève* ».

Bibliographie

- « **Encyclopedia Britannica** », Imc. Quinzième Edition. 1998 Chicago

Volume	
2	p. 459-466
9	p. 779-776
16	p. 760-761
19	p. 638-640
22	p. 484-486
- « **Universe** », William J. Kaufmann III. Quatrième Edition. 1994 p.56-67. W.H. Freeman and Company. New-York.
- « **The Great Scientists** », Jack Meadows. Oxford University Press. 1996.
- « **Introductions à l'Astronomie de Copernic** », H. Hugonnard-Roche, E. Rosen, J.P. Verdet. Paris 1979
- « **Le Conflit entre l'Astronomie nouvelle et l'Écriture Sainte aux XVIème et XVIIème siècles** » ; Pierre-Noël Mayaud. Ed. Honoré Champion. Paris. 2005. Six volumes.
- « **Galilée. Le messager des étoiles** ». Jean-Pierre Maury. 1986. Ed. Galimard Découvertes. Science et Technique. 125 p.
- « **Galilée. Le découvreur du monde** ». Enrico Bellone. 2003. 160 p. Ed. Belin. Pour la Science. Paris.
- « **Après Galilée. Science foi : nouveau dialogue** » Cardinal Paul Poupard. 1994. Ed. Desclée de Brouwer. 265 p.
- « **A l'Image des Géants** ». Stephen Hawking. 2005. Dunod. 239 p.
- « **Fundamental Astronomy** ». H. Karttunen, P. Kröger, H. Oja, M. Poutanen, K.J. Donner (Eds). Deuxième édition. 1994. Springer Verlag.
- « **Copernic (Nicolas)** ». J.P. Verdet. Encyclopédie thématique Universalis vol. 17. p 886 – 893. 2005.

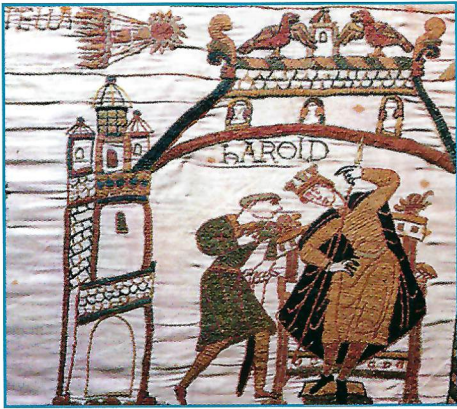


Fig. 1 - Tapisserie de la Reine Mathilde

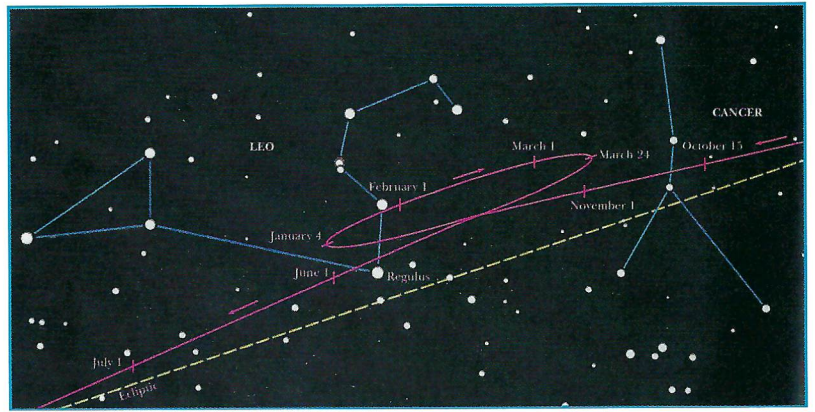


Fig. 3 - "Crédit Universe"

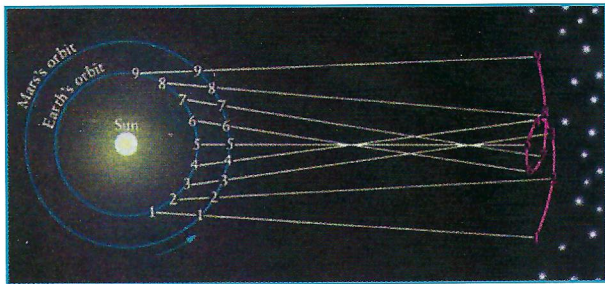


Fig. 4 - "Crédit Universe"

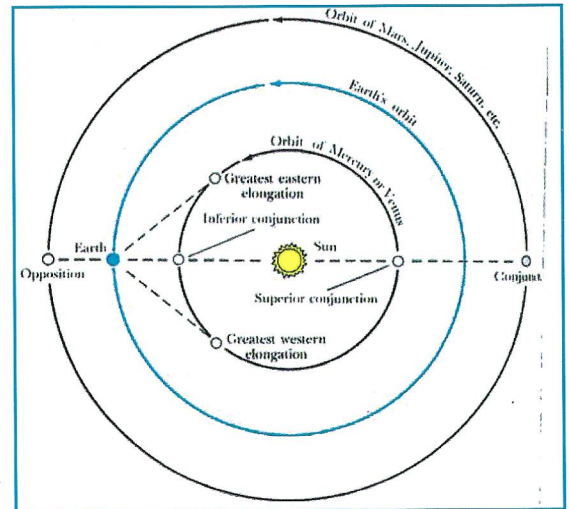


Fig. 5 - "Universe"

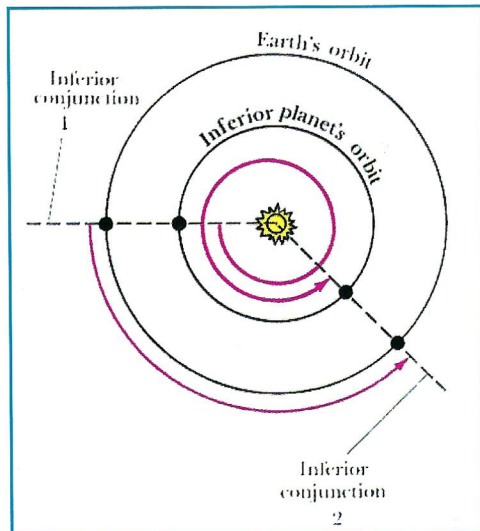


Fig. 6 - "Universe"

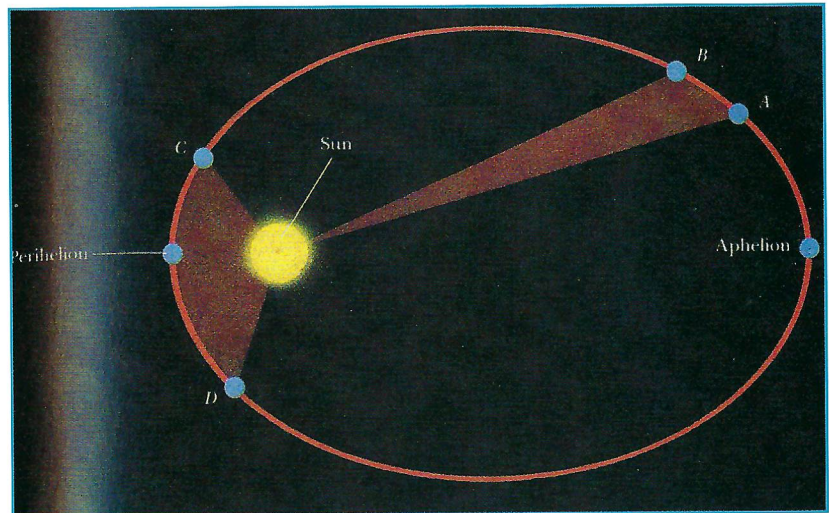


Fig. 8 - "Universe"



Fig. 10 - Crédit Louis Avau

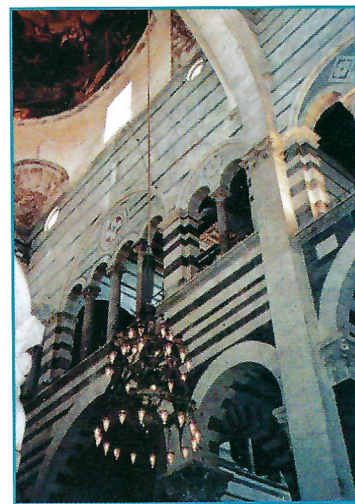


Fig. 11 - Crédit Louis Avau

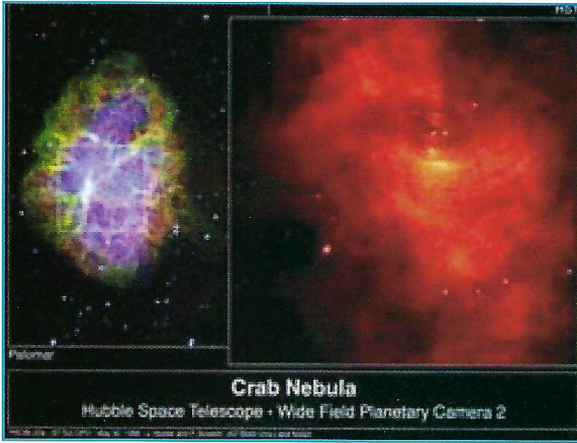


Fig. 12 - NASA

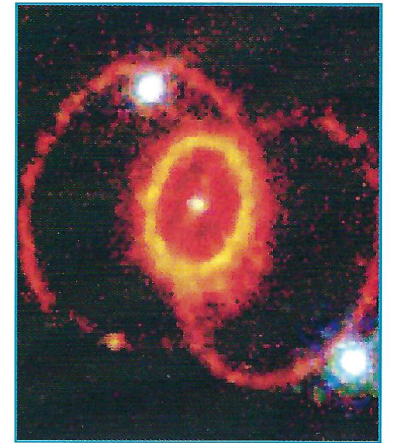


Fig. 13 - NASA

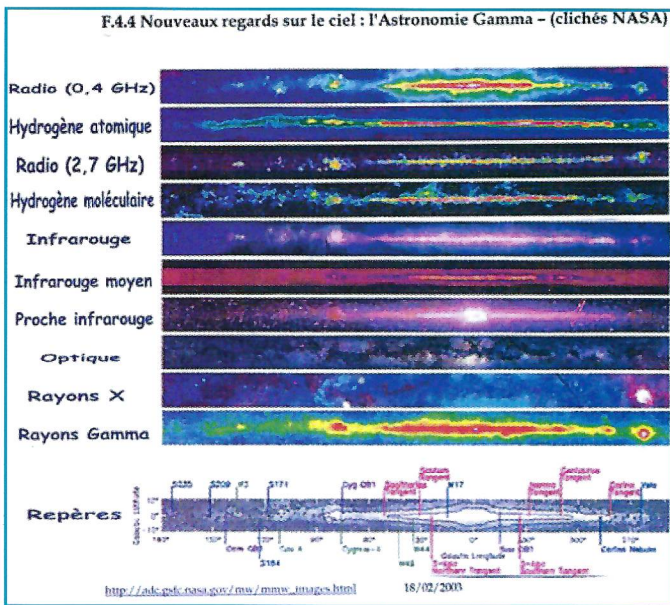


Fig. 14 - NASA

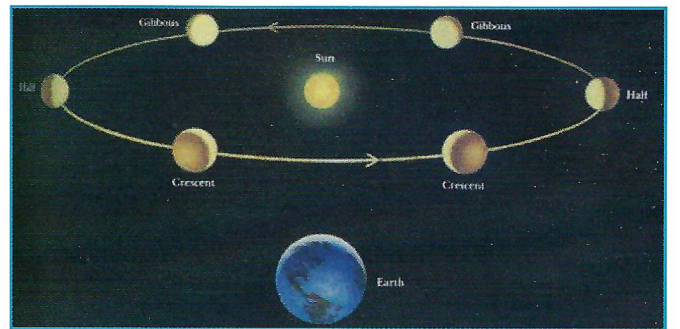


Fig. 15 - "Universe" - Phases de Vénus



Fig. 17 - NASA



Fig. 16 - Crédit Louis Avan



Fig. 19 - NASA



Introduction à la météorologie de l'espace

Par Vincent **BARRA**

Professeur des Universités, ISIMA, Université Blaise Pascal. Membre de l'ADASTA.

ISIMA : Institut Supérieur d'Informatique, de Modélisation, et de leurs Applications

Bien qu'étant à des distances extrêmement importantes de la Terre, le Soleil et les étoiles sont la source d'effets qui ont un impact considérable sur nos vies et notre environnement. L'objectif de cet article est de présenter la **météorologie de l'espace**, dont le but est de comprendre cet impact de l'activité solaire sur notre environnement terrestre. Pour comprendre celui-ci, il est nécessaire de disposer d'une connaissance de base sur quelques concepts physiques sous-jacents à la formation et à l'activité du Soleil qui seront donc dans un premier temps présentés. La météorologie de l'espace sera ensuite abordée, et les effets de l'activité solaire sur notre vie et notre environnement industriel et technologique seront ensuite présentés et étudiés. Diverses questions seront enfin soulevées concernant notamment la prédiction de ces effets.

1. Une illustration

Le 14 juillet 2000, de nombreuses perturbations radio en ondes courtes sont observées. Un satellite de télécommunications est détruit, plusieurs autres subissent des dommages (panneaux solaires). Le lendemain, plusieurs phénomènes étranges sont observés : des aurores boréales à des latitudes anormales (Marseille), des chutes de tension inexplicables en Scandinavie et au Canada. Le 17 juillet, on recense 12000 pannes informatiques dans des satellites.

L'explication de ces phénomènes est simple, et vient de 150 millions de kilomètres au-dessus de nos têtes : le 14 juillet, à 10h30, le Soleil éjecte en quelques minutes 150 milliards de tonnes de masse coronale. Quelque 8 minutes plus tard, en raison de la vitesse de la lumière, un fort rayonnement radio atteint la Terre (Figure 1). Un flux important de particules éner-

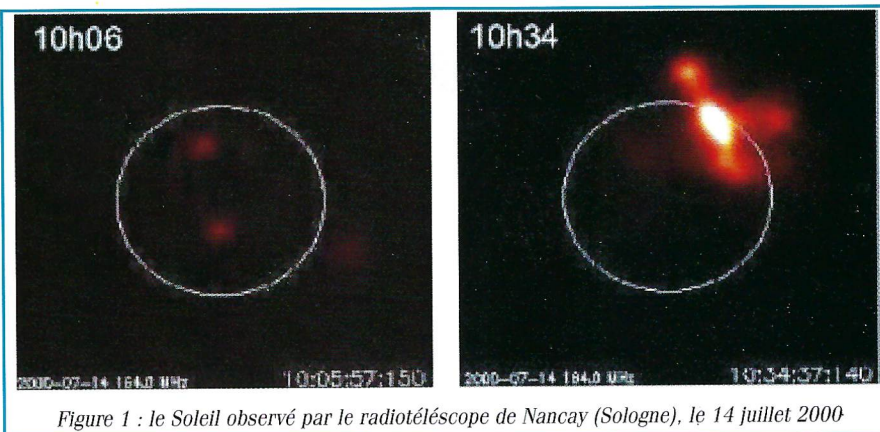


Figure 1 : le Soleil observé par le radiotélescope de Nancy (Sologne), le 14 juillet 2000

gétiques inonde alors notre planète, et une partie de ce flux atteint, quelques minutes après, le sol aux pôles. Deux jours plus tard, la masse coronale éjectée atteint la Terre, et de nombreuses particules (électrons, protons) apparaissent dans l'environnement terrestre. Les phénomènes entrant en jeu dans ce type d'évènement (**vent solaire, éjections de masse coronale, éruptions solaires**), et la Terre par la **structure de l'atmosphère terrestre**, expliquent ces observations et sont regroupés sous le vocable de météorologie de l'espace.

2. Le Soleil

L'objectif ici n'est pas de présenter de manière exhaustive le Soleil, ni même de donner un cours de physique Solaire (le lecteur intéressé par une telle approche pourra par exemple se référer à [1]). Il s'agit simplement de définir les éléments qui entrent en jeu dans la météorologie de l'espace.

2.1. Structure

Le Soleil est une étoile naine jaune ordinaire, de type G2, située dans le disque galactique à 27000 années-lumière du centre de la Voie Lactée. Sa masse est 330000 fois celle de la Terre ($1.9866 \cdot 10^{30}$ kg), pour un rayon de $6.95 \cdot 10^8$ m. Sa température effective de

surface est de 5780 K. Contrairement à la Terre (qui présente une rotation solide, c'est-à-dire que tous les points font un tour dans le même intervalle de temps), le Soleil tourne à une vitesse différente suivant la latitude : c'est le phénomène de rotation différentielle. Ainsi, à 16° de latitude, la période de rotation est de 25.28 jours, et l'équateur du Soleil tourne plus rapidement que les pôles d'environ 30%.

Il est composé en surface d'un mélange d'hydrogène (78%), d'hélium (20%) et d'éléments lourds. Sa source d'énergie est le cycle proton-proton.

On distingue habituellement trois couches dans sa structure interne (fig. 2-a) :

- le coeur, de 0 à 30% du rayon solaire. Il est le siège des réactions nucléaires, et occupe 1.6% du volume solaire,
- la zone radiative (de 30 à 71% du rayon solaire). Elle assure le transport d'énergie par photons gamma,
- la zone convective (de 71% à 100% du rayon solaire). Elle assure le transport d'énergie par convection à grande échelle, ionise les atomes d'hydrogène et d'hélium sous la surface. Si elle ne représente que 2% de la masse solaire, cette zone a un rôle essentiel pour l'activité et le vent solaires.

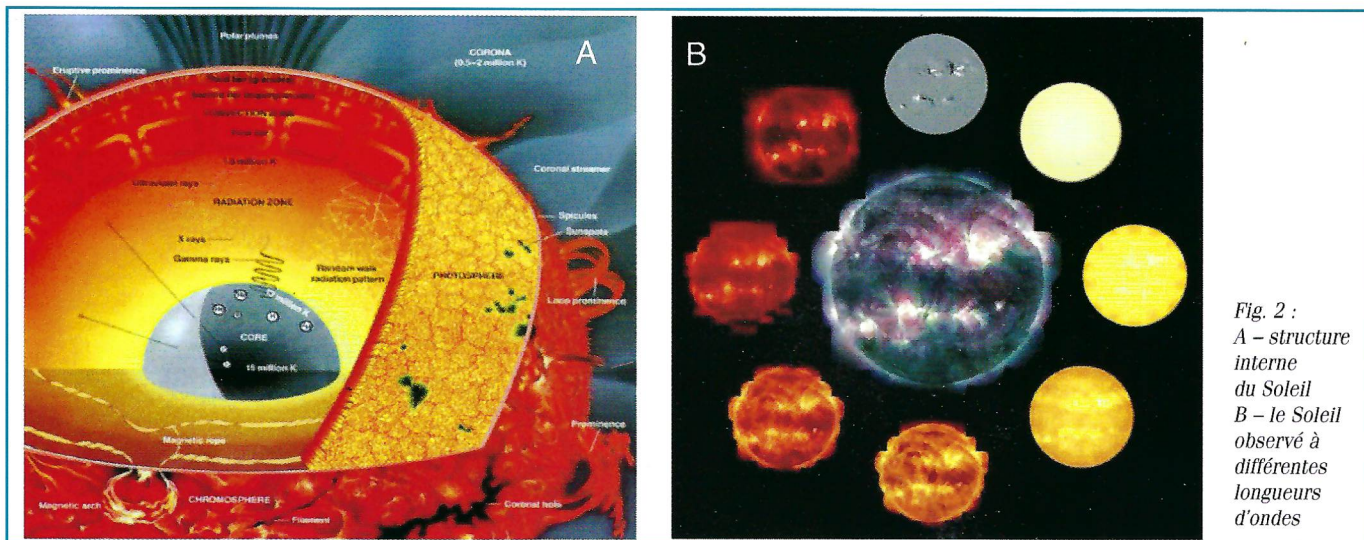


Fig. 2 :
A – structure interne du Soleil
B – le Soleil observé à différentes longueurs d'ondes

Au delà de la surface du Soleil s'étendent différentes couches (figure 2-b):

- la photosphère : épaisse de 500 km, elle est source de 95% du rayonnement solaire (visible et infrarouge). Elle est le siège des phénomènes de granulation, de points brillants, des facules et des taches solaires,
- la chromosphère : c'est un milieu dynamique et hétérogène, siège des protubérances,
- la couche de transition, qui émet essentiellement dans l'UV lointain,
- la couronne solaire, la partie la plus ténue et la plus étendue de l'atmosphère solaire. Elle est animée d'un mouvement d'expansion continu (vent solaire) et s'étend sur plusieurs centaines d'unités astronomiques vers l'héliosphère. C'est dans cette couronne que l'on observe bon nombre de phénomènes (jets et trous coronaux, protubérances, boucles magnétiques). Du fait de sa relative proximité avec la Terre, elle est la seule étoile présentant tous ses détails de surface. Elle sert donc de prototype d'étude pour toutes les autres étoiles.

2.2. Radiations émises par le Soleil

Le Soleil est en grande partie responsable de la météorologie de l'espace. En raison de la fusion nucléaire se produisant dans son cœur et des processus d'accélération intervenant dans son atmosphère, le Soleil émet des radiations électromagnétiques et des radiations de particules, tels que le vent solaire ou les rayons cosmiques. Les radiations électromagnétiques sont émises sur un spectre allant des rayons gamma aux rayonnements radio (en passant par les rayons X, les rayonnements UV, visible et infrarouge, par longueur d'onde décroissante).

Fig. 3 : éjection de masse coronale, observée, le 6 novembre 1997. Le cercle blanc est le Soleil occulté. Deux heures après l'éjection, les premiers protons atteignent le satellite SoHO (1,5 million de kilomètres de la Terre), et perturbent ses instruments (points et lignes blancs sur les images du bas)

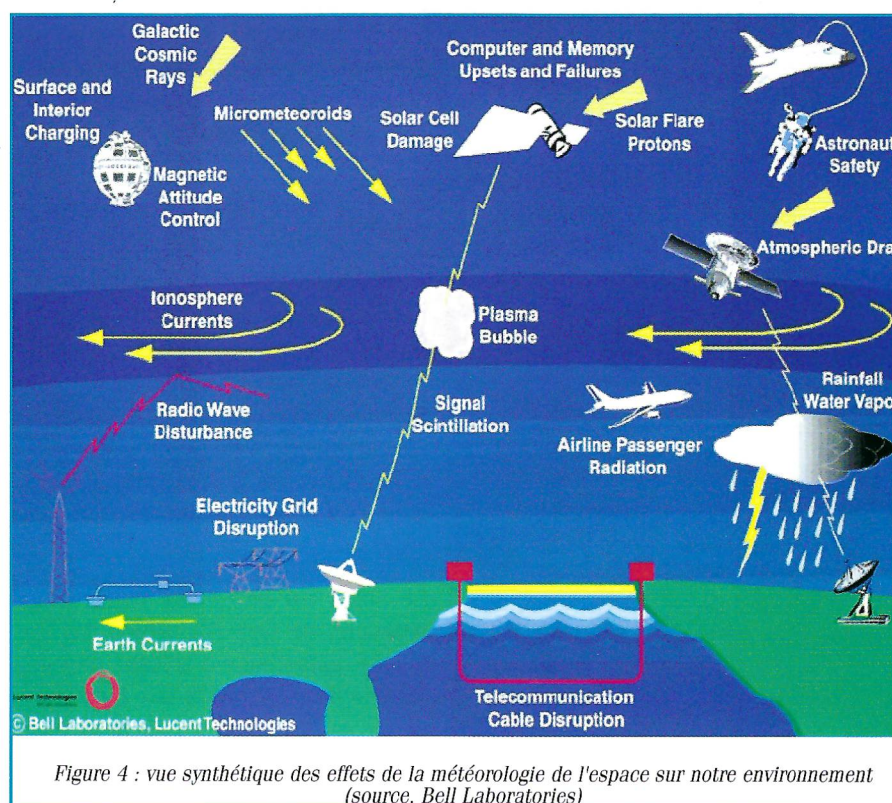
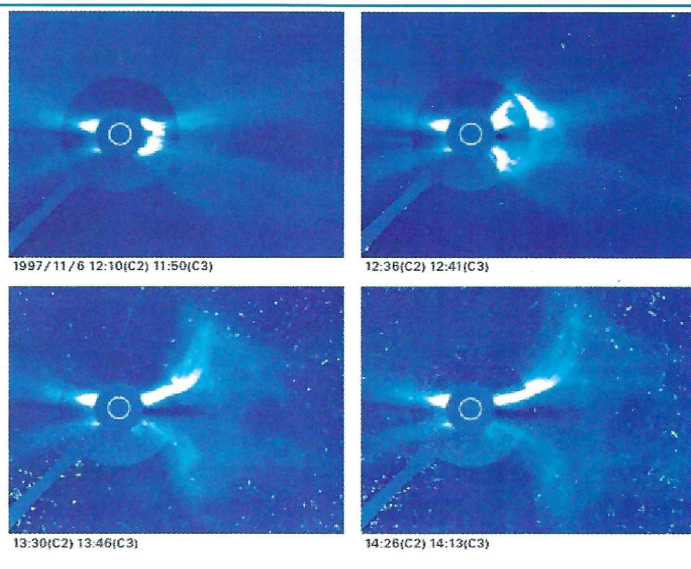


Figure 4 : vue synthétique des effets de la météorologie de l'espace sur notre environnement (source, Bell Laboratories)

Ces émissions sont continues, mais les niveaux de radiation sont bien plus forts lors d'éruptions solaires. Fort heureusement, les rayons gamma et X, très énergétiques, ne pénètrent pas l'atmosphère terrestre, et seuls les rayonnements à partir des longueurs d'ondes des UV atteignent le sol, atténués par la couche d'ozone, en 8 minutes environ.

Les radiations de particules, quant à elles, mettent plus de temps à nous parvenir en raison des différences de vitesses observées lors de leur passage dans l'héliosphère. Le vent solaire transporte un important flux de particules à une vitesse moyenne de 500 km/s, ces dernières atteignant alors la Terre au bout de 4 à 5 jours. Certaines particules néanmoins, issues des éjections de masse coronale (CME, Figure 3), voyagent jusqu'à trois fois plus vite. Durant une telle CME (Coronal Mass Ejection) des milliards de tonnes de masse solaire sont éjectées dans l'héliosphère, et leur composition (hélium, fer, mais aussi protons et électrons) ainsi que leur vitesse de propagation déterminent les effets qu'elles induisent.

2.3. Le cycle solaire

Les taches solaires, parfois visibles à l'œil nu, ont longtemps été la seule observation permettant d'affirmer

l'existence d'un cycle dans l'activité solaire. Des enregistrements effectués depuis 1749 de la fréquence d'apparition de ces taches, et de leur nombre, a permis de conclure que la période entre deux maxima successifs du nombre relatif de tâches était de 11 ans. Depuis l'avènement des satellites, il a été montré que non seulement les taches, mais aussi l'intensité de la radiation solaire, le vent solaire et l'ensemble des constantes solaires obéissent à un cycle de 11 ans. Notons que d'autres cycles solaires plus longs existent (90 ans, 179 ans par exemple).



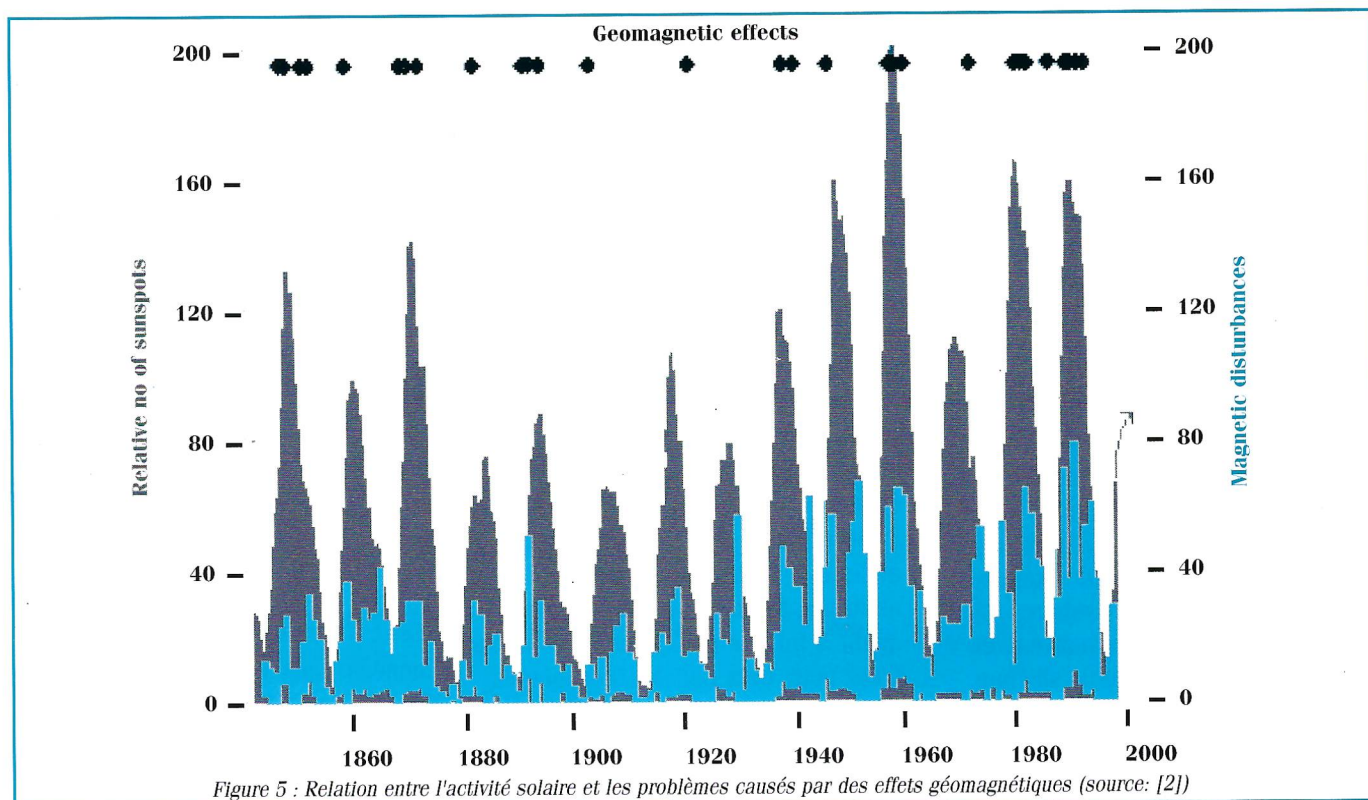
3. Conséquences de la météorologie de l'espace

La figure 4 (page précédente), produite par les laboratoires Bell, donne un aperçu des impacts de la météorologie de l'espace sur notre environnement. De nombreux domaines sont touchés, depuis l'aviation et les vols spatiaux jusqu'aux télécommunications, en passant par les systèmes électriques ou de transport du gaz et du pétrole. L'objectif de cette partie n'est pas de voir de manière exhaustive tous ces effets, mais de pointer quelques conséquences caractéristiques.

3.1. Aperçu historique

Les premières observations des effets de la météorologie de l'espace sur les systèmes technologiques terrestres ont été effectuées au milieu du XIX^{ème} siècle, au début de l'ère du télégraphe. En Grande-Bretagne, ce dernier a été inopérant pendant deux grandes tempêtes géomagnétiques (1847 et 1859), et des phénomènes de moindre importance se sont multipliés les années suivantes. En 1921 et 1958, des courants induits ont causé en Suède des incendies dans les installations de télégraphe. En février 1958, les câbles de communication transatlantiques ont été l'objet de pannes, dues à une violente tempête géomagnétique.

Le premier effet sur les systèmes électriques a été observé en Amérique du Nord, en 1940. Des baisses sensibles de courant, et une panne sévère d'un transformateur ont été à cette date causés par une violente tempête électromagnétique. D'autres pannes de ce type ont également été recensées, la plus importante étant sans doute celle du 13 mars 1989, qui a entraîné une rupture complète de l'alimentation en électricité au Québec pendant 9 heures.



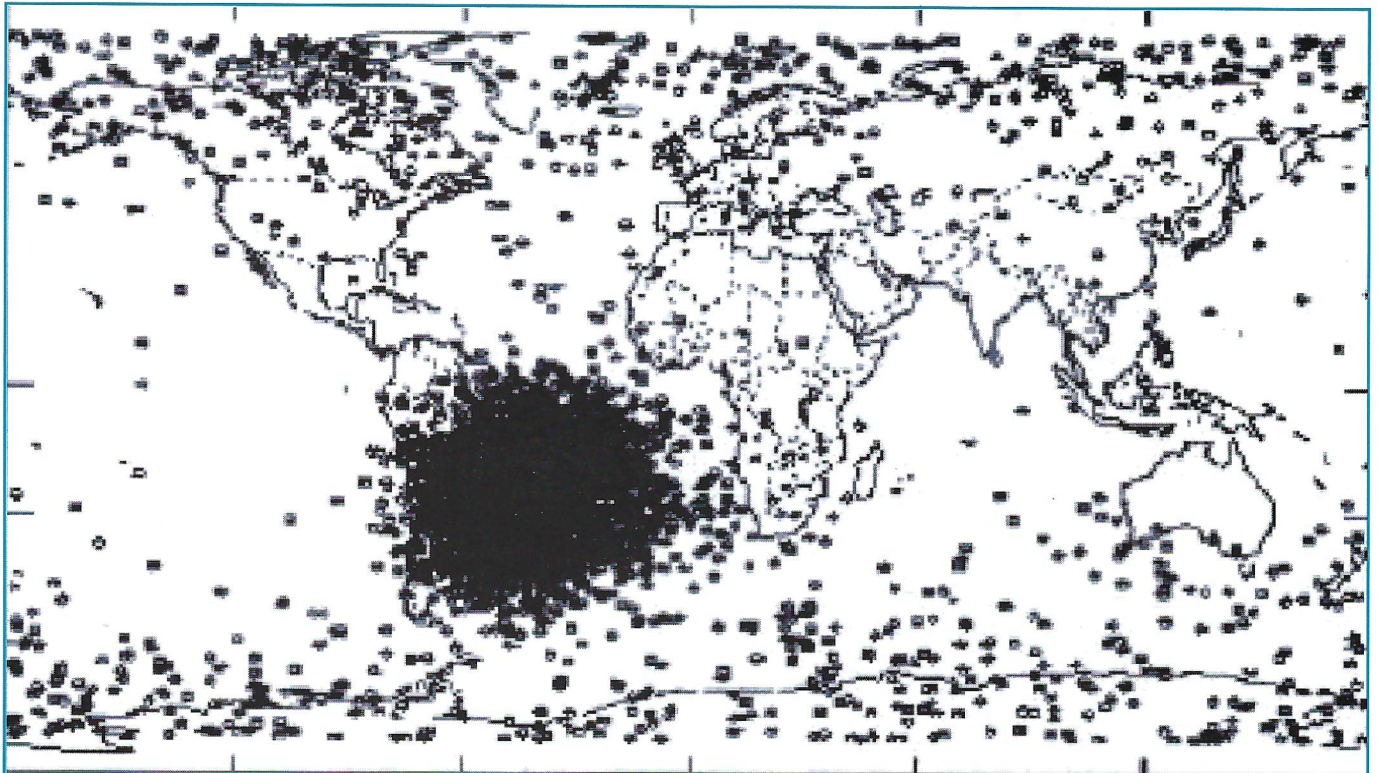


Figure 6 : Comptage des Single Event Upsets (problèmes électroniques élémentaires) pour le satellite UoSAT-3 en orbite polaire

Plus généralement, il existe une forte corrélation entre l'activité solaire (nombre de taches, activité magnétique) et le nombre de problèmes dans les systèmes technologiques observés sur Terre. La figure 5 présente en gris le nombre de taches solaires observées depuis 1845, en bleu les perturbations magnétiques, et en carreaux noirs les principaux problèmes technologiques dus à des effets géomagnétiques.

3.2. Perturbations électroniques

La société moderne actuelle est entièrement fondée sur l'électronique et le silicium. La miniaturisation des composants et circuits s'accompagne d'une alimentation à faibles courants. A la fin des années 70, des experts d'IBM [3] ont commencé à associer des problèmes de comportements de leurs appareils à ce qu'ils ont appelé des « soft errors », i.e. des phénomènes non reproductibles, spontanés, se manifestant par des erreurs ou des changements dans des données stockées. Sur Terre, ces erreurs sont causées par exemple par des flux de particules solaires (ou même galactiques), qui rentrent en collision avec le substrat de silicium, et produisent des flux d'électrons qui perturbent les systèmes. Pour prouver cette assertion, IBM a testé en

altitude (3100 m, à Leadville, dans le Colorado), des mémoires SRAM en mars 1987, et a observé des taux de panne 13 fois supérieurs à ceux observés au niveau de la mer. Bien sûr, l'altitude n'est pas le seul facteur entrant en ligne de compte, et la latitude, la longitude interviennent par exemple également (les flux de neutrons étant par exemple 6 fois plus importants aux pôles qu'à l'équateur).

3.3. Risques pour les vols et vols spatiaux

Les satellites passent en général plusieurs années dans l'espace, et sont alors exposés aux effets à court, moyen et long terme de la météorologie de l'espace. Ainsi, par exemple, lors d'un maximum d'activité solaire, la probabilité pour qu'une éruption solaire se produise pendant une mission d'un an est supérieure à 95%. Un proton, issu d'une telle éruption, doté d'une énergie de 100MeV, peut alors traverser sans aucune difficulté 40 mm d'aluminium. Un électron de 6MeV traverse quant à lui une épaisseur de 6 mm. C'est pour cela que les astronautes ne sont pas autorisés à quitter les navettes, mêmes surprotégés, lors d'éruptions solaires

Une étude [4] a permis d'établir un lien fort entre problèmes électroniques sur les satellites et météorologie de l'espace. Les effets mis en jeu sont divers et variés, et vont de la simple désynchronisation de l'horloge de bord à des dysfonctionnements graves d'instruments, des surtensions importantes ou la perte totale du satellite, en passant par un chargement en électricité statique des satellites ou des charges diélectriques provoquées par des électrons très énergétiques (figure 6). Un autre effet, surprenant, est que les effets de la météorologie de l'espace tendent à freiner les satellites. L'augmentation de l'activité solaire entraîne en effet une dilatation de l'exosphère, ce qui augmente la densité de l'atmosphère terrestre. Les satellites en orbite basse (périogée <2000 km) sont particulièrement affectés, et un freinage rapide est observé à une altitude inférieure à 200 km.

Les satellites restant plusieurs années dans l'espace (par exemple Hubble) doivent donc être sans cesse réexpédiés sur des orbites plus hautes, pour compenser ces effets.

La météorologie de l'espace a non seulement un impact technique, mais également financier considérable. Le cas du satellite Telstar 401 est un exemple probant. Le 10 janvier, une gigantesque tempête géomagnétique touche la Terre, et cause des dégâts mesurables (augmentation des flux de particules, sous-tensions de -700V sur certains satellites).

Le 17 janvier 1997, le réseau financier de CNN rapporte que le satellite Telstar 401 ne répond plus, et que cette panne va coûter à AT&T des centaines de millions de dollars. AT&T a plusieurs fois essayé, en vain, de rétablir les communications avec son satellite, qui a dû être considéré comme perdu corps et biens. Cela a entraîné une perte substantielle du Service Skynet Satellite de cette société, dont l'objectif était de relayer par 3 satellites des programmes de télévision. A posteriori la perte directe a été évaluée à 135 millions de dollars.

Si les satellites sont les cibles principales, les avions sont également concernés. En plus des perturbations électroniques (les équipements contenant des semi-conducteurs CMOS alimentés en 2.5V ont par

exemple deux fois plus de chance d'être victimes d'une soft error lorsque l'avion passe de 9 à 20 km d'altitude), les vols sont exposés aux rayons cosmiques secondaires, produits dans l'atmosphère terrestre. En 1994, une étude financée par la Commission Européenne, et menée par des scientifiques et des compagnies aériennes [5], a permis de quantifier les doses de rayons cosmiques reçues. Ainsi, il a par exemple été établi qu'un vol en Europe exposait les appareils à 3 fois plus de radiations qu'un vol à l'équateur. De même, à des hautes altitudes les vols dans le sens Est-Ouest sont soumis à plus de radiations que dans le sens Ouest-Est.

3.4. Perturbations des télécommunications

Comme précédemment mentionné, les premières observations de l'effet de la météorologie de l'espace sur les télécommunications ont été effectuées sur le télégraphe. Les effets sont dus à un champ électrique terrestre, généré par les perturbations magnétiques induites par les flux particuliers solaire et galactique. Ce champ électrique, qui a par exemple pu être mesuré en Norvège

lors de la tempête magnétique de mars 1940, peut atteindre des valeurs de 60 volts par kilomètre. Les progrès de la technologie ne permettent pas de s'affranchir complètement de ces effets : si les câbles actuels transportent moins de courants induits (même les fibres optiques contiennent du métal), les systèmes modernes contiennent des composants de plus en plus petits et complexes.

En plus des courants induits par les perturbations magnétiques, la météorologie de l'espace impose aux télécommunications par ondes radio des contraintes supplémentaires : ces dernières, passant dans l'ionosphère ou étant réfléchies par celle-ci, sont très sensibles aux flux particulière et radiatif imposés par le Soleil, ceux-ci ayant un effet amplifié dans cette couche de l'atmosphère. On observe fréquemment, lors de tempêtes solaires, des atténuations, des interruptions ou des distorsions des transmissions entre satellites et antennes sur la Terre. Ainsi, en 1996, de nombreuses perturbations ont été enregistrées dans les communications mobiles aux USA, et la cause a été immédiatement identifiée comme étant une éruption solaire particulièrement active.

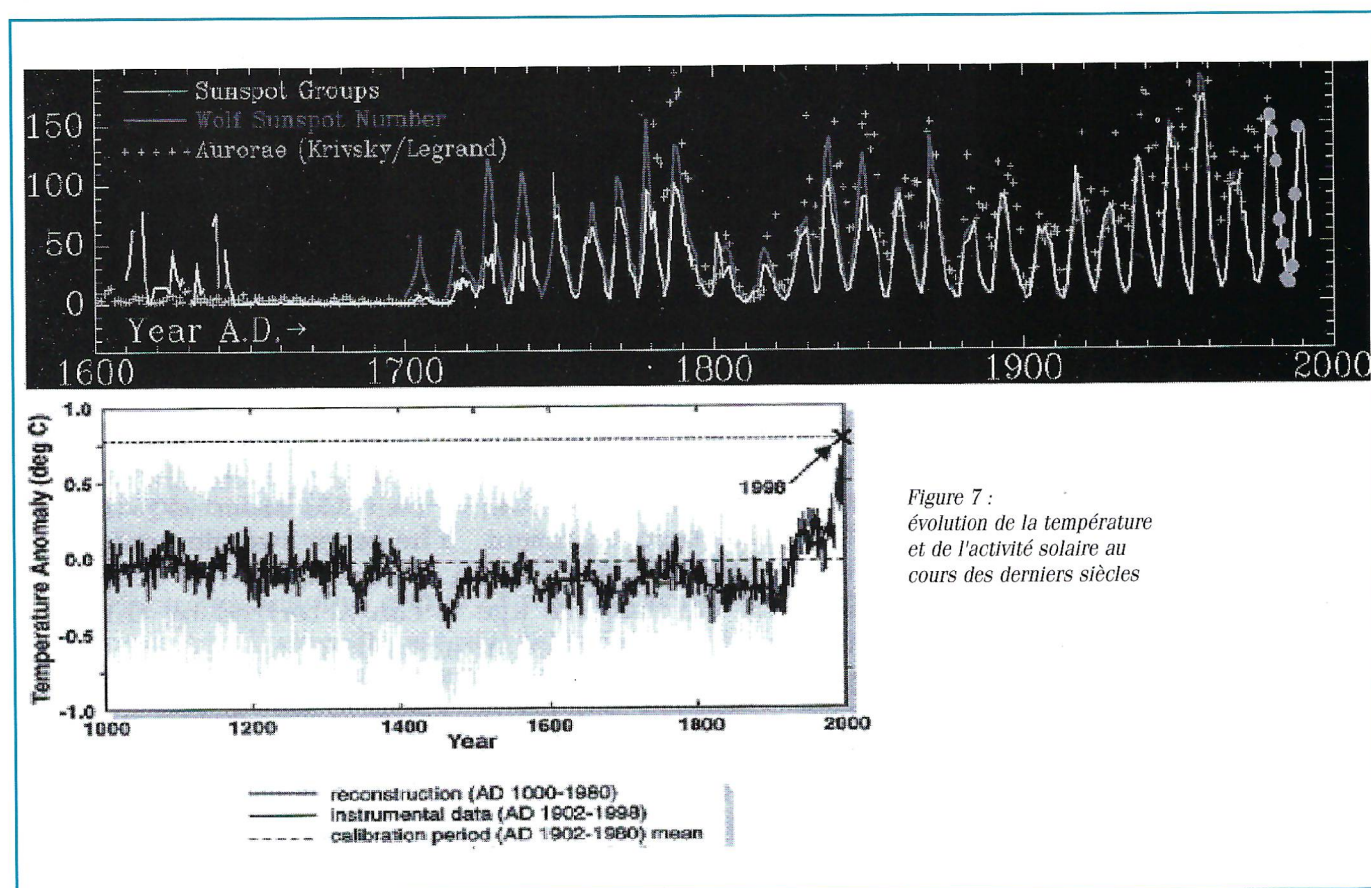


Figure 7 :
évolution de la température
et de l'activité solaire au
cours des derniers siècles

3.5. Problèmes dans les industries du pétrole et du gaz

Les oléoducs et gazoducs ont une tendance à se corroder aux points où le courant électrique circule du métal au sol environnant. La corrosion est un phénomène électrochimique naturel que les ingénieurs essaient de réduire en protégeant gazoducs et oléoducs avec une couche de vernis isolant. Cependant, puisque la distribution de ce vernis n'est pas parfaite, les tuyaux sont équipés d'une protection cathodique permanente, qui les maintient à une différence de potentiel négative (environ -1V) par rapport au sol. Les effets de la météorologie de l'espace sont ici des courants induits, produisant une différence de potentiel supplémentaire entre le pipeline et le sol, pouvant dépasser la capacité de protection du système cathodique. La corrosion reprend alors le dessus.

3.6. Influence sur le climat ?

Le Soleil a évidemment un rôle crucial dans la formation de notre planète et dans l'évolution de celle-ci. Le climat terrestre, outre le Soleil et son activité, est influencé majoritairement par deux facteurs : le volcanisme, impulsif et aléatoire, qui injecte dans l'atmosphère des aérosols modifiant l'albédo, et l'activité humaine, notamment par l'émission de gaz à effet de serre.

Si on s'intéresse à l'effet de la météorologie de l'espace sur le climat, il faut être capable d'avoir des informations météorologiques et d'activité solaire dans le passé. Les informations directes (relevés) météo sont disponibles à un historique de 150 ans, et au-delà les analyses ont recours à des mesures indirectes (données historiques, coraux, pollen fossile, anneaux de croissance des arbres, sédiments, carottages...) ; les informations sur l'activité solaire remontent à environ 400 ans, et les données antérieures sont obtenues par mesures indirectes (mesure du carbone 14 dans les sédiments, carottages...). En analysant ces données, on peut montrer une bonne corrélation entre climat et activité solaire avant 1900. Après cette date, on constate une augmentation rapide

de la température, non explicable par le seul facteur des variations de l'activité solaire (figure 7).

4. Prédiction en météorologie de l'espace

Pour pouvoir prédire et prévenir les effets de la météorologie de l'espace, deux ingrédients doivent être regroupés : un programme de recherche fondamentale d'une part, qui implique des laboratoires de modélisation, et des sites d'observation ; et un service de prévision opérationnel. Si le premier est en cours de réalisation, le second est loin d'être en service. En effet, développer un service de prévision suppose identifier un marché affecté par la météorologie de l'espace. Or actuellement, le marché est immature (de nombreux utilisateurs ne sont pas conscients des problèmes qui les affectent), et les contrats sont encore aujourd'hui trop rares (des accords de coopération ont été signés avec des opérateurs de télécommunication ou des fournisseurs d'énergie, mais restent encore anecdotiques).

La prédiction des effets de la météorologie de l'espace est seulement possible lorsque la chaîne complète des phénomènes physiques mis en jeu est prise en compte (vent solaire, flux particulaires, inductions, éjections de masse coronale...). Autant dire que la prédiction théorique est impossible, d'autant plus que bon

nombre de ces données dépendent des conditions d'observation du Soleil par des satellites en orbite ou des capteurs terrestres.

Un programme ambitieux, Living with a star (figure 8, voir 4^e page de couverture), a été mis en oeuvre par les Américains en 2007 (<http://lws.gsfc.nasa.gov/>). Il s'agit, à l'aide d'un ensemble de satellites, d'aborder la relation Terre-Soleil selon deux aspects :

- l'observation de la dynamique solaire dans l'héliosphère
- l'observation de la dynamique de l'environnement terrestre, effectuée par des satellites en orbite dans la magnétosphère et l'ionosphère, en réponse au vent solaire, aux CME...

Les objectifs de ce projet sont multiples ; par delà la compréhension et la quantification des phénomènes de physique solaire, il s'agit de réellement comprendre l'impact de la météorologie de l'espace sur la Terre (technologie et changements climatiques) et d'appréhender les effets du Soleil sur les matériels destinés à être envoyés dans l'espace (satellites, navettes).

Pour résumer simplement, la prédiction de la météorologie de l'espace est à l'état de ce qu'était la prévision des conditions météorologiques terrestres il y a une cinquantaine d'années.

5. Références

- (1) Aschwanden M.J., *Physics Of The Solar Corona*, Springer, 2005
- (2) Boteler D.H., Pirjola R., Nevanlinna H., The effects of geomagnetic disturbances on electrical systems at the Earth's surface, *Advances in Space Research*, **22(1)**: 17-27, 1998.
- (3) Ziegler J.E. *et al.*, IBM experiments in soft fails in computer electronics, *IBM Journal of Research and Development*, **40(1)**, 1996.
- (4) Koskinen H., *et al.*, Space weather and interactions with spacecrafts, *SPEE Final Report*, Finnish Meteorological Institute, Helsinki, 1999.
- (5) O'Sullivan D. *et al.*, Study of radiation fields and dosimetry at aviation altitudes, *Final report*, Dublin Institute for Advanced Studies, 1999.

et quelques sites :

- <http://www.spaceweather.com/>
- <http://www.sec.noaa.gov/today.html>
- <http://lpce.cnrs-orleans.fr/fr/meteo/meteo1-3.htm>



Toises, muids, pots et les autres. Les mesures en France avant 1789

Par **Pierre CHARBONNIER**

Professeur Emérite de l'Université Blaise Pascal à Clermont-Ferrand

Suite à sa conférence du 17 octobre 2007 à l'ADASTA

La métrologie est en ce moment à l'honneur à l'ADASTA puisque après l'article récemment paru du professeur Jean Chandezon, « *De la toise au mètre* » il va être encore question de mesures. Il y a toutefois une différence de perspective car dans cette communication il ne s'agit pas de « toise » mais de « toises » et ce pluriel change tout. En effet le monde des mesures d'avant 1789 était extrêmement complexe. Le professeur Chandezon avait d'ailleurs entrouvert la boîte de Pandore à propos des grandes distances mesurées en lieues dont il admettait qu'il y en avait plusieurs. Mais à l'échelle du royaume et plus encore de la France actuelle il y avait aussi plusieurs toises. On va donc s'efforcer de décrire ce qui a pu être justement présenté comme un « maquis », c'est-à-dire un domaine de la recherche difficilement pénétrable. Pourtant si l'on en croit le grand historien Marc Bloch, qui avait introduit la perspective économique dans l'histoire, « un temps viendra où aucune analyse de la vie régionale ne se concevra sans une enquête sur les mesures, sans des cartes des mesures ».

ANCIENNES MESURES ET MATHÉMATIQUES

Cet article relève donc essentiellement de l'histoire qui n'est pas proprement le domaine d'activité de l'ADASTA. Mais il est vrai que les anciennes mesures soulèvent des problèmes de calcul. Des professeurs de mathématiques ont fréquemment fait partie des Commissions chargées dans chaque département d'établir les équivalences entre les anciennes mesures et les nouvelles découlant du système métrique. Ce sont les Tables de conversion dressées par

ces commissions qui constituent la base de la collection éditée par le groupe de recherches d'histoire de l'Université Blaise Pascal.

Un point intéressant du point de vue mathématique est celui du rapport entre les mesures d'un système. Le professeur Chandezon soulignait la prépondérance des rapports duodécimaux. Cependant les rapports binaires n'étaient pas moins importants, en particulier en Auvergne. Et enfin si l'on ne divisait pas par 10, en revanche on multipliait par 100, avec le quintal fort employé et les arpens de 100 perches.

De nos jours certains chercheurs s'efforcent de trouver des équivalences mathématiques entre des mesures a priori fort éloignées et même, allant plus loin, supposent une filiation entre elles. Ainsi une dame, anciennement professeur de mathématiques, m'a écrit pour me signaler de telles correspondances. Voici un passage d'une de ses lettres : « *Un autre exemple du soin apporté à la transmission, en dépit des aléas de l'histoire : le journal [unité de mesure agraire] de Puigcerda en Espagne est l'unité sumérienne iku (comptée avec la coudée longue de Sumer) à 3,5m² près, soit 0,1 pour 1000* ». Certes cette correspondance est numériquement exacte mais la transmission entre une unité de la très ancienne civilisation de Sumer en Mésopotamie et l'Espagne, paraît plus qu'aléatoire et il faut plutôt voir ici le fruit du hasard ! Dans la même ligne le dernier numéro des *Cahiers de Métrologie*, organe du Comité Français de Métrologie historique, renferme une étude d'un universitaire québécois présentant certaines mesures agraires du Faucigny comme reprenant exactement des mesures carolingiennes. Ce point de

vue est très contestable, mais ne peut être discuté ici.

Quittant les mathématiques on commencera par une rapide présentation des anciennes mesures avant d'aborder les problèmes qui les concernent.

RAPIDE TABLEAU DES ANCIENNES MESURES

Beaucoup de celles-ci dérivent des mesures romaines, du moins quant à leur nom, pied, muid, setier, livre, mais avec des valeurs différentes. Il y a aussi des mesures d'origine celtique, lieue, arpent. Les unes et les autres pouvaient avoir une base concrète dont un bon exemple est le pied.

Mesures de longueur :

Celles-ci étaient (en dehors des nuances régionales) distinguées par leur destination. La mesure générale était celle qui servait par exemple dans les travaux de maçonnerie. La plus connue était la toise divisée en 6 pieds. Le pied était une mesure concrète, mais qui avait été normalisée à 32,48cm pour le pied dit du roi d'où la toise de Paris ou toise royale de 1,949m. Mais il existait spatialement d'autres toises dont notamment la toise de Bourgogne de 7,5 pieds du roi, soit 2,436 m. Surtout comme on le verra une partie du royaume n'utilisait pas la toise, mais la canne qui reposait sur une autre mesure concrète de base, le pan, lequel correspondait à la distance entre le pouce écarté et le petit doigt. Chez les anciens était admis un rapport entre le pan et le pied de 3 à 4 ; or la canne était comptée à 8 pans. Finalement il n'y avait pas beaucoup de différences entre la toise et la canne puisque $8 \times \frac{3}{4} = 6$.

La toise pouvait servir pour les mesures agraires, mais dans une grande partie de la France, ce rôle était tenu par la perche, c'est-à-dire l'instrument de l'arpenteur. Elle comportait un nombre de pieds variable, compris généralement entre 17 et 22. La perche des Eaux et Forêts était de 22 pieds du roi.

Pour les étoffes existait une mesure spéciale définissant leur largeur. Il s'agissait de l'aune. L'aune de Paris était de 1,188m. Mais dans les régions, nombreuses dans la France d'Ancien régime où existait une industrie textile, on rencontrait une « aune de tisserand », généralement un peu moins longue que la précédente.

Enfin pour les distances on comptait en lieue dont il existait comme l'a noté le professeur Chandezon, plusieurs variétés. Celles qu'il propose sont d'ailleurs récentes. Dans les textes anciens on rencontre surtout l'opposition entre une petite lieue d'environ 4 km et une grande lieue de l'ordre de 8 km.

Mesures agraires

On peut opposer les mesures géométriques correspondant à la multiplication de deux unités de longueur ou à une seule portée au carré (arpent, acre en Normandie valant en moyenne 30-40 ares) et les mesures concrètes avec des dimensions d'ailleurs comparables. Au XVIII^e siècle les premières correspondaient à un certain nombre, 100 le plus souvent, de perches carrées ou une autre unités au carré. Ainsi l'arpent des Eaux et Forêts, un des plus grands, composé de 100 perches de 22 pieds, avait une superficie de 51,07 ares. Les secondes se subdivisaient en deux grands groupes, unités basées sur le travail fourni (journal) et unités basées pour les terres sur la quantité de semence jetée (séterée en Auvergne, saumée dans le Midi, bichetée dans l'est).

Dans cette zone il y avait naturellement des unités particulières pour les prés et les vignes, encore que la séterée ait pu servir de dénominateur commun pour tous les fonds et notamment pour les bois. Dans le cas des prés le journal correspondait à ce qui pouvait être fauché en une journée, d'où parfois l'appellation de seytorée renvoyant à scier-couper. On pouvait aussi faire intervenir la

production : par exemple en Auvergne on évaluait aussi les prés en chars de foin. Pour les vignes la superficie retenue était ce qui pouvait être bêché en un jour, car le travail de la terre était minutieux. Aussi l'oeuvre de vigne était-elle une petite mesure de l'ordre de 5 ares. Il est à noter que certains auteurs ont cru par erreur qu'il s'agissait de l'opération de la taille. Plus rarement la vigne pouvait être évaluée au nombre de ceps. C'était le cas dans l'Aunis, province faisant partie de l'actuelle Charente-Maritime mais curieusement cette mesure portait le nom de « gerbe » !

Séterée, oeuvre et journal avaient été dans certaines régions normalisées, c'est-à-dire qu'il leur avait été attribué une valeur déterminée en unités de base, toises carrées ou cannes carrées ou perches carrées.

Enfin on rencontre des unités mystérieuses comme dans l'Yonne actuelle, la « denrée » et la « parisée ». La denrée était comptée à 1/6 d'arpent et la parisée à 1/5. Ces noms renvoient évidemment à des valeurs monétaires. On remarque d'ailleurs que le rapport de superficie entre ces deux unités correspond à celui séparant le denier tournois du denier parisien plus fort. La modestie de ces valeurs, même reportée dans le temps, conduit à penser qu'il s'agissait de la redevance imposée à cette parcelle plutôt que de la valeur de son produit.

Mesures de capacité

Les grains se mesuraient à la capacité et non au poids comme actuellement. Il y avait dans chaque marché un système dont le sommet était le muid, mais celui-ci n'était plus qu'une mesure théorique de même que le setier son premier diviseur. En Auvergne on avait donc le muid = 16 setiers, le setier = 2 émines, l'émine = 2 quartes. En dessous venait le carton de 8 au setier lequel était la mesure de manipulation car il faisait environ 16 litres et pesait 12 kg. A Paris l'équivalent du carton était le boisseau lequel était la 12^e partie du setier, lui-même 12^e partie du muid. Dans la plupart des cas l'avoine, nettement plus légère que le froment et de moindre valeur, relevait de mesures plus vastes, ce qui compen-

sait en partie son infériorité. Tout en restant des mesures de capacités, certaines unités renvoyaient à des poids comme l'année dans la région lyonnaise et la salmée ou saumée ou charge en Provence. Il s'agissait dans les deux cas du poids que pouvait transporter une bête de somme à une époque.

Pour les liquides on se rend compte en parcourant les Tables de conversion qu'il y avait de très grandes différences d'un département à l'autre. Ainsi deux Lyonnais venus à Clermont qui auraient commandé pour accompagner leur repas un pot de vin, soit alors environ 1 litre, et non 46 centilitres comme actuellement, auraient vu apporter un récipient de 15 litres ! Dans certains départements la situation était effroyablement compliquée. C'était notamment le cas en Languedoc. En effet cette région comptait un très grand nombre de producteurs, mais elle ne participait pas alors à une grande activité commerciale qui aurait pu favoriser des regroupements métrologiques. Dans le Gard par exemple les Tables énoncent 19 noms de mesures du vin alors que dans l'Hérault on dénombre 42 systèmes.

Dans l'ensemble il y avait deux groupes de mesures correspondant à deux emplois différents et avec des vaisseaux différents : des mesures pour le commerce de gros avec des vaisseaux en bois et des mesures pour le débit au détail avec des récipients d'autres matériaux. Le raccord entre les deux groupes était plus ou moins bien assuré car il était essentiellement comptable. A Paris par exemple la plus grande mesure était le tonneau de 804 litres qui se divisait en 2 queues ou pipes et par ailleurs en 3 muids de 268 litres sans lie. On retrouvait en effet le muid, mais moins vaste que pour les grains. La petite mesure de base était la pinte de 0,931 litre, souvent dénommée « bouteille ». On constate que le rapport entre le muid et la pinte était complexe puisque le muid renfermait 288 pintes. Pour l'huile, produit important en raison de son rôle dans l'éclairage, on rencontre plusieurs formules. Tantôt on emploie les mêmes mesures que pour le vin, tantôt l'huile a ses propres mesures de capacité appelées parfois « lampe », tantôt enfin elle est pesée.

Un autre type de mesures relevant des volumes concerne le bois coupé pour le chauffage. Il est alors tenu pour important car il figure dans les rubriques du questionnaire adressé aux communes dans les départements. La plupart du temps cette mesure est appelée « corde » car elle servait à enserrer le bois. Parfois est employé un cadre rigide et l'on parle d'un « moule », parfois on se contente de superposer les bûches et l'on a une « pile ». Les trois dimensions étaient la « couche », c'est-à-dire le front du tas de bûches, la hauteur du tas et la longueur des bûches. Ces dimensions variaient évidemment, mais généralement la corde représentait plus d'un stère. Cependant dans certains secteurs du Midi méditerranéen on pesait le bois de chauffage. La mesure était ainsi « la charge de bettes (sic) à bât » selon la réponse d'une commune des Hautes-Alpes. Une autre précise que la charge fait « 2 quintaux poids de pays ».

Poids

Ce texte introduit le problème du poids. Ce type de mesures est relativement plus simple à appréhender car la livre poids de marc (pdm) de 489,5 g comprenant 16 onces de 30,59g était employé exclusivement dans de nombreux départements et connue en tout cas partout en France en 1789. Mais il existait d'autres livres comme le laisse supposer cette mention des quintaux « poids de pays ». La charge d'une bête de somme n'était donc que de 86 kg et non de 99 qu'elle aurait dû porter avec la livre poids de marc. Tant mieux pour la pauvre bête ! En fait ces petites livres occupaient le sud du royaume sous l'appellation de « livre poids de table » ou « de livre de Montpellier » dont on admettait couramment qu'elle était dans un rapport de 5 à 6 avec la livre pdm, ce qui lui donnerait une valeur de 407,9 g. mais en fait elle avait localement une valeur différente. En revanche dans l'ouest et dans l'est on trouvait quelquefois des livres plus lourdes que la livre pdm. Par ailleurs les mesures de poids étaient souvent liées à la marchandise pesée, comme la livre carnassière employée dans le sud-ouest valant 3 livres ordinaires.

Matières diverses et leurs mesures

D'une façon générale chaque produit avait ses propres mesures ou les

empruntait à un autre en les adaptant. Par exemple les fruits et légumes étaient souvent assimilés à l'avoine et se mesuraient comblés. Un autre article commercialement important sous l'Ancien régime était le sel car il permettait de conserver les viandes. Dans le commerce on utilisait souvent pour lui les mesures de capacité des grains ou parfois il était pesé. En revanche dans les zones de production il existait des mesures propres au sel telles, dans les salines du Jura, le salignon (4 livres pdm) et la benaite (12 salignons) et enfin la charge de 4 benaites alors que dans celles du Poitou-Charentes on retrouvait les noms des mesures de capacité classiques, mais avec des valeurs spécifiques. La chaux, les minerais et les deux charbons (de bois et de terre) avaient aussi des mesures particulières.

CARACTÈRES DES ANCIENNES MESURES

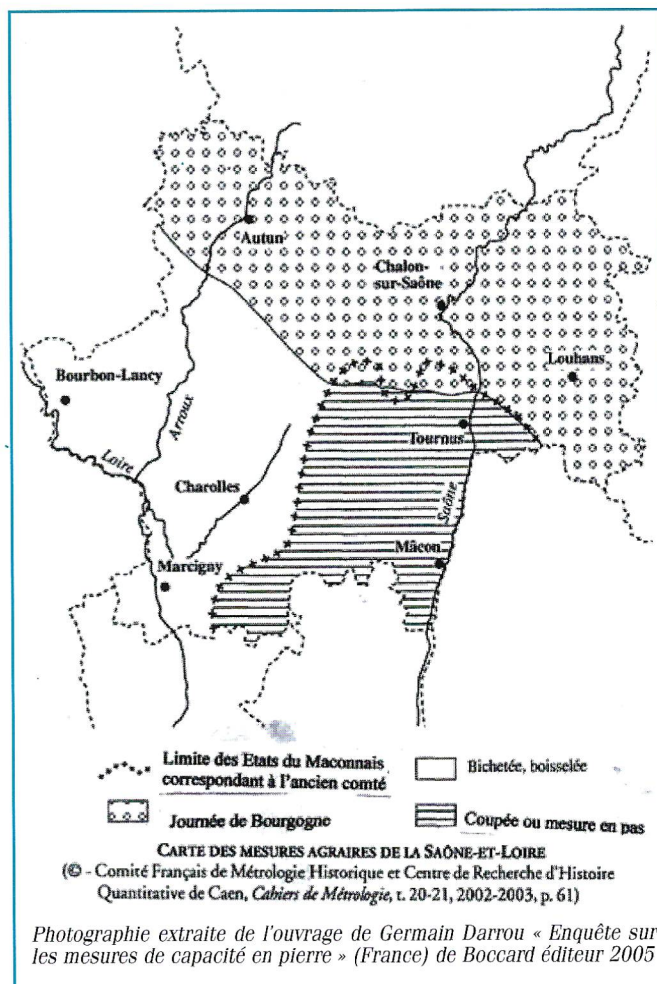
Les anciennes mesures peuvent être l'objet de nombreuses critiques, mais on doit aussi reconnaître qu'elles étaient adaptées à leur époque comme le prouve leur capacité de résistance.

Tout d'abord à la différence du système métrique il n'y avait pas de correspondance simple entre les unités. Par exemple le boisseau de Paris, mesure clef de capacité pour le blé, était selon l'ordonnance de 1670, de 8 pouces 2 lignes et demie en hauteur avec un diamètre, ici plus simple de 10 pouces, soit une valeur en pouces cubes de 655,78, en sorte que bizarrement il aura une contre-valeur plus simple en litres, soit 13,08 litres qui peut être arrondie

à 13 litres pour des calculs rapides. Aussi quand il fallait exprimer la dimension d'une mesure de grain, les autorités locales préféraient souvent indiquer le poids du grain qu'elle contenait.

Multiplicité

La multiplicité géographique est à mettre en corrélation avec l'émission politique qui suit la mort de Charlemagne. Chaque prince prétend avoir des mesures particulières qui seront obligatoires dans le territoire où il exerce l'autorité. La géographie des mesures agraires de Saône-et-Loire trouve son explication dans l'implantation des anciens comtés. La zone de la coupée est en gros celle du comté carolingien de Mâcon dont les limites sont conservées par les Etats du Mâconnais. Au nord et à l'est la zone de la journée de Bourgogne correspond au comté de Chalon et à la fraction du comté d'Autun qui furent absorbés par le duc de Bourgogne. La troisième zone est cette partie de l'Autunois qui avait été détachée du comté d'Autun. De même les mesures des grains dans l'actuel Cantal comportent deux zones de petit setier.



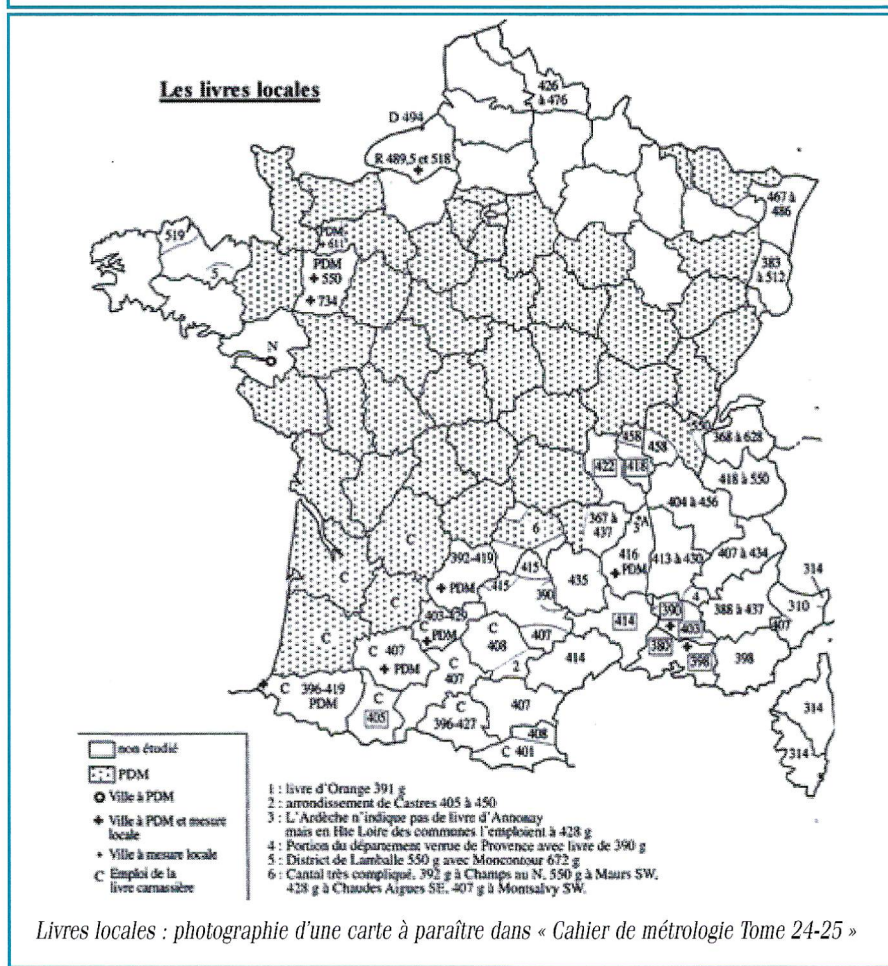
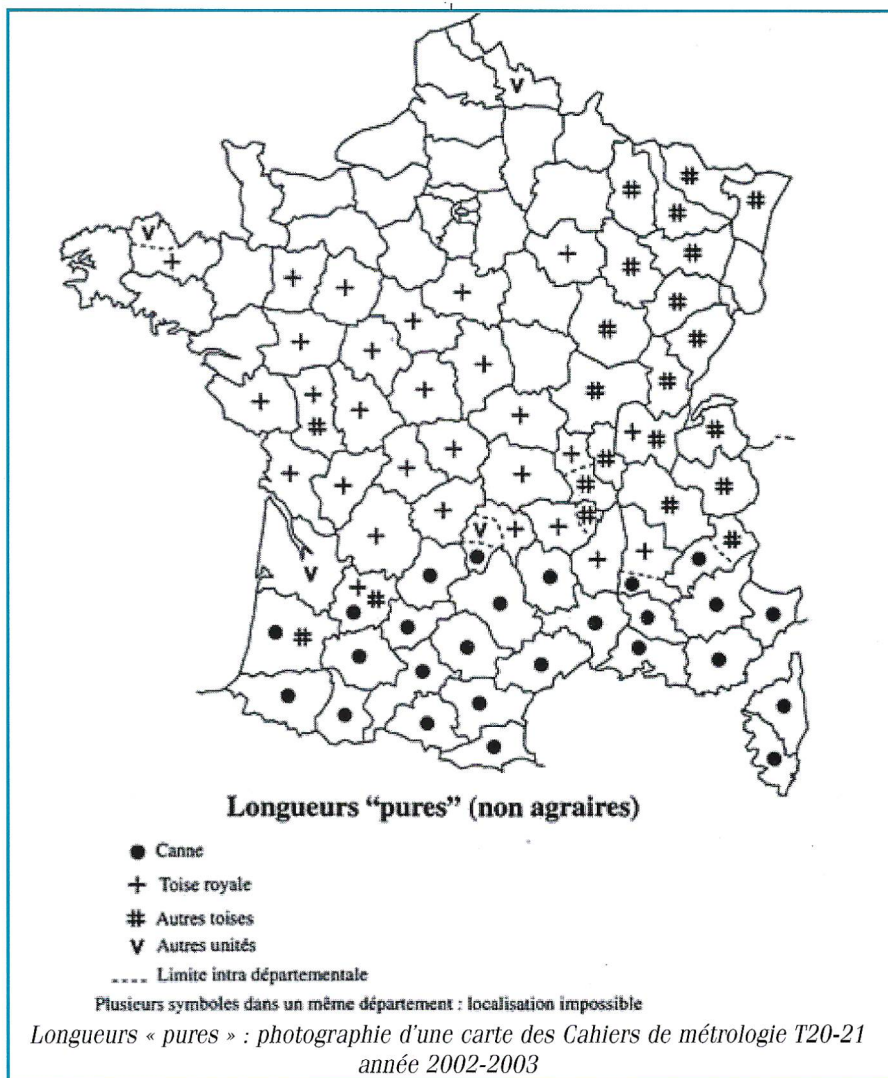
Elles correspondent aux terres des abbayes de Mauriac et d'Aurillac alors que les possessions du comte d'Auvergne ont des setiers de bonne taille, mais diversifiés en raison du second mouvement, celui des seigneurs.

En effet dans un deuxième temps le mouvement d'émiettement s'est étendu aux seigneurs plus modestes. Ceci implique qu'il peut y avoir dans une catégorie de mesures donnée, plusieurs milliers d'échantillons divers car les seigneuries étaient extrêmement nombreuses. Il n'y avait pas là seulement une revendication d'orgueil. En effet le contrôle des mesures pouvait donner lieu à des redevances. En principe les variations seigneuriales restaient dans les limites déterminées par le prince local. Mais l'autorité de celui-ci était plus ou moins forte. On peut expliquer ainsi le contraste entre l'Anjou doté de princes forts et où les setiers sont de dimensions à peu près égales, et le Poitou où le pouvoir ducal était vacillant et où les setiers étaient très divers. En revenant en Saône-et-Loire on constate dans la zone des mesures agraires à la semence de grands écarts d'une localité à l'autre car les seigneurs y étaient quasi indépendants.

Le mouvement d'évolution des mesures lié à l'affaiblissement du pouvoir central est particulièrement net sur le plan des mesures pour les grains. Il se traduit par une très forte augmentation des mesures de capacité au point qu'on peut parler pour l'époque de l'An Mil de la « révolution du muid ». En effet celui-ci passe d'environ 60 litres aux temps carolingiens à plus de 1800 litres à Paris dès le XIII^e siècle. Cette brutale augmentation ne semble pas avoir eu de graves répercussions sociales comme on pourrait le penser, car les redevances ont été diminuées et formulées désormais en setiers (1/12 du muid) et non plus en muids.

Complexité

La complexité vise les mesures d'un même lieu. Elle peut faire sourire ou justifier le refus de s'intéresser aux mesures. A Annecy par exemple on ne comptait pas moins de 6 mesures de poids avant le passage au système métrique décidé en 1845 par le roi de Piémont : selon un rapport du syndic de la ville on utilisait : 1° le poids



Nom de la mesure des terres labourables



Mesures basées sur la semence

- B Boisselée
- Bi Bichérée
- C Carte
- Ca Cartonnée
- Cd Concade
- Cp Coupée
- E Eminate
- Mezzinata
- Mt Métanchée
- P Paaal (subdivision de la charge)
- Q Quarte
- Qt Quarterade
- S Sèterée
- Sem Divers noms renvoyant à quantité semée
- SL Salmée ou charge
- 2 Mesures au carreau
- ? Alpes de Haute-Provence : très peu de données et contradictoires.
- () Mesure minoritaire

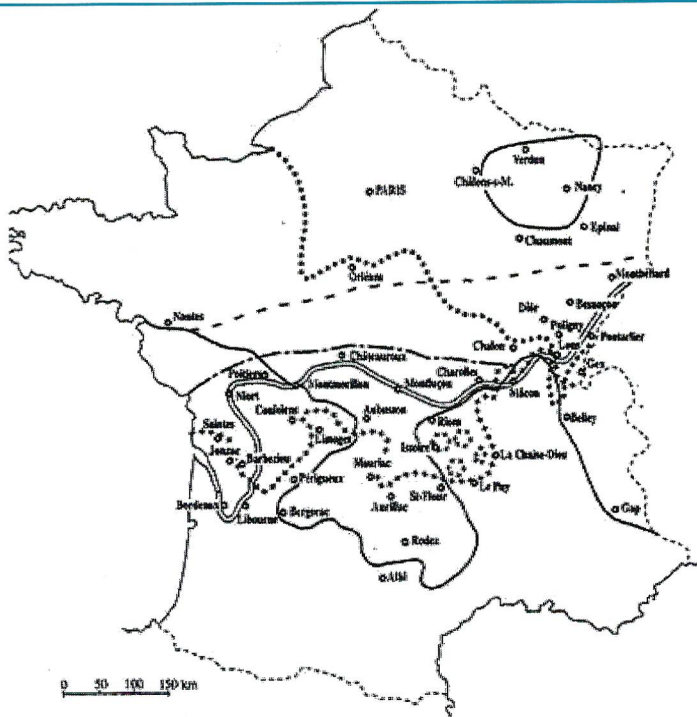
Mesures géométriques

- A Arpent
- Acrc
- BN Bonnier
- M "Mesure"
- MD Muneaudée
- Qc Quartier
- R Raslée

Mesures de travail

- J Journal
- Ps Poste

Photographie d'une carte de l'ouvrage « L'historien en quête d'espace » Presses universitaires Blaise Pascal



- Contraste Nord-Sud

d'après Ph. Pinchemel *Géographie de la France* p. 218 et P. Bonnauud *De l'Auvergne* p. 294.

- 1 - Limites des parlers de langue d'oïl ou francoprovençaux
 - Au X^e s. selon Von Wartburg
 - Limite à la fin du Moyen Age
 - ==== Limite retenue dans la seconde moitié du XIX^e s.
- 2 ——— Limite des toits (limite nord des toits plats à tuile creuse avec esclave de ceux-ci en Lorraine)
- 3***** Limite des pays de droit écrit au sud et de droit coutumier au nord
- 4***** Limite sud des pays d'openfield

La provenance de la photo est dans la photo elle-même : Pinchemel....

d'Annecy de 24 onces de Montpellier 628 g pour le pain et la viande, 2° le poids de marc de 489,5 g pour l'orfèvrerie et la soie, 3° pour les denrées coloniales un poids de 16 onces de Montpellier compté à 418 g comme à Chambéry, 4° le poids de Piémont pour le sel à 369 g,

5° pour la fonte de fer le poids de Genève de 550 g en comptant 105 livres pour faire un quintal « poids de fourneau » et enfin le poids médical ou pharmaceutique dit livre de Turin de 307 g. Cette multiplication s'explique à la fois par la spécificité de certaines mesures, par des additions historiques comme le système métrique et par des influences du voisinage.

Dans le domaine des capacités pour les grains intervenaient les façons de mesurer. Il y avait la mesure rase ou sciée, mais à l'opposé on pouvait ajouter des grains tant qu'ils tenaient en équilibre : c'était le comble qui représentait selon la forme du vaisseau un pourcentage plus ou moins grand, parfois jusqu'à 25 % en plus du ras. Mais il existait d'autres formules telle celle appelée du « doigt sur bord » intermédiaire entre les deux autres et enfin la mesure « secousse » où l'on secouait le vase pour y mettre un peu plus de grain.

Un problème scientifique consisterait à trouver la formule du comble liant les grains de blé à la taille du vase les renfermant.

Dans les mesures de liquides on peut relever la place ambiguë du setier car il figurait deux fois dans certains systèmes, notamment dans celui de Paris.

Le setier y correspondait à 8 pintes, mais il existait aussi un demi-setier qui était le quart de la pinte, ce qui impliquait un petit setier, d'ailleurs parfois mentionné, équivalent à la demie pinte appelée aussi chopine.

Dans l'actuel département de l'Yonne et dans celui de la Côte d'Or qui ravitaillaient Paris en bois et charbon de bois, les mesures pour le bois de chauffage, non seulement variaient d'une paroisse à l'autre, mais encore dans une paroisse on pouvait rencontrer plusieurs mesures différentes, trois en général, une pour le bois pris sur la coupe, une pour le bois dit « de rivière » au départ pour Paris et enfin la charbonnette pour la fabrication du charbon avec des bûches plus courtes.

A Bourberain (Côte d'Or) pour compliquer un peu plus on distingue les bûches coupées à la scie et celles coupées à la hache dont la longueur n'était pas la même.

Une autre constatation curieuse concerne le sel à Dijon car le minot de sel était un peu plus grand en hiver qu'en été (35 pintes en hiver soit 56,91 litres contre 34 seulement en été, soit 54,91 litres). Une explication est à chercher !

Imprécision

L'imprécision était une autre fâcheuse caractéristique des anciennes mesures. Dans les terriers les indications de la superficie des fonds sont toujours suivies de la mention « ou environ ». De nombreux vaisseaux étaient en bois et devaient s'user assez rapidement. Quant aux poids conservés dans les musées, pourtant en métal, on constate que bien souvent ils ne correspondent pas à leur valeur officielle. Le passage dans les mesures des grains d'indications en poids de la quantité contenue au lieu de la capacité, introduisait une certaine imprécision car le poids des grains variait d'une année à l'autre selon les conditions météorologiques. Monsieur POITRINEAU dans sa thèse sur la *Vie rurale en Basse Auvergne au XVIII^e siècle* se montre particulièrement sévère à l'égard de la mesure des terres qui reposait sur la quantité de blé semé. Il dénonce le caractère subjectif d'un tel procédé. Toutefois un autre auteur qui avait travaillé sur le Poitou soutenait que d'après des expériences concrètes faites dans ce pays la valeur des évaluations était exacte à quelques centièmes près.

Là où on ne suivra pas en tout cas Monsieur POITRINEAU, c'est lorsqu'il attaque le fait, ici reconnu, de faire varier la semence en fonction de la qualité du terrain. En effet les agronomes anciens estimaient, non sans raison, qu'on pouvait semer plus épais en bonne terre qu'en mauvaise. La sèterée était ainsi plus vaste dans la montagne qu'en Limagne. Ce constat n'est pas propre à l'Auvergne. On retrouve le même dans les anciens cadastres des Alpes Maritimes.

GÉOGRAPHIE DES MESURES

Cette remarque qui rapproche deux régions fort éloignées l'une de l'autre,



Tournoël. — Mesure fixe en andésite à deux cavités.

Mesure dont le rapport de 1 à 10 permettait le paiement de la dime

introduit une réflexion sur la répartition de certaines mesures et de certains mesurages dans le territoire français. En effet si dans le détail on constate une grande diversité, il n'en est pas moins possible de dégager des grands ensembles. Il est à noter que sur les cartes présentées les régions de l'Ouest (Bretagne et Normandie) et celles de l'Est (Champagne, Lorraine et Alsace) sont moins bien connues car elles ne sont pas encore couvertes par la collection basée sur les Tables de conversion.

On retiendra deux grands contrastes : un contraste nord / sud apparaît particulièrement à propos des mesures de longueur : cannes contre toises et aussi pour la livre, pdm contre autres livres. Il se retrouve dans d'autres mesures dont les limites précises seraient à tracer : muid divisé en 12 setiers au nord contre muid divisé en 16 setiers au sud, petite lieue au nord contre grande lieue au sud. Ces deux limites étaient, il est vrai, quelque peu estompées en 1789. Ce contraste est évidemment à rapprocher des limites tracées avant la Seconde Guerre Mondiale par divers chercheurs, linguistes, géographes et historiens. L'autre contraste s'établit entre le centre de la France qu'on peut qualifier de « France royale » et la périphérie à laquelle on pourrait étendre le vocable, employé effectivement pour certaines, de « provinces réputées étrangères ». Il renvoie en partie à l'évolution qui a eu lieu jusqu'en 1789.

En revanche la carte du nom de la mesure des terres labourables

lesquelles correspondaient à la technique de mesurage, se révèle complexe même sans intégrer le passage aux mesures normalisées. On peut retenir en gros que les mesures géométriques dominent dans le nord, la région parisienne, la Normandie et s'avancent dans la vallée de la Loire. Elles ont aussi quelque extension à l'extrémité sud-ouest et à l'extrémité nord-est. Les mesures à la semence couvrent une vaste zone depuis le sud-est jusqu'au Berry et au Poitou, prenant en quelque sorte le territoire en oblique et incorporant notamment le Massif Central. Les « journaux » se rencontrent à la périphérie tant à l'est qu'à l'ouest. Il est difficile de rendre compte de cette géographie par un simple contraste nord-sud de civilisation. Une explication reste à chercher.

L'OPINION ET LES ANCIENNES MESURES

Que pensaient les Français d'autrefois de la diversité des mesures ? On peut noter tout d'abord qu'un certain nombre de cahiers de doléances ont réclamé l'unification. Cependant l'opinion dans son ensemble était sans doute plus réservée.

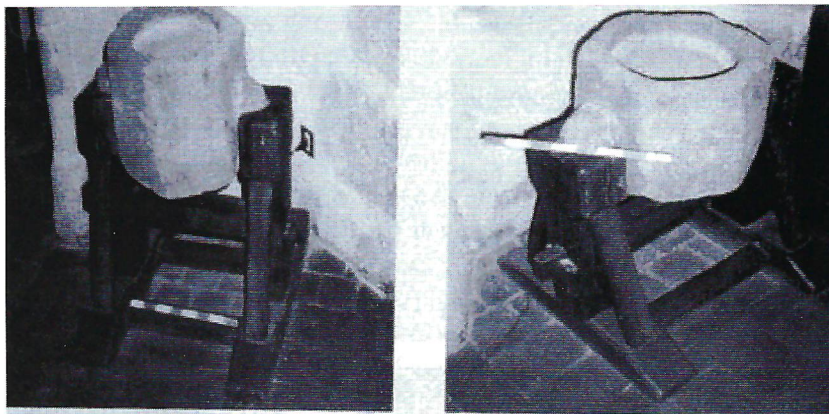
Il est intéressant de voir les points de vue exprimés par les savoyards de Tarentaise dans l'enquête faite par le roi de Piémont en 1826.

En effet celui-ci en despote éclairé songeait à unifier les mesures dans ses états, ce qui sera fait en 1845.

On rappelle que cette province avait connu un temps le système métrique avant de revenir à ses anciennes mesures quand la Savoie avait retrouvé ses maîtres d'avant la Révolution. L'opinion des communes varie. Certaines se prononcent contre le changement car « cela causerait de grands désordres et surtout des frais aux habitants ». D'autres acceptent l'unification, mais autour de leurs propres mesures. Il en est tout de même quelques unes qui préconisent l'unification et l'adoption du système métrique. Ainsi Hauteville tout en déclarant

que « toute innovation causerait un grand désordre », accepte de se rallier au système décimal, car alors « personne ne saurait être dupe dans le commerce ainsi qu'on y est exposé maintenant par tant de variations de poids et de mesures ». En tout cas une majorité se dégage pour que le roi adopte le système métrique, en cas de changement, car il est déjà connu. C'est-à-dire que ce n'est pas la supériorité de ce système qui le fait préférer, mais l'habitude qu'on en a.

On retrouve le poids de l'habitude dans les réponses à une enquête faite en 1791 dans l'intention de substituer le mesurage des grains au poids au mesurage par capacité, enquête dont on a retrouvé quelques réponses faites par des districts dans la France du Centre-Ouest. La monarchie avait d'ailleurs en 1786 prescrit le mesurage au poids, mais il s'était écoulé trop peu de temps pour qu'on puisse juger de l'application de cette décision. Que disent les districts ? Seul celui de Rochefort (Charente-Maritime) est favorable au changement en arguant : « Ce serait un sûr moyen de prévenir les fraudes et les inconvénients qui résultent communément du mesurage puisque l'expérience a démontré que la manière de verser et de raser le grain dans le boisseau peut influer sensiblement sur la contenance ». Mais les trois autres réponses connues sont hostiles. Pour le district de Fontenay-le-Comte (Vendée) : « Le peuple peu éclairé et habitué à se servir de la mesure (sous-entendu de capacité) se déferait difficilement de cet usage qui d'ailleurs offre beaucoup de facilité pour le commerce des marchés ». Sancerre (Cher) justifie son opposition par le manque de balances.



Hérisson. — Château de la Roche Othon.

Possibilité d'évolution mineure - Mesure mobile permettant en pivotant sur un axe central de vider facilement le vaisseau

On voit donc que l'opinion n'était guère propice à un changement radical.

LES AUTORITES ET LES MESURES

En fait les rois de France étaient persuadés de l'avantage qu'aurait représenté l'unification des mesures, notamment d'un point de vue administratif. Déjà, selon une chronique du temps, Philippe V en 1321 proposa à une assemblée des bonnes villes et des bourgeois de Paris, « pour le profit évident de tout le royaume qu'il n'y eut en tout le royaume que une aune et de acheter la monnaie aux prélats et barons », mais il combinait cette offre alléchante avec la demande d'une aide, c'est-à-dire d'un impôt, surtout, grave erreur, d'un montant non précisé. En effet en cet heureux temps il n'existait pas d'impôt permanent. Poliment ils répondirent que « de l'achat des monnaies ils ne se mêlaient ; aussi leur suffisaient leurs aunes ; qu'ils étaient tout prêts à aller en ost avec lui, mais qu'ils ne pouvaient faire nulle aide ». L'affaire en resta là. Les grandes chroniques de France, écrit à caractère officiel, évoquent elles aussi ce projet royal en l'étendant d'ailleurs à l'ensemble des mesures, mais elles préférèrent en rejeter l'échec sur la maladie du roi.

Louis XII au moment de la rédaction de la Coutume d'Auvergne en 1510 avait ordonné que les mesures des grains pour la Basse-Auvergne seraient ramenées à celles de Clermont, celles de la Haute Auvergne à celles de Saint-Flour et

celles du Brivadois à celles de Brioude. Les mesures du vin et de poids seraient celles de Paris. Mais cela resta lettre morte.

François 1^{er} en 1540 prit une ordonnance dans le sens de l'uniformité de l'aunage dans tout le royaume. D'autres suivront pour l'ensemble des mesures, mais elles n'auront pas de portée réelle comme le montre la situation en 1789.

En revanche on peut faire état d'un succès de la monarchie, non dans le sens de l'uniformité, mais dans celui de la simplification quand en 1670 on fit passer le boisseau de Paris du mesurage comble au mesurage ras en incorporant le comble dans le nouveau boisseau.

D'autres autorités ont réussi quelques changements. Ainsi en 1387 le duc de Bourgogne Philippe le Hardi imposa la livre poids de marc dans ses états dont faisait aussi partie la Franche Comté d'où résulte une lacune dans la ceinture que forment les autres livres autour de la pdm (voir carte "autres livres"). De même les Etats de Provence avaient décidé en 1377 d'unifier les mesures de longueur et partant les mesures agraires autour de la valeur de la canne d'Aix et de même les poids autour de la livre d'Aix. Les documents ultérieurs et les Tables de conversion des Bouches-du-Rhône montrent que ces décisions ont été assez bien appliquées.

Dans l'ensemble les anciennes mesures ont donc résisté jusqu'en 1789. Des évolutions peuvent cependant être constatées, mais elles émanent de la pratique et non de décisions autoritaires, ou du moins des autorités locales.

DES EVOLUTIONS

L'évolution des mesures des grains

Pour les historiens ces mesures sont très intéressantes car le pain était alors la base de l'alimentation. Le problème est de savoir si on peut appliquer à des périodes plus anciennes, mais postérieures à la « révolution du muid » les valeurs données par les Tables de conversion. On objectera que ces mesures étaient souvent en pierre, donc pratiquement inaltérables sauf par une décision officielle. Certains auteurs ont mis en avant l'idée d'une augmentation par les seigneurs qui auraient ainsi accru leurs redevances. En fait quand dans une même localité coexistent une mesure seigneuriale dite « du grenier » et une mesure du marché, c'est plus souvent la seconde qui est la plus vaste. En effet une augmentation de la mesure seigneuriale ne pouvait manquer de se heurter aux redevables. Au contraire les mesures commerciales, dans les villes, étaient contrôlées par les autorités urbaines plus ou moins liées aux marchands lesquels avaient semble-t-il intérêt à une augmentation de la taille des mesures. En Côte-d'Or la mesure de l'abbaye de Saint-Seine dont les villageois voisins disaient « on la connaît depuis 400 ans » était au XIV^e siècle dans le rapport de 70% avec la mesure de Dijon. Or elle est tombée à la Révolution à 60% car la mesure de Dijon a grandi.

Le cas de la mesure de Saint-Seine révèle une autre évolution pour les mesures des grains, à savoir la concentration, notamment au XVIII^e siècle, en faveur des principaux marchés. A la Révolution la mesure de Saint-Seine n'était plus employée dans les localités dépendant de l'abbaye et était concurrencée même à Saint-Seine par celle de Dijon.

L'évolution des mesures agraires

On a déjà noté la normalisation en certaines régions des mesures agraires concrètes. Dans le Puy-de-Dôme cependant les Tables de conversion indiquent des sétérées différentes d'un lieu à l'autre. Mais à parcourir les documents notariés on constate que de plus en plus les fonds sont évalués en toises carrées et le cadastre censé indiquer la superficie des anciennes mesures pour faire le



rapport avec « l'arpent métrique » s'en tient à la toise carrée. En Provence avant 1789 le changement est même plus avancé, avec la différence qu'il se fait au profit de la canne carrée.

Le grignotage par les mesures royales.

Une autre évolution liée à l'absolutisme et à la centralisation monarchique, est le fait que certaines mesures, telle la toise royale et la livre pdm ont gagné du terrain au XVIII^e siècle au détriment des mesures locales.

On prendra comme exemple le cas de Clermont. En 1665 à l'occasion de la tenue des Grands Jours, FLÉCHIER qui est en quelque sorte le reporter de cet événement raconte la mésaventure survenue à Madame Talon, mère d'un des magistrats. Elle était indignée du fait que dans ses achats on ne lui donnait qu'une livre de 13 onces au lieu des 16 de la pdm. Elle exagérerait sans doute car la livre locale était normalement de 14 onces ! En réalité à poids égal les marchandises étaient moins chères qu'à Paris, cependant peut-être à la suite de cet incident les Grands Jours prirent une ordonnance pour aligner les mesures de Clermont sur celles de Paris. FLÉCHIER se montre dubitatif au sujet du succès de cette décision et CHABROL, le commentateur de la Coutume à la fin du XVIII^e siècle, considère que « ces règlements sont restés sans exécution et les difficultés ont paru insurmontables ». On peut cependant en douter et admettre que les Tables du Puy-de-Dôme ont eu raison d'indiquer pour les poids du Puy-de-Dôme la livre pdm. On s'appuiera pour cela sur les comptes de la famille Pélissier de Vassel. Y figure en 1762 la mention d'un achat d'un baril d'huile d'olive pesant « 40 livres petit poids » (cette huile venue du midi était comptée selon une livre de 404 g) et le rédacteur ajoute : « j'ai fait

peser l'huile et nous avons en poids de marc 33 livres ». On peut conclure de cette pesée de contrôle qu'à cette époque, un siècle après les Grands Jours, les auvergnats concevaient les marchandises selon le poids de marc. A Brioude dès 1663 on envisageait la confection de deux étalons de poids, l'un suivant la livre locale de 14 onces et l'autre en pdm. Or dans les Tables de conversion de la Haute Loire pour Brioude ne figure que la pdm. La même évolution se constate à Langeac où le subdélégué dans une lettre de 1724 à l'intendant en faveur de l'unité des mesures, signalait que dans sa ville on utilisait deux livres : la pdm pour le pain et la viande et la livre de Montpellier pour les autres denrées. Or là aussi il n'est question dans les Tables que de la pdm.

En revanche dans la partie vellave de la Haute-Loire, moins tournée vers Paris, les livres locales sont seules signalées dans les Tables. De même le Cantal n'a pas encore été pénétré par les mesures royales de longueur et de poids et présente une grande variété de mesures qu'on peut rattacher à son caractère seigneurial.

CONCLUSION

Le XVIII^e siècle avait vu une certaine évolution des esprits en faveur de mesures mieux adaptées tandis que les progrès de la science apportaient une solution au problème métrologique. Il ne faut cependant pas croire que le système métrique balayât comme par enchantement le réseau complexe des anciennes mesures. En fait sa complète application fut reportée à une loi de 1837. Entre temps il s'était produit pas mal de palinodies visant à adoucir les résistances dont un exemple est donné par l'émeute de Langeac en 1834 provoquée par l'obligation faite aux commerçants de se munir d'un double décalitre.

LHC¹ : 0,999999991 fois la vitesse de la lumière



Compte-rendu de la visite SFEN²/ADASTA en juin 2007 au CERN

Par **Claude LANET**

Volcanophile et un des membres fondateurs de l'ADASTA

LE CERN et le LHC

Le nom **CERN** (www.cern.ch/) désigne aujourd'hui « l'Organisation Européenne pour la Recherche Nucléaire ». A l'origine c'était l'acronyme du conseil européen pour la recherche nucléaire un organe provisoire institué en 1952 qui avait pour mandat de créer en Europe une organisation de rang mondial pour la recherche fondamentale. Cet organisme disparut en 1954 à la création de « l'Organisation Européenne pour la Recherche Nucléaire » mais l'acronyme resta usité. C'est le plus grand laboratoire de physique des particules du monde. Des scientifiques du monde entier, dont nos collègues du LPC³ de Clermont-Ferrand, collaborent pour étudier les constituants élémentaires de la matière et les forces qui les relie. Tous ces pays et ces scientifiques construisent le plus grand et le plus puissant des accélérateurs de particules au monde le LHC.

Le **LHC** est en cours d'installation dans un tunnel circulaire de 27 km de circonférence enfoui entre 50 et 150 m sous terre : situé entre les montagnes du Jura en France et le lac Léman en Suisse ce tunnel a été construit dans les années 80 pour le précédent grand accélérateur du CERN, le grand collisionneur électron-positon (LEP).

Le LHC produira des collisions fronta-

les entre deux faisceaux de particules identiques soit des protons soit des ions de plomb. Ces faisceaux seront créés dans la chaîne d'accélérateurs avant d'être injectés dans le LHC.

Ils y circuleront dans un vide comparable à celui de l'espace intersidéral à des vitesses quasiment identiques à la vitesse de la lumière pendant 10 heures parcourant ainsi 10 milliards de kilomètres (distance équivalente à un aller et retour sur la planète Neptune). Plus de 1700 aimants supraconducteurs fonctionnant à des températures (-271,3°) proches du zéro absolu guideront les faisceaux le long des 27 km de l'anneau.

Quatre détecteurs sont greffés sur le circuit :

1. **ALICE** (A Large Ion Collider Experiment) où le voyage vers l'univers primordial.

Les physiciens de la collaboration ALICE utiliseront le nouvel accélérateur LHC du CERN pour recréer en laboratoire les conditions du Big Bang dans l'espoir de percer les mystères de l'organisation de la matière.

La matière dont nous sommes faits ainsi que notre Univers serait née, pense-t-on, pendant les premières microsecondes après le Big Bang d'une soupe de particules élémentaires, un mélange très chaud et très dense de quarks et de gluons appelé le plasma de quarks et de gluons (QGP).

En chauffant cette matière constituée de protons et de neutrons à des températures suffisamment élevées - quelques centaines de milliers de fois la température régnant au cœur du soleil - les physiciens espè-

rent que protons et neutrons vont « fondre » - un processus quelque peu similaire à la liquéfaction de la glace - et libérer leurs constituants élémentaires pour former un tel plasma.

Mille physiciens et ingénieurs, 80 instituts et laboratoires issus de trente pays collaborent à cette expérience.

¹ LHC : Large Hadron Collider

² SFEN : Société Française d'Energie Nucléaire (www.sfen.org/)

³ LPC : Laboratoire de physique corpusculaire, Université Blaise Pascal, IN2P3-CNRS (www.univ.bpclermont.fr/)

2. LHCb¹

Poids du détecteur 4500 tonnes.

Cette expérience est conçue pour élucider le mystère du comportement entre la matière et l'antimatière. La disparité entre les deux n'est peut-être qu'une petite facette d'une nouvelle physique à découvrir.

14 pays, 619 scientifiques, 75 étudiants, 47 universités et laboratoires, 35 entreprises participent à cette expérience.

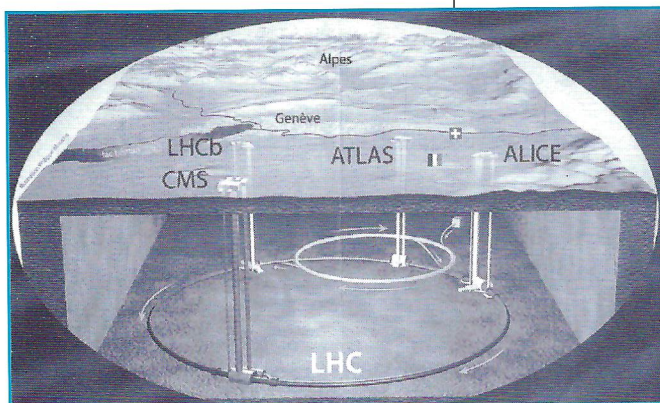
3. CMS²

Poids 12500 tonnes construit en surface en 15 sections assemblées au fond.

C'est un grand détecteur à la pointe de la technologie constitué de nombreuses couches, chacune conçue pour mener à bien une tâche spécifique. Ensemble, elles permettront aux scientifiques du CMS d'identifier et de mesurer avec précision l'énergie et l'impulsion des particules issues des collisions du LHC et de créer localement des conditions similaires à celles qui prévalaient une fraction de milliardième de seconde après le Big Bang. A cette expérience collaborent 37 pays, 155 instituts, 2000 scientifiques dont 450 étudiants.

4. ATLAS

La voûte de cette caverne (53 m de long, 30 m de large et 35 m de hauteur) fut construite en premier



puis ensuite les murs et enfin la dalle du sol. Le détecteur fut descendu par éléments, assemblés au fond. Il fut calé grâce à de nombreux repères géodésiques et tout simplement pour l'horizontalité, par un classique niveau à bulle de 50 m de long, technique vieille comme le monde.

Quatre parties le composent :

- le détecteur interne qui mesure la quantité de mouvement des particules chargées,
- les calorimètres qui mesurent l'énergie emportée par les particules,
- le spectromètre à muons qui identifie et mesure la quantité de mouvement des muons,
- le système d'aimants :
 - solénoïde
 - aimants du Toroïde

qui courbent les trajectoires des particules chargées pour mesurer leur quantité de mouvement.

A noter que le Toroïde servant de bouchon pèse à lui seul 310 tonnes.

Le détecteur ATLAS se propose d'explorer une terre inconnue de la physique expérimentale. La perspective de déceler des phénomènes inattendus est des plus enthousiasmante. La mise en évidence de particules et de processus nouveaux modifierait notre compréhension de la matière et de l'énergie ainsi que des forces qui régissent notre Univers depuis son origine. Le LHC reproduira les conditions dans lesquelles l'univers était quelques fractions de seconde juste après le Big Bang afin de nous aider à comprendre son état actuel.

Le détecteur ATLAS découvrira peut être la particule « Boson de Higgs » et par là expliquera pourquoi les particules fondamentales ont des masses si différentes, comment elles acquièrent leur masse et comment masse et énergie sont reliées.

¹ LHCb (Large Hadron Collider beauty experiment)

² CMS (Compact Muon Solénoïde)



LA VISITE DU GROUPE SFEN/ADASTA

Une cinquantaine de participants, adhérents des associations SFEN et ADASTA entreprirent le déplacement Clermont-Genève pour s'informer de cette magnifique recherche sur l'origine de la création de l'univers. Les participants ont également voulu exprimer toute leur admiration à la communauté de chercheurs pour l'excellence de leurs travaux. Nous avons été accueillis par François Vazeille, Directeur de Recherche du CNRS, responsable de l'équipe ATLAS clermontoise.

La veille il nous a fait l'honneur de nous initier à l'expérience ATLAS au cours d'une conférence intitulée « Au-delà de la quatrième dimension ? » dont voici le résumé ci-dessous :

« Nous vivons « confortablement » dans un espace à trois dimensions, surveillant « attentivement » une horloge qui marque la quatrième dimension ... et accompagne de façon inexorable la durée de notre vie.

La science-fiction, cependant, ne s'embarrasse pas de dimensions supplémentaires cachées de l'espace-temps, ses héros pouvant voyager dans un hyper-espace, attirés parfois irrésistiblement par un méchant trou noir, ou encore franchissant un mur les conduisant dans un Univers parallèle !

Et si la réalité (et non « notre » réalité) était tout autre et allait bien plus loin que la science-fiction ?

Spéculations purement théoriques ou possibilités de vérifications expérimentales ?

L'expérience ATLAS du CERN, à Genève, est l'approche expérimentale la plus prometteuse pour valider ou non la théorie physique la plus élaborée qui réconcilie le monde de l'infiniment grand et le monde de l'infiniment petit, allant ainsi bien plus loin que le rêve d'Einstein en unifiant toutes les forces de la nature.

Rien ne nous interdit donc de rêver, d'autant plus que la science pourra peut-être bientôt faire pâlir la science-fiction ! »

Le lendemain matin, pour faciliter la visite, les organisateurs nous divisèrent en deux groupes pour passer en alternance aux différents sites :

La visite d'ATLAS commençait par la descente dans la caverne artificielle contenant le détecteur. Le groupe sous la conduite de nos guides - Monsieur Gillies et Monsieur Vazeille - s'arrêtait au niveau -80 m ce qui permettait aux visiteurs de surplomber, depuis une passerelle, le gigantesque détecteur (46 m de longueur, 25 m de hauteur, 22 m de diamètre) en cours d'assemblage.

Pendant ce temps l'autre groupe visitait le « MICROCOSM », musée de la physique des particules dans l'enceinte du CERN sous la conduite de Monsieur Van den Broeck. Il s'agit d'un musée très complet couvrant une large gamme de sujets de physique des particules ainsi que de l'histoire du CERN. Ils y trouvèrent :

- des explications sur les buts du CERN et la recherche en physique des particules en général
- une maquette à manipuler de l'expérience d'Ernest Rutherford, dite de la feuille d'or concernant le rayonnement alpha
- un détecteur de rayon cosmique
- une maquette du futur Grand Collisionneur Hadronique qui sera mis en service en 2008
- maquettes et explications sur les expériences présentes et avenir du CERN
- appareillages d'anciennes expériences, incluant une portion importante du détecteur UA1 qui permit la découverte des Bosons W et Z et valut un prix Nobel à Carlo Rubia et Simon van der Meer en 1984
- l'étonnante histoire de l'informatique au CERN :

- ordinateur central géant,
- premières disquettes,
- invention du web

L'après-midi les deux groupes visitèrent le CMS mais n'aperçurent qu'une partie du détecteur en préparation de descente dans sa caverne.

La mise en service du LHC qui, prévue pour novembre 2007, est reportée en mai 2008. En attendant les chercheurs testent leurs équipements en utilisant un accélérateur de particules naturel : « l'espace » tandis que d'autres utilisent les accélérateurs mentionnés dans le schéma ci-dessous :

Nous remercions les organisateurs de la SFEN, du CERN et du LPC pour la magnifique journée scientifique qu'ils nous ont fait vivre, pleine d'enrichissement et nous donne une envie : y revenir lorsque l'expérience ATLAS sera dans sa phase opérationnelle.

Accélérateurs

- SPSsupersynchrotron à protons de 450 GeV, 6,9 km de circonférence
- PSsynchrotron à protons de 28 GeV
- ISOLDEinjecteur + séparateur d'isotope ISOLDE
- ADdécélérateur d'antiprotons de 100 MeV/c

Expériences en cours ou en préparation :

- LEP4 en cours d'analyse des données
- SPS3 en cours - 2 en préparation
- PS4 en cours - 5 en cours d'analyse des données
- AD3 en cours - 1 en cours d'analyse des données - 1 en préparation
- ISOLDE61 en cours - 3 en préparation
- R&D3 en cours

Source : documentation CERN 2006

Fête de la science 2007

Interventions de l'ADASTA (Mmes Suzanne Gély et Claudie Bally) aux Collèges **Albert Camus** (Clermont) et **Irène et Frédéric Joliot-Curie** (Aubière)



Ces deux collèges sont partenaires de l'ADASTA depuis de nombreuses années :

Le Collège Albert Camus louait notre planétarium chaque année vers les années 1997.

En 2000, avec le soutien de Mme Sarry, professeur au Collège, nous avons organisé, avec Paul Louis Hennequin la fête de la Science sur le thème « *mesurer la Terre* » avec des relevés dans la cour.

Le Collège d'Aubière avait participé au *Centenaire de la Découverte de la Radioactivité naturelle*. En 1997, Hélène Langevin était venue au Collège, puis son frère Pierre Joliot-Curie en 1999 (ils sont tous deux les enfants d'Irène Curie, donc les petits-enfants de Pierre et Marie Curie). En 2001, ce Collège, sous le patronage de l'ADASTA avait participé à Expo Sciences. Il avait remporté un prix qui a permis à la classe d'aller au Palais de la Découverte à Paris (le professeur Aline Rome et moi-même avons accompagné les élèves.)

Pour la Fête de la Science 2007, le thème était « l'espace » : car on fête le 50^e anniversaire du lancement du premier satellite « le SPOUTNIK » qui a eu lieu le 4 octobre 1957 en Russie. L'ADASTA a le privilège de posséder deux expositions « *l'Espace ? à quoi ça sert* » que Roland Jouanisson avait pu se procurer au Palais de la Découverte. J'ai proposé ces expositions à chacun des collèges.

De suite, je fus très bien accueillie, et ils ont accepté de les exposer.

Le moment était venu de les mettre

en valeur au nom de l'ADASTA.

Mardi 9 octobre 2007, Mme Fagalde, censeur du Collège Albert Camus, rue du Torpilleur Sirocco nous a accueillies, à 10 h, dans le hall d'entrée du collège. L'exposition était déjà installée. Deux classes de cinquième (environ 48 élèves) ont écouté mes commentaires sur les panneaux exposés (satellites, étude moderne de la météorologie, la Lune, le GPS, le réchauffement climatique, l'avenir de la planète, le voyage.....futur sur Mars). Les deux enseignants présents s'efforçaient de maintenir la discipline parmi ces enfants. Très peu d'élèves étaient au courant de l'actualité du 50^e anniversaire du Soutnik, mais ils ont posé un tas de questions....

Expérience « sur l'effet de serre » dans les deux établissements :



Deux thermomètres identiques sont placés sur un papier noir, dans une cuvette rectangulaire peu profonde. L'un des thermomètres est coiffé par une barquette en plastique transparent.

A « Albert Camus », bien que le soleil ait été un peu tamisé par de la brume, les élèves ont pu constater, au bout d'une heure, une élévation de 2°, pour le thermomètre coiffé par la barquette en plastique. Je leur ai expliqué que cette barquette avait le



même effet que la couche gazeuse, qui autour de la Terre, est responsable du réchauffement climatique. Ils sont partis, je crois, convaincus. A « Irène et Frédéric Joliot Curie », même expérience avec les deux thermomètres. Malgré un ciel voilé, ils ont également pu constater une augmentation de température pour le thermomètre sous la barquette.

Jeudi 11 octobre 2007 : Dès 8h30 Mme Argillier, censeur du Collège d'Aubière, nous accueillait. Il y avait, ici, deux classes d'élèves de troisième, encadrés par deux enseignants dont M. Baès qui était déjà en poste il y a 10 ans lors de la venue de Hélène Langevin. Ces élèves étaient plus mûrs, plus motivés. Les questions étaient différentes, par exemple : qu'est ce qu'une année-lumière ? questions sur la Lune, sur Mars. Le temps a passé trop vite, les enseignants étaient heureux de cette ouverture des enfants sur des sujets planétaires.

*Missions accomplies par Suzanne Gély
Clermont, le 12 octobre 2007*



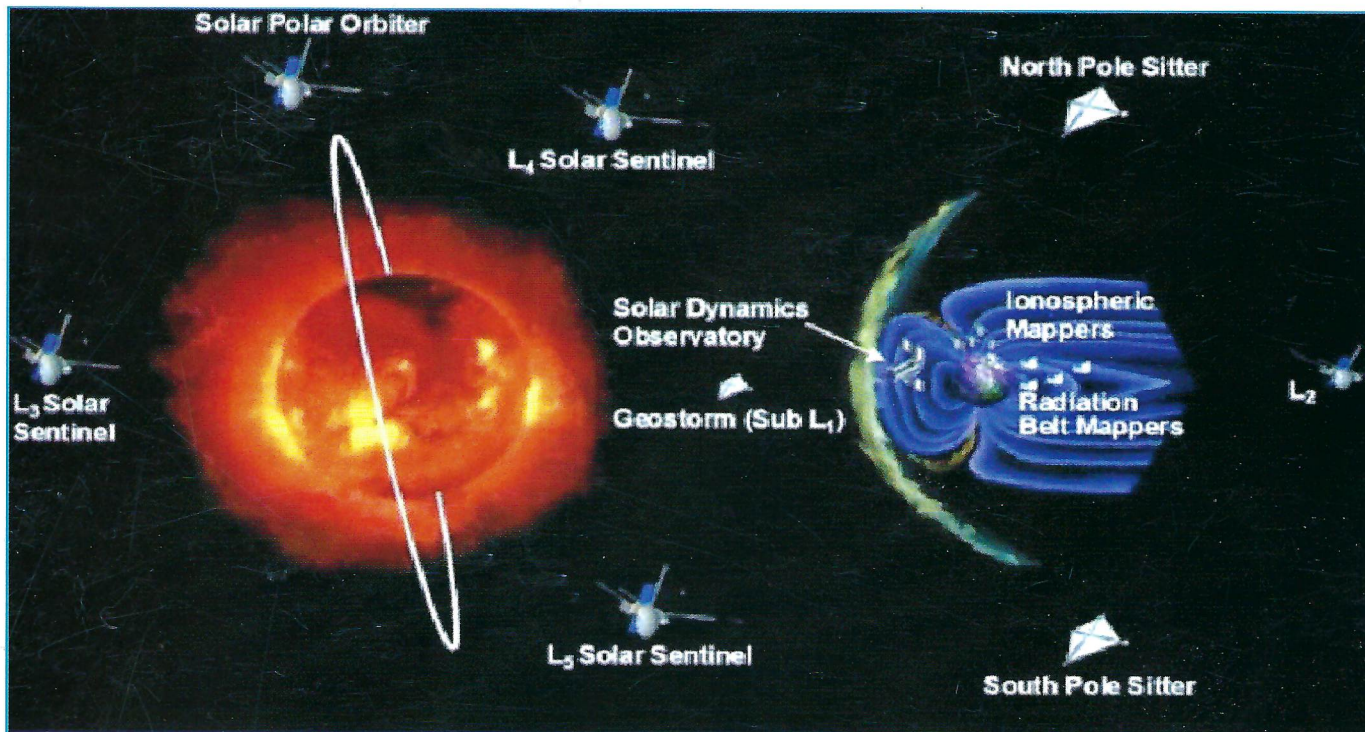


Figure 8 : aperçu du projet « Living with a star » (Source : NASA) article page 19



Groupe SFEN/ADASTA en visite au CERN (article page 33)

Adhésions et Abonnements

Adhésions à titre individuel.....30€

Adhésions à titre collectif.....80€

L'adhésion donne droit à la revue Auvergne-Sciences, à des réductions sur les locations et les achats, à des invitations aux conférences et aux visites d'entreprises (une participation aux frais peut être demandée lors de certaines visites).

Permanences - elles sont assurées par les bénévoles :

du Lundi au Jeudi de 8h à 12h et de 14h à 17h et le Vendredi de 8h à 12h (*juillet et août inclus*)

En cas d'absence laisser message sur répondeur ou envoyer fax ou E-mail.

Adresser le courrier : **ADASTA, Centre Riche-Lieu - 13, rue Richelieu - 63400 Chamalières**

Siège social - 10, rue de Bien-Assis - 63000 Clermont-Ferrand

Tél. 04 73 92 12 24 - Fax 04 73 92 11 04 - E-mail : adasta@wanadoo.fr - Site internet : <http://perso.wanadoo.fr/adasta>

Dépôt légal Décembre 2007 - N° ISSN - 1166-5904