AUVERGNE SCIENCES

BULLETIN DE L'ADASTA

Décembre 95

N° 35-36

Le cinéma avant le cinéma

La constellation GPS

ASSOCIATION POUR LE **D**ÉVELOPPEMENT DE L'**A**NIMATION **S**CIENTIFIQUE ET **T**ECHNIQUE EN **A**UVERGNE

SOMMAIRE

N° 35-36

- Le cinéma avant le cinéma ..... p. 3
  M. Henry

- La constellation GPS ..... p. 15
  P. Bacchus

Informations régionales :
- Les manuscrits scientifiques au fil du temps et du hasard ..... p. 26
- Michelin : un siècle d'innovation .. p. 27
- Université d'été ..... p. 27
- Le règne minéral : nouvelle revue scientifique ..... p. 28
- L'aventure du saumon .. p. 28

L'ADASTA reçoit le soutien financier :
- du Conseil Régional d'Auvergne
- du Conseil Général du Puy-de-Dôme
- du Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche.

AUVERGNE-SCIENCES
Publication trimestrielle
19, rue de Bien-Assis
63100 CLERMONT-FERRAND
Directeur de la Publication
Roger VESSIERE
Rédaction :
Roland JOUANISSON
N° ISSN 1166-5904

Photo de couverture :
Le praxinoscope d'Emile Reynaud peut être considéré comme l'ancêtre du cinéma. (Document communiqué par M. Amprimoz, conservateur du Musée Crozatier du Puy-en-Velay)

REIX Clermont-Ferrand

Dépôt légal NOVEMBRE 1995
N° Imprimeur 1948

EDITORIAL

La prévision, en matière scientifique et technique, est aussi hasardeuse qu'en d'autres domaines. Qui pouvait prévoir, il y a un siècle, le rôle que joueraient les ordinateurs dans notre société actuelle ? Qui peut se risquer à prévoir ce que sera notre vie quotidienne dans seulement 30 ans ?

Les extrapolations optimistes des prévisionnistes sont souvent déçues : les voyages interplanétaires ne sont pas encore à la portée de tous, toutes les maladies ne sont pas vaincues et le remède contre le chômage n'est pas encore découvert...

A défaut d'être en mesure de faire des prévisions, comme nombreux sont tentés de le faire en cette fin de siècle, on peut se contenter de bilans et analyser l'évolution des techniques au cours d'une période significative. C'est ainsi que dans ce numéro vous trouverez un article très documenté de notre ami Michel Henry sur les technologies qui ont précédé la naissance du cinéma, en 1895, il y a tout juste un siècle.

En regard de cet article d'histoire des techniques, vous pourrez lire un article sur une méthode moderne de repérage par satellite. M. Bacchus, astrophysicien bien connu, a fait pour nous le point sur le "système GPS" (Global Positionning System), créé en 1973 par l'armée américaine et qui permettra, par exemple, dans un avenir très proche, de repérer la position d'un avion ou d'une automobile à quelques mètres près !

Dans ce numéro double vous trouverez également quelques informations régionales. Quant aux activités pédagogiques de l'ADASTA, elles sont décrites dans notre "supplément pédagogique", conçu pour les enseignants, mais peut être envoyé à tous ceux qui en feront la demande.

R.J.

Adhésions et Abonnements

Adhésions à titre individuel	150 F
Adhésions à titre collectif	500 F
Membre bienfaiteur	1 000 F

L'adhésion donne droit au service gratuit du bulletin et à des réductions sur les différents services rendus par l'Association (publications, stages, visites,...)
Adressez le courrier à **ADASTA, 19, rue de Bien-Assis - 63100 Clermont-Ferrand**
Tél. 73 92 12 24 - Fax 73 92 11 04

Le cinéma avant le cinéma

Par Michel HENRY

INTRODUCTION

Si loin que nous remontions dans l'histoire de l'humanité, nous trouvons mention d'images - au sens large du terme - animées, fabriquées dans le but avoué de frapper l'imagination des foules. Parallèlement aux efforts des peintres et sculpteurs, d'autres créateurs : mages, magiciens, thaumaturges, astrologues et autres charlatans mettent à profit - à leur profit je veux dire - les ressources d'une technologie encore balbutiante pour créer de toutes pièces dieux et démons. Avoir accès à ce que les autres ne peuvent concevoir qu'à grand peine, mieux encore le leur faire voir, quel fascinant et terrifiant pouvoir !

Qui donc s'avisa qu'un miroir concave peut former sur un écran de tissu ou de fumée une image agrandie ? Qui donc, plus tard, se rendit compte que les lentilles jusqu'alors réservées aux besicles conduisent à de meilleures projections que les miroirs ? Nous devons dans tous les cas avouer notre ignorance.

De ces essais et bricolages est née la lanterne magique. Du XVe siècle, et peut-être même plus tôt, jusqu'au début du XXe siècle, elle constitue la récréation majeure des grands et des petits. A côté des «vues fixes», nous dirions aujourd'hui des diapositives, qui forment le fonds majeur des spectacles, apparaissent dès le XVIIe siècle des «vues animées», d'abord rudimentaires puis de plus en plus élaborées.

Le XIXe siècle, sous l'impulsion des savants, verra naître une nouvelle forme d'animation, par succession rapide d'images fixes, qui trouvera son point d'orgue et aussi son chant du cygne dans le théâtre optique d'Emile Reynaud. C'est qu'en effet un autre larron était né qui allait rapidement rafler toutes les mises : la photographie. Apportant un inimitable parfum de réalisme et une commodité inégalée, elle a abattu les atouts maîtres qui ont assuré la suprématie de l'«enfant du siècle», le cinématographe.

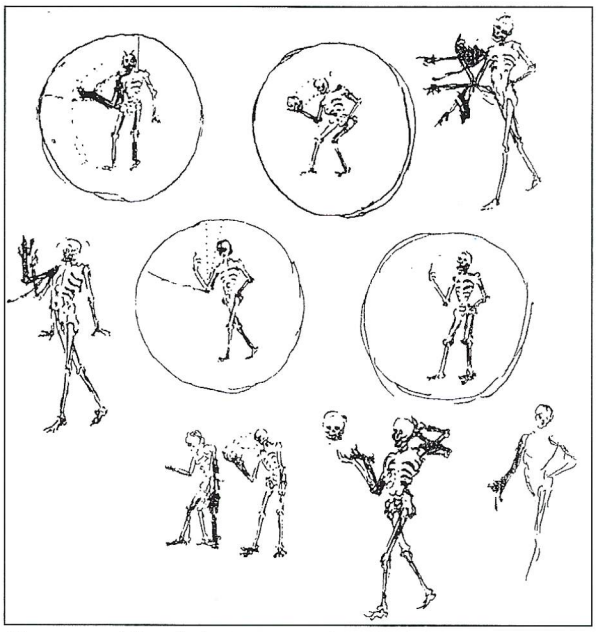
Un autre phénomène caractérise cette histoire : l'interaction constante entre les savants, comme Plateau ou Marey, les industriels ou commerçants comme Pathé ou Gaumont et aussi les forains qui voient dans les nouveaux appareils une source de nouveaux spectacles et donc de nouveaux profits. Et il est vrai que le cinématographe des frères Lumière, comme le phénakistiscope de Plateau, le praxinoscope de Reynaud ou le kinétoscope d'Edison rembourseront au centuple la mise initiale de leurs inventeurs. Est-il besoin de préciser que c'est encore de nos jours l'aspect primordial du cinéma ?

Si les premiers appareils d'animation, du plus simple le thaumatrope, au plus élaboré le praxinoscope, ont connu tout au long du XIXe siècle un incroyable succès, ils ont de nos jours pratiquement disparu des rayons et des catalogues des marchands de jouets. De loin en loin, un fabricant de «gadgets» fait brièvement revivre l'un ou l'autre, ou encore un ouvrage de «bricolage scientifique» pour enfants décrit rapidement leur réalisation...

Terme suivant d'une évolution dont nous ne voyons pas encore l'issue, ou retour de balancier en faveur des gravures, les augures des technologies de pointe prophétisent le remplacement du cinéma par des «spectacles virtuels» dessinés à grand renfort d'ordinateurs. Sauront-ils provoquer chez les générations futures le même émerveillement que «L'arroseur arrosé» ? Espérons-le pour elles.

II - LES PLAQUES ANIMEES DE LA LANTERNE MAGIQUE

Les premiers spectacles de lanterne magique étaient limités à la projection de «vues fixes», paysages ou plus communément personnages comiques ou effrayants : il semble que les démons et fantômes y aient joué un grand rôle. Très rapidement, ces spectacles furent enrichis par l'introduc-



Plaques mobiles de lanterne magique dessinées par Huyghens.

tion d'animations, d'abord assez rudimentaires, puis de plus en plus élaborées. Le plus ancien schéma connu est dû à Huyghens, mais rien ne prouve qu'il en soit l'inventeur.
Les premières animations sont réduites au strict minimum : une plaque fixe représente un paysage, une seconde plaque, mobile elle, glissant devant la première figure un personnage, ou un navire ou encore un animal. Grâce au mouvement de la seconde plaque, le navire flotte, le personnage se promène, l'animal marche ou court ... Dans un registre différent, le même système permet de faire apparaître un ange, ou bien un démon, de faire sortir un cadavre de son cercueil, et toutes les variantes que le lecteur imaginera sans peine.

A peine plus compliquée, l'oscillation de la plaque mobile permet de nouveaux effets : le bateau est pris dans une effroyable tempête qui s'apaise fort heureusement avant le naufrage ou encore un enfant jongle avec un ballon. Une variante consiste à faire coulisser une paroi opaque démasquant deux aspects d'une scène. Ainsi, une fillette saute à la corde.
Très appréciée aussi, la possibilité d'animer une partie d'un personnage par rotation autour de l'articulation ad hoc : un monsieur très poli soulève son chapeau, un chien aboie, une mégère clabaude avec ses voisines.
Des dispositifs plus sophistiqués permettent des rotations complètes. Pour ne pas détruire l'illusion, la plaque mobile, taillée en cercle est fixée dans une couronne mobile elle-même mise en mouvement par une courroie ou un engrenage. Les ailes du moulin, les roues du carrosse, tournent. Font partie de cette variété toute une famille de rosaces colorées dites «chromatropes». La plaque fixe et la plaque mobile portent chacune une rosace colorée. La rotation de l'une par rapport à l'autre produit un effet très esthétique et probablement très apprécié.

Certaines de ces plaques, comportant plusieurs mouvements commandés par autant de tirettes et de manivelles exigeaient de la part du présentateur une réelle habileté, d'autant qu'il effectuait en plus le commentaire et le bruitage sonore adaptés.

Au XVIIIe siècle, la plupart des physiciens, y compris les plus en renom comme l'abbé Nollet, Musschenbroek, Hooper... décrivent à l'envi la réalisation de telles plaques. Bien entendu, les artistes comme Robertson en sont largement munis. Au siècle suivant, tous les catalogues de fabricants en proposent une très grande variété, soit à la pièce, soit par séries, en coffrets.
Sans doute trop fragiles, ces plaques ont de nos jours pratiquement disparu. Seules quelques unes subsistent dans des collections privées ou des musées.
Premières tentatives, bien timides, de création d'images animées, les plaques de lanterne magique ne font que montrer de véritables mouvements. La restitution du mouvement par projection d'une succession de vues fixes viendra plus tard, introduite par de très sérieuses recherches scientifiques.

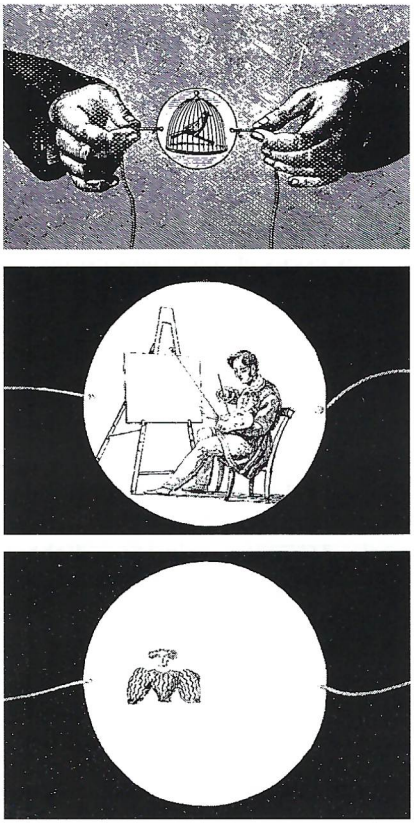
III - CHERCHEURS ET SAVANTS A L'OUVRAGE

La persistance des impressions lumineuses.

La persistance des impressions lumineuses, ou maintien de la sensation lumineuse après que l'excitation ait disparu, est connue depuis la plus haute antiquité. Aristote (Sur les Songes) et Lucrèce (De Natura Rerum), entre autres, constatent son existence et proposent les premières explications, à la mesure de leurs moyens. Au fil des siècles, Guillaume de Saint Cloud (1285), Léonard de Vinci, Newton et bien d'autres s'intéressent aussi à la question, par exemple à l'occasion de l'observation des éclipses de Soleil.
Toutefois, la mesure de la durée de persistance n'aura lieu qu'au XVIIIe siècle. Reprenant une observation déjà formulée par Léonard de Vinci : « ... si tu agites un tison enflammé, le cercle que tu lui feras tracer semblera un anneau de feu.», Patrice d'Arcy imagine en 1765 toute une machinerie pour effectuer des mesures à peu près fiables. Un charbon ardent est fixé à la périphérie d'une roue qu'un mécanisme de poids et de volants met en rotation uniforme. En raison de la persistance des impressions lumineuses, la braise semble décrire un arc de cercle, d'autant plus grand que la vitesse de rotation est plus importante. Quand la durée d'un tour est égale à celle de la persistance de la sensation lumineuse, la trace décrit un tour complet. A la suite de nombreuses expériences, d'Arcy aboutit à la valeur de 8 tierces, à peu près 130 ms.

Le thaumatrope.

La persistance des impressions lumineuses sera illustrée et vulgarisée par un petit instrument inventé en 1825, le thaumatrope. D'après Babbage, l'un des pionniers de l'informatique, le thaumatrope aurait été imaginé par l'astronome Herschel :
«Un jour, Herschel, assis avec moi après le dîner,[...] me demanda soudain si je pouvais lui montrer deux faces d'un schilling au même moment. [...]. Alors, faisant tourner mon schilling sur la table, il me montra son moyen pour voir les deux côtés en même temps. Le lendemain, j'ai mentionné l'anecdote à feu le docteur Fitton, qui quelques jours



Modèles de thaumatrope

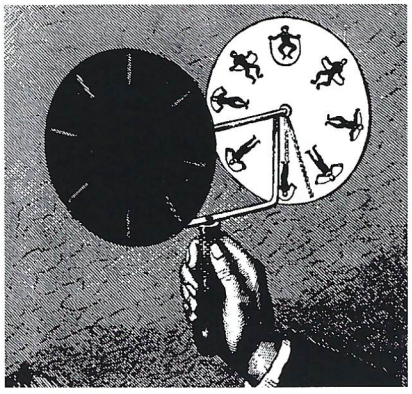
plus tard m'apporta une belle illustration de ce principe. Cela consistait en un disque de carton accroché entre deux morceaux de soie à coudre. Ces fils étaient tenus entre le pouce et l'index de chaque main ; on les faisait alors tourner rapidement, et naturellement le disque de carton tournait aussi. D'un côté du disque de carton était peint un oiseau, de l'autre côté une cage vide. Si l'on tournait les fils rapidement, l'oiseau semblait être entré dans la cage. Cela fut montré au docteur Wollaston [...], et à nombre de nos amis, et au bout de peu de temps on l'oublia. [...]. Quelques mois plus tard, [...] j'entendis [...] parler d'un merveilleuse invention du docteur Paris.[...] Suspectant qu'elle pouvait avoir un lien avec notre jouet sans nom, [...] j'acquis pour 7 schillings et 6 pence un thaumatrope. «

Signalons toutefois que Brewster, repris par Julia de Fontenelle, attribue directement la paternité du thaumatrope au docteur Paris. Une grande variété de disques de thaumatrope sera immédiatement imprimée et les libraires et marchands de jouets le commercialiseront jusqu'au début du siècle suivant. Il passera ensuite dans les ouvrages de physique amusante comme celui de G. B. de Savigny(1), vers 1905, (mais Tom Tit n'en fait pas mention) puis comme la plupart des autres appareils dans les recueils de «bricolage scientifique» pour enfants.

Phénakistiscope, zootrope et compagnie.

Les choses en sont là lorsqu'une note du Quarterley Journal of Science du 1er décembre 1820 signale une curieuse illusion d'optique : les rayons d'une roue de charrette se déplaçant derrière une palissade présentent à l'œil une série de courbes immobiles (2) . L'explication est fournie en 1824 par Roget, qui l'attribue à la persistance des impressions lumineuses. L'article de Roget va immédiatement susciter de nouvelles recherches, dont celles du physicien belge Joseph Plateau qui leur consacre sa Thèse de Doctorat. Plateau reprend, avec des moyens plus élaborés, la méthode de d'Arcy, une braise fixée à la périphérie d'un disque en rotation et introduit quelques variantes, comme des taches colorées peintes au bord d'un disque. Il aboutit à la conclusion que la sensation lumineuse disparaît progressivement et que sa durée est de l'ordre de 300 ms, soit à peu près le double du chiffre avancé par d'Arcy. Poursuivant ses travaux dans la ligne de la théorie de Roget, il va mettre au point toute une série de dispositifs, dont deux seront commercialisés : l'anorthoscope et le phénakistiscope. Mais laissons la parole à Plateau lui-même :

«J'ai donné ensuite le moyen de faire servir la persistance des impressions à produire un nouveau genre d'anamorphoses en faisant tourner rapidement et l'un derrière l'autre, avec des vitesses dans un rapport déterminé, deux disques dont l'un, celui de derrière, porte une figure difforme vivement éclairée, et dont l'autre est percé d'une fente étroite. J'ai fait voir comment on pouvait faire naître de cette manière, au moyen de figures très difformes, des images régulières quelconques [...] qui semblent parfaitement immobiles.»

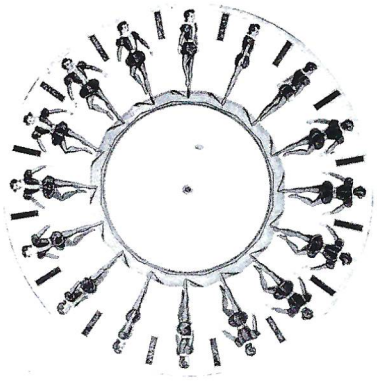


C'est là l'origine de l'anorthoscope, commercialisé en 1836 par les frères Susse, des bimbelotiers de Paris, mais qui, semble-t-il, n'aura qu'un succès d'estime...

En 1830, Faraday avait présenté à la Royal Institution, l'équivalent anglais de notre Académie des Sciences, une nouvelle expérience destinée à illustrer et à étudier la persistance des impressions lumineuses. Il s'agissait simplement d'une roue dentée observée à travers une seconde roue identique à la première. Malgré le mouvement de rotation rapide des deux roues, les fentes paraissent immobiles. L'année suivante, Faraday imagine de supprimer l'une des roues et de regarder l'image de l'autre dans un miroir, à travers les fentes séparant les dents. A nouveau, l'illusion d'immobilité est parfaite.

Sans doute lassé de voir des fentes, Plateau dessine un personnage entre les fentes du disque de Faraday. L'image dans le miroir paraît encore immobile. Il n'y a rien de nouveau, mais l'expérience est nettement plus attrayante ... Puis, à la fin de 1832, il imagine de représenter par chaque image une phase d'un mouvement simple : pirouette, saut à la corde etc. Miracle, le personnage s'anime!

«L'appareil consiste essentiellement, comme on sait, en un disque de carton percé, vers la circonférence, d'une série d'ouvertures étroites, et sur lequel sont peintes de petites figures qui, lorsqu'on fait tourner le disque vis à vis d'un miroir, en regardant d'un œil son image à travers les ouvertures, semblent s'animer et exécuter différents mouvements. »



Phénakistiscope et son disque

Plateau fait exécuter début 1833, par un ami peintre de Bruxelles, plusieurs disques pour son appareil, qu'il offrira à Quételet, son directeur de recherches, puis à Faraday. Dès l'été 1833, Ackermann, un imprimeur anglais et Giroux, un imprimeur parisien, commercialisent l'appareil de Plateau, le premier sous le nom de fantascope, le second sous celui de

---

(1) Les Amusements de la Science s.d. (ca 1905) Paris Librairie des Publications Populaires

(2) Ce problème, qui est aussi un exercice «taupinesque» exemplaire est traité en détail dans l'ouvrage de Bouasse *Vision et reproduction des formes et des couleurs* 1917 Paris Delagrave.

phénakistiscope qu'il conservera jusqu'à nos jours. Plateau n'a sans doute pas profité financièrement de cette commercialisation, mais ne s'en est jamais soucié :

«Je suis étranger à l'exécution du phénakistiscope, mais on a fait à Londres, d'après mes dessins et mes indications, un instrument beaucoup plus parfait, qui a porté le nom de phantasmascope, et qui se vend maintenant sous le nom de fantascope. »

Le phénakistiscope aura immédiatement un immense succès, comme le montre une gravure de Gavarni publiée en 1834, et sera vendu jusqu'en 1910.

En même temps que Plateau, et indépendamment de lui, Stampfer, un professeur autrichien de Vienne, réussit lui aussi en décembre 1832 à réaliser des disques reconstituant le mouvement et les nomme «stroboscopische scheiben» (disques stroboscopiques). A l'inverse de Plateau, Stampfer prendra dès 1833 un brevet et s'attachera à la commercialisation de son invention. G.B. de Savigny en décrit un modèle simplifié qu'il baptise curieusement stroboscope.

L'année suivante, Horner, un anglais, décrit une variante du phénakistiscope, le «dédaleum», dont les images sont dessinées sur une bande de papier. La bande est ensuite placée à l'intérieur d'un cylindre dont la paroi est percée de fentes régulièrement réparties. Le cylindre est mis en rotation sur son axe et les images observées à travers les fentes. L'appareil ne sera commercialisé qu'en 1867 sous le nom de «zoétrope» et passera à la postérité sous celui de «zootrope».

Une variante plus rudimentaire, le folioscope, est brevetée en 1868. Les images sont imprimées séparément sur des feuilles, puis celles-ci sont reliées en un carnet que l'on feuillette avec le pouce pour recréer l'animation. Ce dispositif simple est encore utilisé de temps en temps par des auteurs, les images étant imprimées dans la marge du livre, à côté du texte. Ainsi Max Born pour son ouvrage de vulgarisation de la théorie atomique «The Restless Universe».

Une fois obtenue la restitution du mouvement, deux problèmes resteront à résoudre : adapter l'appareil à la lanterne magique, alors au faîte de sa gloire, pour transformer l'observation individuelle en un spectacle collectif, et remplacer les dessins par des photographies pour apporter enfin l'inimitable réalisme qui fera tout le succès du cinéma.

Avant d'étudier ces deux points, nous allons décrire le dernier avatar du phénakistiscope, qui sera aussi son chant du cygne, le praxinoscope d'Emile Reynaud.

IV - EMILE REYNAUD ET LE THEATRE OPTIQUE

Le phénakistiscope, comme le zootrope, présentent deux inconvénients majeurs. L'observation à travers les fentes rend l'appareil très peu lumineux et le faible nombre d'images, une dizaine, limite la durée du spectacle, ce qui lasse vite le spectateur.

Emile Reynaud résoudra successivement ces deux problèmes, le premier dans le praxinoscope, le second dans le théâtre optique.

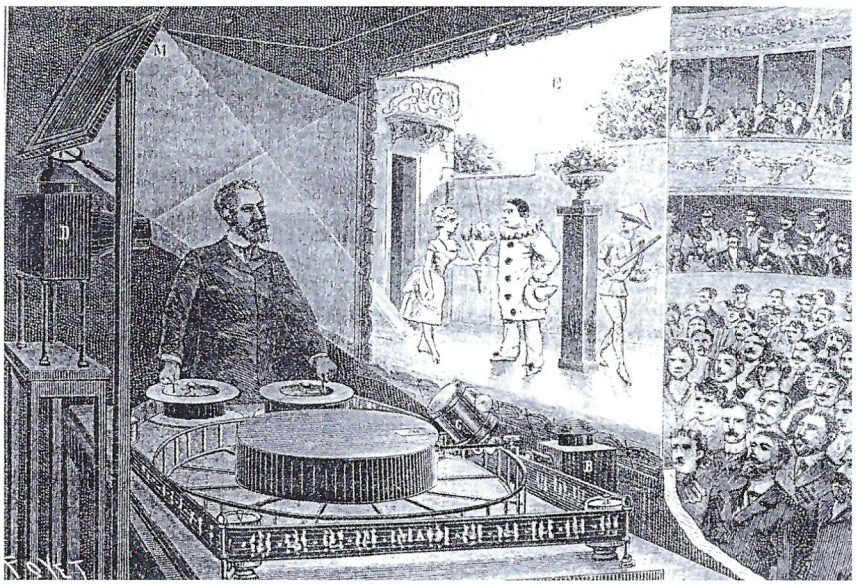
Emile Reynaud, né en 1844 près de Paris, est très tôt placé comme apprenti puis engagé comme ouvrier chez divers fabricants de mécanique et d'optique de précision. En 1864, il assiste à l'un des «Cours publics de science vulgarisée» que l'abbé Moigno tente de maintenir malgré l'opposition du ministère de l'Instruction Publique de Napoléon III. L'atout maître de l'abbé est la lanterne magique grâce à laquelle il illustre ses conférences de vulgarisation.

«L'enseignement [...] est essentiellement élémentaire, de manière à être compris de tous et à éclairer toutes les intelligences. Il procède par une série d'expériences brillantes et grandioses qui reproduisent les phénomènes dans toute leur splendeur et frappent l'imagination. Chaque cours est résumé et figuré dans un nombre plus ou moins grand de tableaux sur verre transparent que l'on éclaire par la lumière électrique [l'éclairage de Drummond NdA] et qui sont énormément agrandis sur une toile immense»

Fasciné, Reynaud revient et se lie d'amitié avec l'abbé qui lui apprend toutes les ficelles du métier de projectionniste : réglage des éclairages, «dissolving views» (nous dirions fondu enchaîné), réalisation des plaques, etc... L'année suivante son père meurt. Reynaud s'installe alors au Puy en Velay chez son oncle. A partir de 1873, il y organise à l'Hôtel de Ville des cours publics de vulgarisation scientifique, sur le modèle de ceux de l'abbé Moigno, avec beaucoup de succès.

«[...] le jeune professeur, M. Reynaud, a pendant près d'une heure et quart, captivé l'attention de l'auditoire composé des jeunes élèves des cours industriels et de beaucoup de dames et de demoiselles de la ville. »

En 1876, il construit, pour amuser l'un de ses aides, Pierre Tixier, alors âgé d'une dizaine d'années, une variante du phénakistiscope. Peut-être



Théâtre optique d'Emile Reynaud (d'après la nature 1892).

guidé par les travaux de Foucault, il imagine de remplacer la série de fentes par une couronne de miroirs plans répartis sur la périphérie d'un cylindre. Les images, en nombre égal à celui des miroirs, sont réparties sur une bande analogue à celle d'un zootrope et la bande est placée dans un cylindre concentrique au premier. La substitution d'une image à la suivante est assurée par le changement de miroir, ce qui assure une luminosité et des couleurs remarquables.

Reynaud prend en 1877 un brevet pour son appareil et revient s'établir à Paris pour en assurer la fabrication et la commercialisation. Il s'agit de profiter d'un événement exceptionnel, l'Exposition Universelle de 1878. Reynaud y présente son appareil dans la section bimbeloterie, à côté des lanternes magiques de la maison Lapierre et de toute une collection d'appareils dérivés du thaumatrope et du phénakistiscope. Le rapport de la responsable de la section est très élogieux et Reynaud obtient une «mention honorable» puis, l'année suivante, une médaille d'argent à l'Exposition Industrielle de la Ville de Paris. C'est le succès : en 1908 Reynaud estime avoir vendu 100 000 praxinoscopes.

En 1879, Reynaud ajoute un décor et transforme son appareil en praxinoscope théâtre.

«Cet effet est obtenu par l'addition au praxinoscope d'un verre transparent disposé de manière à réfléchir l'image d'un décor placé en avant, tout en laissant apercevoir à travers le personnage animé du praxinoscope. C'est une application nouvelle d'une disposition employée déjà dans les théâtres pour produire les spectres impalpables. «

Une simple modification va permettre à Reynaud de transformer son praxinoscope-théâtre en un praxinoscope de projection. La bande de papier comportant les images est remplacée par une série de plaquettes de verre, le cylindre extérieur est ajouré et une lanterne magique éclaire l'ensemble. Reynaud présente son appareil en 1880 à la Société Française de Photographie et propose de remplacer les images par des photographies, sans toutefois s'attaquer lui-même à ce difficile problème, qui ne sera d'ailleurs résolu que plus tard par Marey. Il ne semble pas que le praxinoscope de projection, vendu 60 F en 1886, soit très approximativement 5 000 F de 1995 ait obtenu un grand succès commercial. A vrai dire, Reynaud avait d'autres préoccupations, passer des très courtes animations à de vrais spectacles. Ce sera chose faite en 1890 avec le «Théâtre Optique».

Les images sont dessinées et peintes sur des plaquettes de gélatine, puis celles-ci, séparées par des écrans de bristol noir, sont assemblées par deux rubans. L'invention majeure de Reynaud est la perforation des bandes, qui va permettre d'entraîner grâce à une denture la roue à miroirs et assurer le positionnement correct de chaque image par rapport au miroir correspondant.

Les bandes sont entièrement dessinées à la main par Reynaud qui réalise un véritable travail de bénédictin pour obtenir quelques intermèdes d'une dizaine de minutes, soit 300 à 500 images chacun.

Le coût (2000 F de l'époque, soit près de 200 000 F de 1995) et surtout la fragilité du théâtre optique font fuir les acheteurs éventuels, forains ou directeurs de salles, aussi Reynaud décide-t-il de l'exploiter lui-même. De 1892 à 1900, Reynaud assure au Palais Grévin 13 000 représentations qui draineront 500 000 spectateurs, dont Marey et les frères Lumière qui lui prendront certainement quelques idées.

L'arrivée massive à partir de 1895 du cinématographe provoquera la faillite de Reynaud, qui mourra en 1918 à l'hôpital d'Ivry sur Seine d'une congestion.

Plusieurs chercheurs après Reynaud, comme Gaston Tissandier, Jules Lefèvre, Etienne Marey lui-même proposeront de remplacer les dessins de Reynaud par des photographies, des chronophotographies plus précisément. Malgré quelques essais en 1895 et 1896, sous la pression du directeur du Palais Grévin alarmé par le succès du Cinématographe Lumière, Emile Reynaud ne se lancera jamais vraiment dans cette voie, ce qui causera sa perte.

V - LA PROJECTION DU PHENAKISTISCOPE

L'un des problèmes à résoudre était, avons nous dit, la projection des images du phénakistiscope.

Tel qu'ils sont conçus, aussi bien le zootrope que le phénakistiscope sont destinés à l'observation individuelle, à la rigueur par quelques personnes, un peu comme un écran d'ordinateur de nos jours. Pour permettre l'observation par un groupe plus important, il faut marier le phénakistiscope à la lanterne magique. Ce sera chose faite en 1843 par Naylor. Celui-ci se contente d'ouvrir deux ouvertures dans le tube de projection de la lanterne pour y loger le disque portant les images et celui percé de fentes. Il faut aussi dessiner et peindre les images sur un support transparent, normalement du verre mince, mais cette technique a été mise au point depuis longtemps par les «lanternistes» et n'introduit pas de difficultés supplémentaires.

Toutefois, la présence des fentes, indispensables à la récréation du mouvement, fait perdre beaucoup de lumière et dénature les couleurs. Nous avons vu dans le paragraphe précédent comment Reynaud s'était affranchi de cette contrainte, mais d'autres solutions avaient été proposées par ailleurs.

Un autrichien, Uchatius, imagine de laisser fixes les images, chacune étant projetée par un objectif particulier également immobile. C'est la source de lumière qui tourne devant les images. La lanterne d'Uchatius est incontestablement plus lumineuse que celle de Naylor, mais au prix de quelles complications ! Il faut tout d'abord autant d'objectifs de projection que d'images, c'est à dire de huit à douze selon les disques. De plus l'éclairage est celui de Drummond : un bâton de craie ou de magnésie porté à l'incandescence par un chalumeau oxhydrique ou oxyacétylénique. Que l'un des tubes se coince ou se détache, et c'est l'explosion à peu près assurée...

Le Français Duboscq, employé, puis gendre et associé, du célèbre fabricant d'instruments de physique et d'op-

tique Jean-Baptiste Soleil, installé dans le quartier de l'Odéon à Paris, va lui aussi apporter sa pierre à l'édifice. Il revient au principe de la source de lumière fixe, en fait une lanterne de projection de sa fabrication, et ajoute un cadre spécial. Sur un pied sont fixées deux poulies. L'une porte le disque de verre où sont peintes les images, l'autre une couronne de quatre objectifs de projection. Un système de courroies permet de faire tourner les poulies en sens inverse l'une de l'autre, celle qui porte les objectifs deux fois plus vite que l'autre. La taille (environ 1 m de haut pour l'exemplaire de l'Université Pierre et Marie Curie à Paris) et le coût (260 F, plus 20 F par plaque d'images, plus 250 F pour la lanterne de projection, en 1885, soit environ 53 000 F de 1995) ne destinent pas vraiment l'appareil aux séances de projection familiales... De fait, il semble bien que ses acheteurs aient été recrutés parmi les clients habituels de la maison Soleil-Duboscq, les universités et les grands lycées.

Par la suite, Duboscq construira le bioscope, simple phénakistiscope portant deux couronnes d'images et deux miroirs. Les deux images sont les deux éléments d'un couple stéréoscopique et les deux miroirs dirigent chaque image vers «son» œil. Cette tentative de projection d'images en relief, comme toutes celles qui ont précédé ou suivi, y compris les récentes tentatives de cinéma holographique, n'aura pas vraiment de succès populaire et restera plutôt une curiosité.

Phénakistiscope de Plateau

VI - LA PHOTOGRAPHIE

Nous allons à présent ouvrir une brève parenthèse pour rappeler les grandes étapes de la photographie, et plus précisément de la surface sensible car c'est d'elle que va dépendre la suite de notre histoire.

En 1820, Nicéphore Niepce réussit à fixer sur une plaque de verre recouverte de bitume de Judée l'image de son jardin. Vingt ans plus tard, Daguerre réalise les premiers portraits sur des plaques d'argent sensibilisées à l'iode et devient immédiatement la coqueluche de la société bourgeoise de Paris. Tout le monde veut avoir son «daguerréotype», au prix il est vrai de quelques souffrances : de vingt minutes à une heure de pose dans l'immobilité la plus totale.

Un premier progrès est apporté en 1850 par les plaques au collodion de l'anglais Archer, qui réduisent le temps de pose à quelques secondes. Le collodion, ou fulmi-coton, est du nitrate de cellulose. Il est soluble dans un mélange d'éther et d'alcool et forme un liquide visqueux qu'il est aisé d'étendre sur une plaque de verre après y avoir dissous un peu d'iodure de cadmium ou d'ammonium. Il suffit ensuite de plonger la plaque dans une solution de nitrate d'argent pour obtenir une surface sensible prête à l'emploi.
Toutefois, le collodion doit être maintenu humide pour que la plaque reste sensible, ce qui est un inconvénient sérieux.

En fait il faut attendre 1870 et la plaque au gélatino-bromure d'argent de l'anglais Maddox pour que les photographes puissent réaliser des instantanés dans des conditions acceptables de luminosité. Le composé sensible est toujours du nitrate d'argent, mais il est inclus dans une couche de gélatine. La plaque peut être séchée et conserve de longs mois ses qualités. De plus, la sensibilité est tant accrue que des photographies «instantanées» deviennent possible.

Ce sont ces plaques, noir et blanc tout d'abord, puis autochromes à partir de 1907, qui assureront la fortune de la famille Lumière et permettront à Louis et Auguste d'investir dans la reproduction des mouvements.

Le support est toujours la plaque de verre, qui permet seule d'obtenir la planéité et la stabilité compatibles avec les indispensables poses longues. Débarrassés de cette dernière contrainte, les fabricants vont s'orienter vers des supports plus légers et moins fragiles : le papier tout d'abord, puis le celluloïd synthétisé en 1876. Ce sera l'oeuvre de Georges Eastman, fondateur de la société Kodak.
Ces progrès permettront à plusieurs savants, dont Janssen, Muybridge et surtout Marey de résoudre un problème aussi vieux que l'humanité, l'analyse du mouvement. Ce sera la dernière pierre sur laquelle Edison, les frères Lumière et bien d'autres édifieront le cinéma.

VII - ENCORE DES SAVANTS

Une fois de plus l'étape décisive viendra des laboratoires de recherche qui mettront au point, pour résoudre leurs propres problèmes, toute une série de techniques où d'autres piocheront à qui mieux mieux idées et résultats.
Dès l'invention de la photographie, lanternistes et projectionnistes de tout poil sont fascinés par les perspectives qu'elle offre d'autant que, dans la plupart des cas, la longueur des poses due au manque de sensibilité des surfaces sensibles n'est pas un obstacle majeur. A leur tour, les chercheurs s'y intéresseront et leur contribution essentielle aura pour origine l'étude des phénomènes rapides. Notons qu'ils s'intéresseront peu à la synthèse du mouvement qui, à leur yeux, n'est guère plus qu'un moyen de contrôle ou de démonstration.
Le problème avait été résolu depuis longtemps pour les mouvements lents, ou susceptibles d'être ralentis comme ceux des athlètes ou des danseuses. Il est facile d'observer de telles décompositions sur les célèbres vases rouges et noirs de la période hellénique classique, vers le Ve siècle avant notre ère. Eugène Marey avait déjà remarqué que les images grecques étaient plus proches de la réalité que celles d'artistes modernes. Certains chercheurs du Musée de l'Homme pensent que les potiers pou-

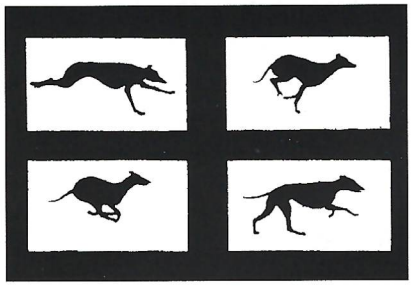
vaient, grâce à un procédé encore mal expliqué, obtenir des animations, selon le principe de phénakistiscope ou du zootrope.

Le canon de l'astronome.

Les premiers essais sont ceux de l'astronome Jules Janssen, de l'Observatoire de Meudon, près de Paris. L'enjeu, il est vrai, est de taille : enregistrer le passage de Vénus devant le Soleil. Cet événement, rarissime puisqu'il ne se produit qu'une fois par siècle, permet de calculer la parallaxe solaire puis sa distance à la Terre. La France à elle seule a mobilisé six équipes, soit une cinquantaine d'astronomes, celle de Janssen opérant au Japon, près de Nagasaki.
Janssen fait construire un «revolver photographique», plutôt du format d'un canon de marine, qui peut saisir 48 images successives en 72 secondes. Une plaque photographique circulaire, d'une vingtaine de centimètres de diamètre, et un disque obturateur percé de douze ouvertures sont entraînés par un mouvement d'horlogerie qui interrompt les rotations à intervalles réguliers et permet d'effectuer un enregistrement. L'appareil de Janssen paraît si intéressant qu'une des équipes anglaises d'astronomes l'adoptera aussi.
La plaque est du modèle de Daguerre, une plaque au collodion ne pouvant rester assez longtemps utilisable, et les plaques au gélatino-bromure d'argent étant trop récentes pour avoir fait la preuve de leur fiabilité. La plaque de Daguerre est assez sensible pour une photographie directe du Soleil, Vénus apparaissant alors comme une simple tache noire.
Malgré des conditions atmosphériques déplorables, l'expérience réussit parfaitement et Janssen peut prouver, grâce à ses photographies, l'existence encore controversée de la couronne solaire. Il voit immédiatement tout le parti que l'on peut tirer de telles séries d'enregistrement.
«La propriété du revolver, de pouvoir donner automatiquement une série d'images nombreuses et aussi rapprochées qu'on veut d'un phénomène à variations rapides, permettra d'aborder des questions intéressantes de mécanique physiologique se rapportant à la marche, au vol, aux différents mouvements des animaux ... [...]. La principale difficulté viendrait actuellement de l'inertie de nos substances sensibles, eu égard aux durées si courtes d'impression que ces images exigent ; mais la science lèvera certainement ces difficultés. «
Il faut encore attendre quelques années pour que l'analyse des mouvements rapides devienne une réalité, grâce à Muybridge et à Marey.

Comment galope un cheval ?

L'anglais Eadweard Muybridge, photographe de renom installé à San Francisco, s'intéresse tout d'abord au mouvement des chevaux, «pour déterminer leur attitude et le rapport de leurs membres dans les différentes périodes de leur pas ou de leur course».
Financièrement soutenu par Stanford, ancien gouverneur de Californie, il commence en 1872 par des photographies instantanées puis, en 1878, imagine de disposer une série d'une douzaine d'appareils photographiques pour enregistrer les différentes phases du mouvement. Chaque obturateur, d'un modèle spécial construit par Muybridge et capable de fournir une exposition d'un millième de seconde, est commandé par un électro-aimant que le cheval actionne en coupant un fil au moment de son passage. L'animal court devant un écran blanc sur lequel sont tracées des lignes de repérage. Cette méthode présente deux inconvénients : le point de vue change d'un appareil au suivant et les intervalles entre les poses ne sont pas égaux puis qu'ils dépendent de la vitesse de l'animal, elle-même irrégulière.



Chiens au galop obtenus par Muybridge

L'année suivante, Muybridge augmente la capacité de ses prises de vue : vingt-quatre puis quarante-huit appareils sont montés en batterie. De plus, il étend ses observations à d'autres animaux, puis aux êtres humains : hommes, femmes et enfants. Les premières séries, prises sur des plaques au collodion sont en fait assez décevantes, plus proches des ombres chinoises que des photographies auxquelles nous sommes habitués. A partir de 1882, il adopte les plaques au gélatino-bromure et obtient enfin des résultats satisfaisants.
Brouillé avec Stanford qui a fait publier sans le citer un recueil des premières planches, Muybridge trouve un emploi à l'Université de Pennsylvanie et accomplit entre 1884 et 1887 l'essentiel de ses observations. Le résultat sera publié par l'Université : c'est le désormais célèbre «Animal Locomotion», volumineux assemblage de 781 planches vendu à l'époque 500 $. Des sélections d'une centaine de planches sont aussi disponibles au prix de 100 $. Pour la petite histoire, la série des clichés de femmes où évoluent de jeunes et jolis modèles en tenue d'Eve fera les beaux jours des puritains bourgeois (hommes) de cette fin de siècle, trop heureux de pouvoir dissimuler sous des dehors «scientifiques» un certain penchant pour le voyeurisme ... Notre époque n'a rien à leur reprocher qui voit les CD Rom classés X battre tous les records de vente.

Pour assurer la promotion de ses recherches, Muybridge envisage la restitution du mouvement ainsi analysé. Dans une première étape, il se contente de faire imprimer des bandes pour le zootrope et pour le praxinoscope de Reynaud. Très vite, ces procédés se révèlent insuffisants et il passe aux projections, selon la technique de Naylor et Duboscq. Les images sont réparties à la périphérie d'un disque introduit dans une lanterne magique. Ne pouvant répartir avec précision ses clichés sur la périphérie du disque, Muybridge les remplace des dessins exécutés d'après ses photographies. Reprenant une idée proposée par l'américain Ross en 1869, il remplace le mouvement continu du disque à images par un mouvement saccadé : un engrenage entraîne le disque et le laisse échapper un court instant lorsque l'image passe devant l'objectif de projection. Un disque

obturateur masque l'objectif entre deux images. Grâce à ce procédé, les projections sont beaucoup plus nettes et plus lumineuses. Sous une forme un peu différente il sera repris par les frères Lumière et conservé jusqu'à nos jours.

Ajoutons que les planches de Muybridge, largement répandues dans la presse, ne font pas l'unanimité. Un journaliste anglais écrit en 1881 :

«Les premiers [les tableaux de chevaux de course NdA] sont tout mouvement, activité, élégance ; les seconds [les photographies NdA] sont d'une raideur et d'une laideur incroyables ! [...]. C'est, peut-être, la première fois que l'on peut dire, avec certitude, que le crayon du dessinateur est plus vrai que la chambre photographique.»

Malgré ces quelques fausses notes, le public ne s'y trompe pas et fait un succès aux travaux de Muybridge comme à ceux de Marey. Le peintre Meissonnier, spécialiste des scènes équestres et militaires, reconnaîtra que les attitudes des chevaux dans ses tableaux sont erronées, et s'aidera des photographies de Muybridge pour améliorer sa technique.

Quand Marey « fusille » les mouettes.

A la même époque, et en liaison étroite avec Muybridge qui lui voue une admiration sans bornes, un physiologiste, le docteur Jules Marey va apporter les perfectionnements décisifs qui feront vraiment naître le cinéma. Après de brillantes études de médecine à l'hôpital Cochin de Paris, sous la houlette du chirurgien Philippe Ricord, Marey s'oriente vers ce qui sera la passion de toute une vie, l'étude du mouvement ; sa thèse de Doctorat portait déjà sur l'étude de la circulation du sang.

De 1864 à 1878, Marey se consacre à l'étude du mouvement animal, sans prendre une seule photographie ! Il a en effet développé toute une série de capteurs à pression permettant de tracer des graphiques et surtout de mesurer les temps avec une grande précision : sphygmographe pour la mesure de la pression artérielle, myographe

Fusil photographique de Marey

pour celle des contractions musculaires... La plupart des ces capteurs, fabriqués et commercialisés à l'époque par les ateliers d'Antoine Bréguet (dont le fils Louis deviendra l'un des premiers constructeurs d'avions) sont encore en usage de nos jours, à commencer par la capsule de Marey familière à tous les enseignants d'hydrostatique.

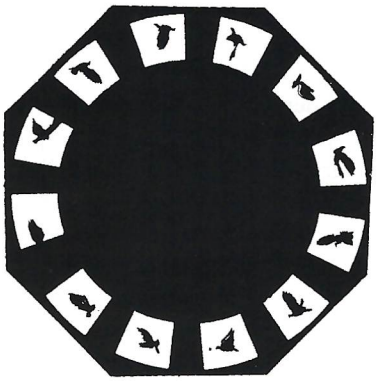
Des «chaussures exploratrices», capteurs à pression reliés à des enregistreurs permettent à Marey d'étudier les mouvements des chevaux, de l'homme, et même des oiseaux malgré des difficultés certaines d'adaptation.

En fait, c'est l'étude du vol des oiseaux, sujet à peu près inexploré à l'époque qui conduira Marey vers la photographie, immédiatement baptisée chronophotographie. Les capteurs mécaniques gênent considérablement les oiseaux - ceux du moins qui ne refusent pas farouchement de se prêter à l'expérimentation - et une méthode moins contraignante est indispensable.

Reprenant les travaux de Janssen, de Muybridge et de bien d'autres encore, Marey met au point en 1882 son «fusil photographique». L'objectif, réglable, est logé dans le canon du fusil. La plaque sensible, au gélatino-bromure d'argent, et le disque obturateur sont logés dans une culasse cylindrique. Lorsque l'on presse la détente, un mécanisme d'horlogerie met en rotation un obturateur qui réalise chaque seconde douze expositions de 1/700e de seconde chacune. Derrière cet obturateur un disque animé d'un mouvement à saccades porte douze fenêtres et entraîne du même mouvement la surface sensible. Une recharge de vingt-cinq plaques simplifie les expériences.

Une fois la plaque développée, Marey tire des positifs et réalise soit une bande de zootrope soit, moins fréquemment, un disque de phénakistiscope pour reproduire le mouvement analysé. Marey, plus tard, fera réaliser à partir de ses photographies des modèles en bronze qu'il placera dans un zootrope géant. Toutefois, rappelons que seule l'analyse préoccupe vraiment Marey, la synthèse n'intervient qu'à titre de vérification, ou encore pour présenter ses résultats à ses collègues de l'Académie des Sciences...

L'appareil permet à Marey d'obtenir de très bons résultats qu'il juge encore insuffisants. A partir de 1882 il s'installe avec son préparateur Demeny dans sa «station physiologique», un laboratoire installé au bois de Boulogne, à peu près à l'emplacement actuel du Parc des Princes, et financé à hauteur de 20 000 F de l'époque par le Conseil Municipal de Paris puis à hauteur de 61 000 F par le gouvernement, après une énergique intervention du ministre de l'instruction Publique, Jules Ferry, lequel reprend des arguments déjà avancés par Marey en 1873.



Epreuve obtenue avec le fusil photographique

«Si l'on savait dans quelles conditions s'obtient le maximum de vitesse,

de force ou de travail que peut fournir l'être vivant, cela mettrait fin à bien des discussions et à bien des tâtonnements regrettables. Ainsi, on ne condamnerait pas toute une génération d'hommes à certains exercices militaires... On saurait exactement à quelle allure un animal fournit le meilleur service, soit qu'on lui demande la vitesse, soit qu'on lui fasse traîner des fardeaux»

Dans sa station physiologique Marey, avec l'aide de Demeny imagine une nouvelle technique qui lui permettra d'améliorer la précision des mesures. Il utilise à présent une plaque unique, les images étant décalées par le mouvement du sujet photographié. Cette méthode a l'avantage de supprimer les vibrations du fusil photographique. Par rapport à la méthode de Muybridge, elle offre l'intérêt supplémentaire d'un point de vue unique et d'intervalles de temps égaux.

Ce type de photographies peut donner des épreuves très spectaculaires, comme en font foi les livres de physique des lycées, entre autres. Pour diminuer la lumière parasite, Marey vêt quelquefois ses figurants de collants noirs sur lesquels il fixe des bandes ou des points brillants et obtient ainsi une «épure» du mouvement, image surréaliste qui inspirera des précurseurs du mouvement dada, comme Marcel Duchamp.

Toutefois, lorsque les mouvements du sujet sont lents, la séparation des images est insuffisante et l'analyse difficile. Il serait plus pratique de disposer d'une succession de photographies, comme dans le fusil photographique, mais en s'affranchissant de la limite imposée à leur nombre par la plaque circulaire. Ce problème sera résolu par une nouvelle avancée de la technique photographique, le film mis au point par Georges Eastman, sur papier en 1885 puis sur celluloïd en 1889. Le celluloïd, que viennent d'inventer les frères Hyatt, se révèle vite le support de choix : souple, transparent, solide. Malgré son défaut majeur, l'inflammabilité, qui sera à la source de nombreux accidents dont l'incendie du Bazar de la Charité en 1897, le celluloïd restera pendant de longues années le support unique des films pour la photographie et le cinéma.

Sans attendre, Marey modifie dès 1890 son appareil de prises de vues pour l'adapter au nouveau support. La pellicule, de 90 mm de large, passe d'une bobine sur une autre. Un presseur l'immobilise pour chaque exposition. Assez curieusement, Marey, non plus que Demeny, n'auront l'idée de perforer la pellicule pour assurer un déroulement plus régulier. Pourtant d'autres l'avaient déjà réalisé : Reynaud pour son théâtre optique, et Eastman pour repérer les images des films Kodak.

Marey et Demeny réaliseront un grand nombre de films, comportant en moyenne quelques dizaines d'images sur des sujets très variés, y compris, à la demande du psychologue Alfred Binet, sur la prestidigitation. Quelques illusionnistes accepteront de réaliser, devant la caméra de Demeny, des tours classiques : saut de coupe, escamotage de la muscade ... Méliès, pressenti, se «défile», mais attrapera peut-être à cette occasion le virus du cinéma qui le rendra plus célèbre que ses tours de passe-passe.

En 1892 et 1893, Marey tentera l'opération inverse, la projection de ses films. C'est là où l'irrégularité du mouvement du film révélera toutes ses nuisances. Pour que l'image ne sautille pas sur l'écran, il faut que les photographies soient très régulièrement espacées. Marey est contraint de découper les films puis de recoller les clichés sur deux rubans de tissu. L'appareil de projection, même s'il boucle le cycle du cinématographe ne fonctionnera jamais vraiment bien. D'autres améliorations sont encore nécessaires pour charmer et fasciner les foules.

Parallèlement aux travaux de la station physiologique, Demeny crée un autre dispositif de projection, dans la lignée de Dubosq et de Muybridge, le phonoscope. Les photographies enregistrées avec la caméra de Marey sont montées sur un disque tournant et projetées. L'idée de Demeny est de filmer, puis projeter, les mouvements des lèvres, pour l'éducation des sourds muets. Au contraire de Marey, Demeny essaiera de commercialiser son appareil. La tentative échouera et provoquera la rupture entre les deux hommes. Marey fera muter Demeny de la station physiologique à l'école de Joinville, poste bien moins reluisant. Demeny tentera par la suite de s'associer avec divers industriels, dont Gaumont, pour réaliser des appareils de projection, mais ne saura jamais vraiment transformer ses idées en espèces sonnantes et trébuchantes, comme Edison et les frères Lumière.

VIII - PLACE AUX INDUSTRIELS

Toutes les pièces du puzzle sont en place, ou peu s'en faut. La dernière touche sera apportée par des industriels avec l'idée bien arrêtée et hautement proclamée de faire sonner leurs tiroirs-caisse aussi souvent et aussi longtemps que possible.

Le kinétoscope d'Edison.

Après divers essais sans lendemain, Edison, peut-être à la suite de sa visite à l'Exposition Universelle en 1889 au cours de laquelle il a rencontré Marey et visité la station physiologique du Bois de Boulogne, adopte définitivement le film. Différence importante avec Marey, le film de 35 mm, celui que nous utilisons encore, est perforé, ce qui assure un entraînement beaucoup plus régulier. Edison réalise en 1891 son appareil de prises de vues, le kinétographe et crée immédiatement (en 1893) un studio de prises de vues, vite surnommé «Black Maria», nom du fourgon cellulaire ou «panier à salade» en argot américain. L'année suivante, les collaborateurs d'Edison ont déjà tourné 75 films d'environ 15 m de long destinés au grand public et portant donc sur des sujets très variés : un moment chez le coiffeur, une visite chez le dentiste, mais aussi Jeanne d'Arc ou Marie Stuart...

Ne sont pas oubliées, bien entendu, les scènes «légères» : danses du ventre, danses espagnoles. Ces images qui nous paraîtraient presque de patronage, ont failli créer la perte de la société. Un sénateur, chargé par l'une des nombreuses «Society of the Suppression of Vice» de contrôler la moralité des spectacles est confronté, suite à une erreur du démonstrateur, à

une danse espagnole à la fin de laquelle on entrevoit la cheville de la danseuse. Offusqué, il enjoint au gérant de changer son spectacle, ou de fermer boutique.

Le tout n'est pas de tourner des films, il faut les faire voir. Edison, en même temps que l'appareil de prises de vues, a réalisé un appareil d'observation, le kinétoscope. Edison a choisi l'observation individuelle. La bande de film passe sur une série de poulies et d'engrenages qui assurent un entraînement régulier et surtout continu. Au cours de son trajet, elle passe devant une petite ampoule électrique. Un disque obturateur en rotation rapide permet d'isoler chaque image et de faire naître le mouvement.

La partie la plus importante n'a rien a voir avec la technique cinématographique. C'est un dispositif de mise en fonctionnement à pièces, comme celui de n'importe quel distributeur de bonbons ou de cigarettes. Pour un nickel (cinq cents), le spectateur a droit à voir un film une fois. Bien entendu, il peut renouveler l'opération...

Une première série de dix kinétoscopes est achetée par les frères Holland et mise en place en avril 1894 à New York dans un «Kinétoscope Parlor». Deux autres salles seront ouvertes la même année, l'une à Chicago, l'autre à San Francisco.

Le succès est immédiat et foudroyant : en un an le seul Kinétoscope Parlor de New York encaisse plus de 16 000 $. Edison, qui se contentait de vendre ses appareils et ses films décide de les exploiter lui-même et crée plusieurs sociétés ad hoc. En un an, lui qui a dépensé 24 000 $ pour mettre au point son invention va encaisser la bagatelle de 180 000 $. L'affaire est pour le moins juteuse !

Dès la fin de l'année 1894 le kinétoscope traverse l'Atlantique et est installé à Londres et à Paris, sur les Grands Boulevards, puis dans toute l'Europe.

Las, une fois le premier succès de curiosité passé, le kinétoscope cesse d'être rentable. Plusieurs raisons jouent dans ce sens. Tout d'abord, les appareils sont chers et seuls des forains peuvent les acheter pour les exploiter. Ensuite, et surtout, il s'agit d'un appareil individuel, ce qui implique pour les clients des prix élevés : un Kinétoscope Parlor contenant vingt appareils ne peut admettre que vingt clients à la fois. Edison n'a pas pu, ou su, ou voulu, passer à la projection qui seule drainera les foules vers les «salles obscures». En outre, il a négligé d'étendre ses brevets à l'Europe, et une quantité d'industriels comme Charles Pathé en profiteront pour le copier sans vergogne.

Le cinématographe Lumière.

Les frères Lumière, nous l'avons vu, ont fait fortune en vendant des plaques sèches au gélatinobromure d'argent. Plus tard, ils inventeront la plaque autochrome qui permettra à tout un chacun de faire de la photographie en couleurs et occupera seule le marché, pratiquement jusqu'à la seconde guerre mondiale.

Très liés avec les milieux scientifiques de leur époque, ils ont suivi avec attention les travaux de Marey et de Demeny, ont rendu visite à Reynaud et certainement étudié de tout près le kinétoscope d'Edison. Ils vont travailler sur un appareil réversible, qui permet à la fois l'enregistrement des films et surtout leur projection. Leurs connaissances en mécanique leur feront adopter la technique encore actuelle d'un entraînement intermittent du film perforé, à l'aide de griffes rétractiles commandées par une came triangulaire.

Ils présentent leur appareil le 22 mars 1895 à la Société d'Encouragement pour l'Industrie Nationale, place St Germain des Prés, à Paris, devant un public restreint. Les frères Lumière comptaient sur le succès de leurs plaques en couleurs, mais c'est leur premier film, «La sortie des usines lumière à Lyon» qui soulève l'enthousiasme des spectateurs.

«A l'aide d'un kinétoscope de son invention, il a projeté une scène des plus curieuses : la sortie du personnel des ateliers à l'heure du déjeuner. Cette vue animée, montrant en plein mouvement tout ce monde se hâtant vers la rue, a produit l'effet le plus saisissant, aussi une répétition de cette projection a-t-elle été redemandée par l'auditoire émerveillé. Cette scène, dont le déroulement ne dure qu'une minute environ, ne comprend pas moins de 800 vues successives».

Par la suite, d'autres séances seront organisées, toujours devant un public restreint d'invités, remportant à chaque fois un grand succès. Les frères Lumière et leur ingénieur Carpentier ne se décident pas à lancer l'exploitation commerciale, peut-être en raison d'a priori défavorables envers les gens du spectacle.

«Je ne vous dis pas la façon dont on est reçu dans ce monde-là [le Directeur des Folies Bergère NdA] : le savoir-vivre et la politesse la plus élémentaire y sont totalement inconnus. »

Toutefois, le temps presse. L'entrevue avec Marchand, le Directeur des Folies Bergère, est motivée par l'annonce d'une projection cinématographique publique à Berlin, par l'allemand Skladanowsky, spectacle qui est susceptible d'intéresser Marchand.

Finalement, c'est Antoine Lumière, le père de Louis et d'Auguste qui prendra sur lui d'organiser l'historique séance du 28 décembre 1895 au Grand Café du Boulevard des Capucines. C'est immédiatement le succès et les recettes brutes s'élèveront fin juin 1896 à plus d'un million de francs-or.

Inventeurs géniaux mais commerçants maladroits les frères Lumière ne sauront pas se maintenir sur la vague qu'ils ont créée et l'industrie cinématographique se fera sans eux. La remarque à Méliès, éventuel acheteur du procédé, qui leur est souvent attribuée,

«Jeune homme, mon invention n'est pas à vendre ... Pour vous, elle serait la ruine. Elle peut être exploitée quelque temps comme une curiosité scientifique ; en dehors de cela, elle n'a aucun avenir commercial »

est probablement apocryphe. Elle n'en révèle pas moins l'état d'esprit de ceux qui resteront pour toujours les inventeurs du cinématographe.

IX - VOIR LE CINEMA

Pour terminer ce bref tour d'horizon de la préhistoire du cinéma, précisons quelques données récentes sur la physiologie et la psychologie de la vision. Nous allons tenter de fournir les premiers éléments de réponse à la question que certainement vous vous posez tous : comment une succession d'images fixes peut-elle faire naître la sensation de mouvement ?

Le problème ne se pose pas, nous l'avons vu, avec les projections animées de lanterne magique : les ailes du moulin tournent, le bateau tangue et roule... Aucune différence de principe avec les mouvements réels.

De fait, ce phénomène apparaît avec le phénakistiscope et perdure de nos jours avec la télévision, voire les animations par ordinateur, si rudimentaires soient-elles.

Dans la plupart des cas une vague allusion à la «persistance des impressions visuelles» clôt la discussion. Nous allons voir qu'en fait les phénomènes mis en jeu sont bien plus élaborés et que l'explication doit être plus nuancée.

L'expérience fondamentale, que vous pouvez réaliser sans difficulté à l'aide d'un simple phénakistiscope, voire d'un folioscope (ou carnet à feuilleter) conduit immédiatement à constater que les images doivent être vues l'une après l'autre, et séparées par un temps mort pendant lequel l'œil ne reçoit pas de sensation.

Rappelons que nous pouvons distinguer trois étapes dans le processus de la vision.

• Une étape «optique» où les rayons lumineux sont rassemblés sur la rétine par la cornée et le cristallin. il se forme une «image rétinienne» que nous ne pouvons bien entendu pas voir, sinon dans l'oeil d'une autre personne...

• Une étape «chimique» où la rhodopsine (pigment rétinien) des récepteurs rétiniens, cônes et bâtonnets, est décomposée par la lumière. Cette décomposition, réversible, provoque l'émission d'un signal photochimique qui transmet l'information au niveau suivant.

• Une étape que nous baptisons «nerveuse» faute d'un meilleur terme. Chaque récepteur rétinien est relié à une cellule nerveuse. A partir de cette cellule, un réseau complexe de neurones assure la transmission de l'information jusqu'aux aires visuelles du cerveau, situées dans le corps strié. Selon un mécanisme encore mal connu - pour ne pas dire tout à fait inconnu - les informations issues des récepteurs rétiniens sont combinées et donnent naissance aux sensations visuelles comme la perception des contrastes, de l'orientation spatiale, des mouvements, du relief, etc.

Pour ce qui nous intéresse, nous nous limitons aux phénomènes résultant des variations temporelles des signaux lumineux. Notons tout de suite que ces variations paraissent indispensables à la vision, et qu'elles sont maintenues en permanence par d'incessants mouvements oculaires dont nous n'avons en général pas conscience.

Cela étant, les psychophysiologistes ont l'habitude de distinguer plusieurs types de réponses.

• L'adaptation à un important changement de flux lumineux, par transition entre l'obscurité et la pleine lumière. Cette adaptation est beaucoup plus rapide (quelques secondes) dans le sens obscurité vers pleine lumière que dans le sens inverse (de 30 à 40 minutes).

• La réponse à une succession lente d'impulsions, dont le type est la persistance rétinienne. La sensation perdure après que l'excitation ait cessé. La durée en est très variable, d'un dixième de seconde pour un oeil non adapté à l'obscurité à quelques secondes pour un oeil bien adapté. C'est elle qui nous permet de voir un «cercle de feu» lorsqu'un ami agite une lampe dans l'obscurité ou, plus banalement, les traînées de fusées de feu d'artifice et les étoiles filantes. Cette persistance rétinienne n'a toutefois rien à voir avec la perception du mouvement au cinéma.

• La réponse à une succession rapide d'impulsions. C'est le scintillement ou papillotement qui n'apparaît qu'en deçà d'une fréquence critique fonction de l'intensité lumineuse. Cette fréquence est de l'ordre de 10 Hz pour des intensités moyennes mais peut s'élever à 1 kHz pour des intensités lumineuses suffisantes.

Le papillotement est une gêne au cinéma, ce qui a conduit à accroître la cadence de prise de vues de 12 à 16, puis 24 images par seconde. Cette cadence est encore insuffisante pour les projecteurs modernes, très lumineux. Toutefois, la limite mécanique du déroulement du film étant atteinte, les constructeurs ont résolu le problème en modifiant l'obturateur, de façon que chaque image soit éclairée deux ou trois fois au lieu d'une seule, ce qui équivaut à une cadence de 48 ou 72 images par seconde. De façon similaire, les images de télévision sont entrelacées et paraissent ne durer qu'un cinquantième de seconde.

• Le masquage visuel. Une seconde stimulation, survenant peu de temps après la première, la masque (l'inhibe). Cet effet, dit «de coupe» dans le jargon des cinéastes est largement exploité dans les films.

• Le mouvement apparent ou réponse à deux excitations successives provenant de sources voisines dans l'espace. Si l'intervalle de temps est très faible, inférieur à 30 ms, les deux sensations sont confondues. Si l'intervalle des temps est assez grand, supérieur à 200 ms, les deux sensations sont bien résolues, tant dans le temps que dans l'espace. Le cas intéressant est celui où l'intervalle de temps est intermédiaire. La sensation est celle d'un mouvement d'une source à l'autre. Il existe diverses formes, actuellement regroupées sous le terme général d'»effet phi». Selon les théories les plus récentes, c'est lui qui est responsable de la perception du mouvement au cinéma. Le rôle du «trou noir» entre deux images est d'éliminer la persistance rétinienne par masquage des contours et de maintenir la netteté de l'image. En définitive, la persistance rétinienne serait nuisible car elle provoquerait un brouillage des sensations.

X - CONCLUSION

Nous avons vu les bonnes fées Plateau et Marey donner le mouvement à la lanterne magique. Ainsi naîtront le Phénakistiscope de Plateau, puis le Théâtre Optique d'Emile Reynaud et le Cinématographe des frères Lumière, puis le cinéma parlant des «années folles». Un peu plus tard la télévision réalisera les rêves les plus fous de Jules Verne et de Robida.

Les étranges lucarnes apportent à domicile le rêve et la réalité, et leurs images bien léchées, que l'on nous promet d'améliorer encore, nous feraient paraître bien ternes les projections tremblotantes de Naylor ou d'Edison.

Tout au long de cette aventure nous avons vu surgir et s'évanouir une foule d'inventions et d'expériences hétéroclites, de phénomènes curieux, d'instruments bizarres. Tout au long de cette histoire, nous avons rencontré des hommes , des savants, des prêtres, des magiciens, sincères ou fabulateurs, astucieux ou naïfs, géniaux le plus souvent mais toujours confrontés à un monde imaginaire différent du nôtre.

Peut-être les savants, les bateleurs, les artistes qui ont su fasciner, effrayer et faire rire des générations d'enfants et d'adultes ont-ils réussi à vous étonner et à vous émouvoir un instant ? Si oui, vous aurez alors ressenti la fascination de la magie lumineuse.

BIBLIOGRAPHIE

Il existe assez peu d'ouvrages récents consacrés à la préhistoire du cinéma. Voici quelques titres, dus pour l'essentiel à des «mordus», collectionneurs et par là même historiens de facto.

1/ Sur la physiologie de l'œil.

Jacques AUMONT
L'image 1990 Paris Nathan.
Hermann von HELMHOLTZ
Optique Physiologique (1867)
1989 Paris Jacques Gabay.
Yves Le GRAND
Optique Physiologique
1964 Paris Revue d'Optique.

2/ Les ouvrages des pionniers.

Jules Etienne MAREY
Le Mouvement (1894)
1994 Nîmes Jacqueline Chambon.
Eadweard MUYBRIDGE
The male and female figure in motion
1984 New York Dover.
60 planches extraites de
Animal Locomotion (1887).

3/ Des ouvrages plus récents.

Jacques FOIRET Philippe BROCHARD ill. Loïc DERRIEN
Les frères Lumière et le Cinéma 1992 Paris Nathan.
Remarquable de clarté et de concision.
Michel HENRY
Histoire de la Lanterne Magique
1988 Clermont-Ferrand ADASTA.
Laurent MANNONNI
Le grand art de la Lumière et de l'Ombre. 1994 Paris Nathan.
Une «somme» qui devrait figurer dans tous les CDI voire dans votre bibliothèque.
Jac REMISE Pascale REMISE
Régis van de WELLE
Magie Lumineuse
1979 Paris Balland.
Un splendide recueil d'images.
Emmanuelle TOULET
Cinématographe, invention du siècle
1988 Paris Gallimard.
Les premiers chapitres retracent les balbutiements du 7e art.

4/ Pour construire les ancêtres du cinéma.

Thaumatrope
Daniel DESCOMPS
Jouets d'autrefois
1994 Orlhac Ostal del libre
Phénakistiscope
Jean Paul MOUVIER
Sois l'inventeur
1975 Paris Gallimard
Praxinoscope
Jean Paul MOUVIER
Jouets Optiques
1982 Paris Dessain et Tolra
Folioscope
Hans Jurgen PRESS
Jouer avec les sciences de la nature
1976 Paris Dessain et Tolra

MATERIEL ELECTRONIQUE PROFESSIONNEL
Composants - Mesure - Outillage
Réalisation circuits imprimés

63000 CLERMONT-FERRAND
22, rue Saint-Adjutor
Tél. 73 31 13 76 - Fax 73 31 09 34

87000 LIMOGES
17, rue des Arènes
Tél. 55 32 47 96 - Fax 55 32 42 83

La constellation GPS

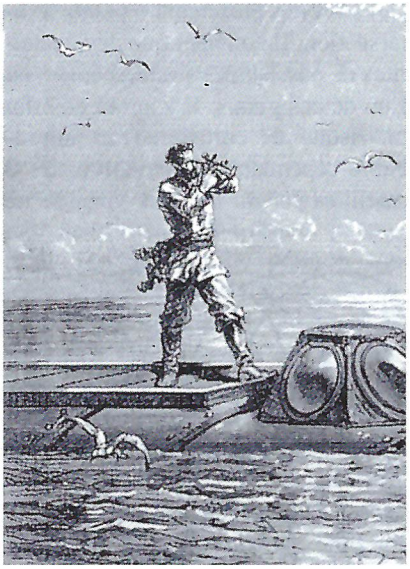
Par Pierre BACCHUS

I - INTRODUCTION : LES PROCEDES DE NAVIGATION

Depuis que les marins ont entrepris de naviguer hors de vue des côtes, ils ont été confrontés à un double problème : d'abord savoir à chaque instant où ils se trouvent, c'est-à-dire «faire le point»; en déduire ensuite dans quelle direction il convient de se diriger. Depuis approximativement l'époque de la Renaissance, ils ont appris à faire le point au moyen des étoiles, ou des autres astres. D'abord très peu précis, et limité à la détermination de la latitude, le *point astronomique* s'est beaucoup perfectionné à partir du XVIIIe siècle, grâce à l'invention du sextant et du chronomètre. Il est resté en usage jusqu'à ce que, au XXe siècle, les procédés de navigation radioélectriques viennent le supplanter. Sa précision est de l'ordre de 1 mille marin (1852 mètres).

A partir de la décennie 1910, les marins ont pu recevoir les émissions radio d'émetteurs spécialisés, et déterminer la direction d'où elles proviennent. *La radiogoniométrie* a dès lors permis de faire le point en mer, même lorsque la couverture nuageuse rendait impossible la méthode astronomique. Puis au cours de la seconde guerre mondiale se sont développés les procédés de navigation *hyperboliques*, qui consistent à recevoir les émissions de deux émetteurs synchronisés, et à déterminer le retard, ou le déphasage, d'une réception par rapport à l'autre. Ce retard est dû à la différence des distances du navigateur aux deux émetteurs. Connaissant la vitesse de propagation des ondes radio on peut connaître cette différence de distances, et en déduire que le navigateur se trouve sur une certaine *hyperbole*, dont les foyers sont les deux émetteurs. Avec un troisième émetteur, synchronisé avec les deux premiers, on détermine une autre hyperbole, et le point cherché est à l'intersection des deux hyperboles.

Pierre BACCHUS,
ancien élève de l'Ecole Normale Supérieure, est agrégé de sciences physiques et Docteur ès Sciences. Ses recherches en astronomie l'ont conduit à l'observatoire de Haute-Provence, puis à Strasbourg. Nommé professeur à la Faculté des Sciences de Lille, il a notamment dirigé les laboratoires d'Astronomie et de Calcul de cette Université.



Le Capitaine Nemo prenant la hauteur du soleil.
(Extrait de Vingt Mille Lieues sous les Mers)

De nombreuses chaînes d'émetteurs ont été installées le long des côtes. La plus connue est le Loran C. Toutes sont très précises, et permettent au navigateur de se localiser à 100 mètres près, parfois même beaucoup mieux. Leur défaut est une *portée limitée* (1000 km par exemple), ce qui rend impossible leur usage au milieu des océans.

Il faut signaler vers 1954 l'apparition de la *navigation par inertie*. C'est un appareillage complexe et onéreux, qui ne s'est répandu qu'à bord des sous-marins et des avions longs courriers. Sa précision se dégrade avec le temps, ce qui exige un recalage au bout de quelques heures, ou tout au plus de quelques jours.

Avec l'apparition des satellites artificiels se sont développés les procédés de *navigation par satellites*. Tout d'abord, en 1964, sont apparus les satellites *Transit*, mis en place par la Marine américaine. Ce sont des satellites de basse altitude (700 km), à orbite polaire, et qui passent donc au-dessus de tous les points du globe terrestre. Lors du passage d'un tel satellite, il se rapproche tout d'abord de l'observateur, puis passe à une distance minimale, et s'en éloigne ensuite. La réception des signaux radio émis par le satellite est donc affectée d'un *effet Doppler-Fizeau*, selon lequel la fréquence reçue est d'abord plus élevée que la fréquence émise, puis égale lors du passage à la distance minimale, puis inférieure. Des variations de fréquence observées on peut déduire la position de l'observateur par rapport au satellite. La position de ce dernier est connue par l'intermé-

diaire de ses éléments orbitaux, qui sont contenus dans un message émis lui aussi par le satellite.

Le système *Transit* présente un triple défaut : d'une part les passages de satellites au voisinage d'un observateur ne sont pas très fréquents (toutes les 2 heures en moyenne); d'autre part la vitesse propre du navigateur intervient elle aussi dans l'effet Doppler-Fizeau, ce qui exige des corrections, faisables si cette vitesse est bien connue et pas trop grande, mais impossibles sur les engins trop rapides; enfin ce procédé détermine bien la longitude et la latitude, mais non l'altitude, qui doit être préalablement connue. Pour ces trois raisons ce procédé n'est pas applicable à la navigation aérienne. Il a néanmoins rendu de grands services à la navigation océanique. Il a aussi reçu d'importantes applications en géodésie, en lui apportant une précision meilleure que le mètre.

Le système GPS (Global Positioning System), créé en 1973 par l'armée américaine, est aussi un système de positionnement par satellites, qui supplante le précédent en éliminant les trois défauts mentionnés. Les satellites du système sont suffisamment nombreux et suffisamment éloignés pour qu'à tout instant, et en tout lieu, on puisse recevoir plusieurs de ces satellites. Ils sont porteurs d'horloges atomiques qui leur permettent d'émettre des signaux d'une grande précision temporelle. La détermination de l'instant de réception au moyen d'une horloge locale permet de connaître la durée de propagation donc la distance de l'émetteur au satellite, et de se positionner sur une certaine sphère centrée sur l'émetteur. Avec 3 satellites le point est défini par l'intersection de 3 telles sphères. L'horloge locale doit être exacte à beaucoup mieux que la microseconde, mais l'observation d'un quatrième satellite permet de la mettre à l'heure avec cette précision.

II - ASPECT ASTRONOMIQUE

LA PREMIERE CONSTELLATION GPS

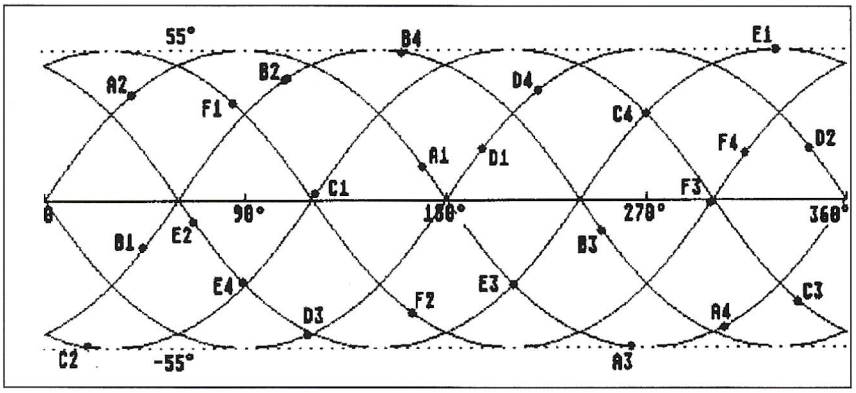
Dans sa conception d'origine, le système GPS était formé de 24 satellites disposés selon une configuration d'une régularité remarquable. Même si les lancements successifs n'ont guère respecté cette configuration, elle mérite d'être présentée en détail.

Tous les satellites GPS décrivent autour de la Terre des orbites circulaires avec une période de 12 heures sidérales. Par application de la 3ème loi de Kepler à partir d'un autre satellite de période et de rayon orbital connus (la Lune, ou un satellite de basse altitude, ou un satellite géostationnaire), on en déduit aisément que le rayon de l'orbite est de 26 560 km.

Ces satellites sont répartis dans 3 plans orbitaux inclinés de 63° sur l'équateur, qui se déduisent l'un de l'autre par des rotations de 120° autour de l'axe des pôles ; autrement dit, à une date donnée, les ascensions droites des noeuds ascendants sont 0°, 120°, 240°. Ces plans sont appelés A, B, C. On verra que les nœuds rétrogradent lentement.

Les 8 satellites de chaque plan sont distants les uns des autres de 45°. Ils tournent *en bloc*, dans le sens direct (comme la plupart des satellites artificiels, et comme la Lune), et constituent une figure indéformable (mais la figure formée par les 24 satellites n'est pas indéformable). Les passages de ces 8 satellites au nœud ascendant se succèdent à intervalles de 1,5 heure. A partir d'une origine des temps convenable, ces passages se font aux instants :

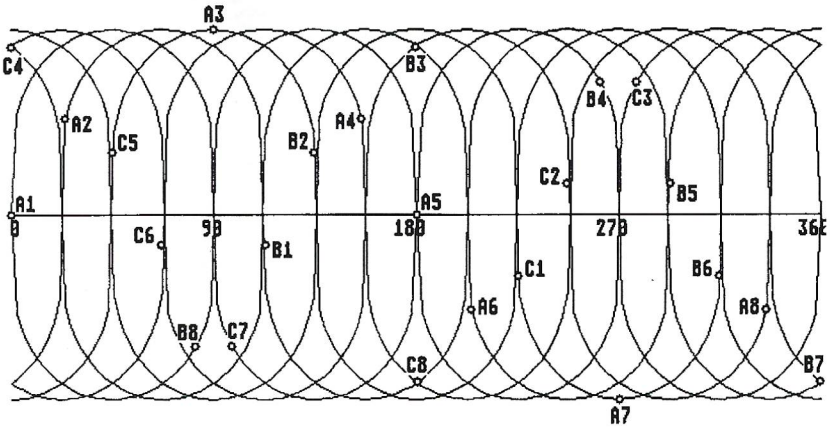
0	*1,5*	*3*	*4,5*	*6*	*7,5*	*9*	*10,5*	*heures sidérales pour le plan A*
0,5	*2*	*3,5*	*5*	*6,5*	*7*	*9,5*	*11*	*heures sidérales pour le plan B*
1	*2,5*	*4*	*5,5*	*7*	*8,5*	*10*	*11,5*	*heures sidérales pour le plan C*



A l'instant 0 la disposition des 24 satellites apparaît sur la figure ci-contre, qui représente la sphère où se trouvent les orbites (rayon 26560 km), en projection de Mercator.

Les 3 orbites présentent 6 points d'intersection. Il convient que deux satellites ne passent pas simultanément en l'un de ces points. Il y aurait en effet un risque de collision (fort improbable cependant), mais surtout les 2 satellites lorsqu'ils sont voisins, ne comptent que pour un pour la détermination de position. Avec la disposition adoptée deux satellites ne se rapprochent jamais à moins de 10°.

Les orbites précédentes ont été représentées dans le repère équatorial, d'orientation fixe, dans lequel les coordonnées sont l'ascension droite et la déclinaison. Ces orbites sont circulaires. On peut aussi les représenter dans un repère lié à la Terre, qui tourne d'un tour par jour sidéral, et dans



lequel les coordonnées sont la longitude et la latitude géographique. Le mouvement résulte alors de la composition du mouvement absolu (circulaire uniforme) d'un satellite, avec le mouvement de rotation du repère. Les trajectoires sont tout différentes. On peut les considérer comme les lieux des points de la Terre ayant un satellite au zénith, ou encore comme la trace des projections des satellites sur le globe terrestre.

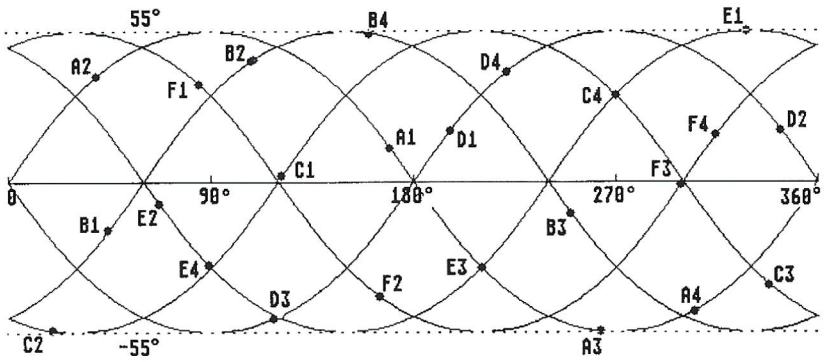
Pour les satellites successifs d'un même plan orbital, ces traces sont décalées de 22°,5, car ils sont en retard l'un sur l'autre de 1,5 heure, et pendant ce temps la Terre a tourné de cet angle.

La trace d'un satellite du plan B est en avance de 120° sur celle d'un satellite du plan A à cause de la position du nœud, et de plus, en retard de 7°,5 à cause du retard de 0,5 heure d'un satellite B sur un satellite A. Le décalage d'une trace A avec une trace B est donc de 112°5, ce qui est un multiple de 22,5. Les 8 traces des satellites A sont donc confondues avec celles des satellites B, ou C : en un point de la Terre situé sur l'une de ces traces, on voit passer successivement au zénith 3 satellites, appartenant à chacun des 3 plans orbitaux. En l'un des 144 points d'intersection de deux traces, on voit passer 6 satellites au zénith.

EVOLUTION DE LA CONSTELLATION

Entre 1978 et 1985 ont eu lieu 11 lancements (dont 10 réussis) de satellites appartenant à la première constellation GPS, puis les lancements ont été interrompus à la suite de l'accident du Challenger.

Depuis quelque temps il était question de réduire de 24 à 18, pour des raisons budgétaires, le nombre de satellites de la constellation. On a envisagé de répartir ces 18 satellites dans 3 plans orbitaux, ou bien dans 6, ou même 18 (un plan différent par satellite). Dans chaque cas les satellites d'un même plan pouvaient être équidistants, au disposés de façon irrégulière. Il a été reconnu qu'une disposition irrégulière était plus favorable, et elle a été adoptée. On a aussi adopté une répartition dans 6 plans orbitaux, appelés



A, B, C, D, E, F, dont les noeuds se suivent de 60° en 60°. L'inclinaison a été ramenée de 63° à 55°, avec la conséquence que chaque plan orbital devient perpendiculaire à 2 autres. Enfin on est revenu, en 1992, à une constellation de 24 satellites, à raison de 4 satellites dans chaque plan orbital.

Les 24 satellites de cette nouvelle constellation ont été lancés de 1989 à 1994, et sont encore tous opérationnels. Il reste en outre 3 satellites de la première configuration, qui ont été mis en sommeil lorsque la nouvelle constellation est devenue complète.

Les 6 orbites sont représentées sur la figure ci-contre avec, sur chacune d'elles, 4 satellites dans la position où ils se trouvent à un certain instant initial. Ces satellites sont désignés par la lettre de leur plan orbital, suivie d'un numéro de 1 à 4.

Les 6 orbites présentent 30 points d'intersection. Les satellites n'y passent jamais de façon simultanée, mais peuvent devenir proches l'un de l'autre : 3° pour E2-Fl, 4° pour B2-Fl.

LES ELEMENTS ORBITAUX

Les éléments d'une orbite képlérienne sont au nombre de 6 : inclinaison et longitude du nœud ascendant, qui définissent le plan de l'orbite ; excentricité et argument du périgée, qui définissent la forme et l'orientation de l'orbite; demi-grand axe, qui donne sa dimension, et le moyen mouvement par la 3ème loi de Kepler; anomalie moyenne à l'instant initial, qui définit la position du satellite dans son orbite. Les valeurs de ces éléments, ainsi que la date de l'instant initial, sont indiquées dans un message émis en permanence par chaque satellite. Elles permettent le calcul de la position képlérienne, par des formules classiques, avec une précision de l'ordre du décimètre.

A ce niveau de précision l'orbite ne peut pas être considérée comme exactement képlérienne, par suite des perturbations causées par l'aplatissement de la Terre. On a 3 perturbations séculaires : correction à ajouter au moyen mouvement, vitesses d'accroissement de l'inclinaison et de l'ascension droite du noeud, qui sont données dans le message. La perturbation périodique principale, de période 12 heures, est incluse dans les éléments képlériens. L'harmonique 2, de période 6 heures, ne dépasse pas quelques mètres. Il affecte l'anomalie vraie, l'inclinaison et le rayon vecteur. Son amplitude et sa phase font l'objet de 6 autres données du message. Les harmoniques supérieurs sont négligeables. L'orbite perturbée est ainsi définie par 15 coefficients.

La Lune, le Soleil et les planètes donnent aussi des perturbations, plus faibles que les précédentes. Les perturbations séculaires et les termes de période 12 heures et 6 heures sont incluses dans les données déjà mentionnées. Il existe aussi des perturbations de période plus grande (par exemple, égale à la période de révolution de la Lune) qui introduisent, sur l'orbite perturbée à 15 coefficients, une erreur atteignant quelques mètres au bout de quelques heures. C'est pourquoi toutes les 4 heures, les 15 coefficients de l'orbite sont réactualisés.

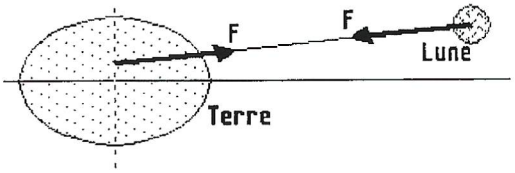
D'autre part les éléments orbitaux s'éloignent lentement de leurs valeurs nominales par suite de l'inexactitude des conditions initiales au lancement d'une part, à cause d'actions extérieures peu prévisibles d'autre part (pression de radiation, traînée, effets magnétiques). La position d'un satellite s'écarte ainsi de sa position nomi-

nale, de quelques degrés après un an. On commande alors une correction d'orbite, au moyen de petites fusées portées par le satellite, de manière à le ramener vers sa position nominale.

LA RETROGRADATION DU NŒUD

La perturbation la plus remarquable est le déplacement du noeud ascendant des orbites ; sa vitesse est de -0,04 degré par jour. Les 6 plans orbitaux tournent en bloc, en sens inverse du mouvement des satellites, de manière à faire un tour complet sur la sphère des fixes en 25 ans. De même les 8 traces au sol des satellites se déplacent vers l'Ouest, et font le tour du globe terrestre en 25 ans.

Cette perturbation est due pour l'essentiel à l'aplatissement de la Terre, qui donne un champ de forces non radial : la force exercée par la Terre sur le satellite ne passe pas exactement par le centre de la Terre. Elle est due aussi, pour une moindre part, à la présence de la Lune et du Soleil, qui eux aussi ramènent un supplément de masse dans le plan de l'équateur, et participent au caractère non radial du champ de forces appliqué au satellite. Il s'agit là d'un phénomène bien connu en Astronomie, qui se manifeste de diverses façons que nous allons passer en revue. Sur un satellite de basse altitude on trouve aussi une rétrogradation du noeud, mais bien plus importante (6° par jour), car elle est proportionnelle à la puissance -7/2 du rayon orbital. Sur la Lune la rétrogradation du noeud due à l'aplatissement de la Terre est très faible, mais son *phénomène réciproque* est important : il s'agit du caractère non radial de la force appliquée par la Lune sur la Terre, d'où résulte un moment de cette force, provoquant la précession des équinoxes. Sur la Lune également, la rétrogradation du noeud due à la présence du Soleil est bien plus importante que celle due à l'aplatissement de la Terre. Elle est de 1 tour en 18,6 ans, et se manifeste dans le retour périodique des éclipses.



III - DETERMINATION DE LA POSITION ET DE L'HEURE

VISIBILITE DES SATELLITES

Pour un observateur terrestre 0, seuls sont visibles à un instant donné les satellites situés au-dessus du plan de l'horizon. Ceux dont la hauteur est inférieure à 5° sont considérés comme inobservables.

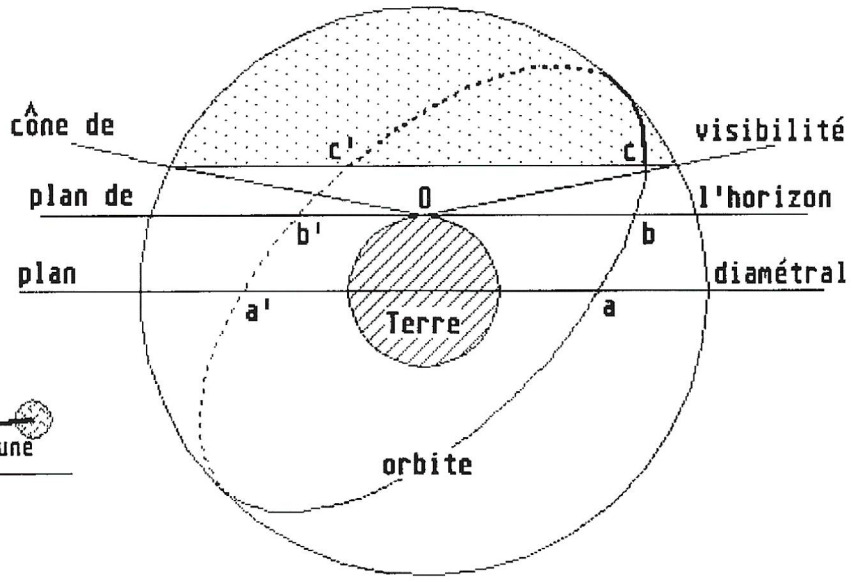
Le plan parallèle au plan de l'horizon du lieu 0, mené par le centre de la Terre, coupe une orbite circulaire en deux moitiés égales aa'. Chacune d'elles contient en moyenne 2 satellites, et pour les 6 cercles, on a 12 satellites au-dessus du plan diamétral considéré. Au-dessus du plan de l'horizon on a un arc bb' plus petit, et leur nombre est un peu moindre; dans le cône dont le demi-angle au sommet est la distance zénithale limite de 85°, on a un arc cc', et leur nombre est encore moindre. On peut calculer que la calotte découpée par ce cône sur la sphère où se déplacent les satellites a une surface de 4,25 stéradians, soit 33,8 % de la surface de la sphère. On peut donc estimer qu'en moyenne, le nombre de satellites observables est 33,8% de 24, soit 8,1 satellites.

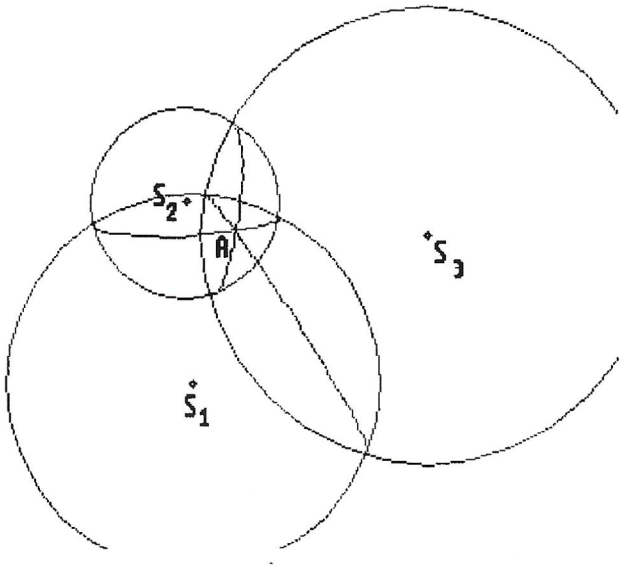
Ce nombre n'est qu'une valeur moyenne; il dépend de la disposition instantanée des satellites sur leur sphère, et de la position géographique de l'observateur. Mais il reste toujours supérieur au minimum requis, qui est de 4 satellites observables.

S'il y a des masques au voisinage de l'observateur (immeubles, arbres, fils électriques), le nombre des satellites observables diminue, de sorte que dans une ville, la détermination de position par GPS est assez aléatoire. L'observation à travers une fenêtre, ou un pare-brise de voiture, ne donne accès qu'à la moitié d'un hémisphère, et le nombre de satellites observables est réduit en moyenne à 4 ; là non plus la détermination de position n'est pas toujours possible. Depuis l'intérieur d'un immeuble, la réception est totalement impossible.

POSITION, CONNAISSANT L'HEURE

Si l'observateur A dispose d'une horloge parfaitement exacte, il peut déterminer l'heure de réception d'un signal émis par un satellite S1. Comme ces signaux sont émis à des heures bien déterminées, la différence entre l'heure de l'émission et celle de la réception donne la durée du trajet des ondes électromagnétiques depuis le satellite jusqu'à l'observateur. Connaissant leur vitesse de propagation (c=299792,458 km/s par définition), on en déduit la distance qui sépare l'observateur du satellite. La position du satellite étant connue grâce au message des éléments orbitaux, l'observateur se trouve situé sur une sphère de centre et de rayon connus. En désignant par x, y, z les coordonnées de l'observateur, par x_1, y_1, z_1, celles du satellite, par t_1 l'heure de l'émission du signal par le satellite, et par T_1 celle de sa réception par l'observateur, on a la relation $(x-x_1)^2 + (y-y_1)^2 + (z-z_1)^2 = c^2 (T_1 - t_1)^2$





qui n'est autre que l'équation de la sphère de centre S_1 de rayon $SA_1 = c\,(T_1 - t_1)$

S'il observe simultanément 3 satellites, l'observateur se trouve situé à l'intersection de 3 sphères. Il y a en principe 2 points communs aux 3 sphères, d'où une ambiguïté de détermination. Mais ces 2 points sont en général fort éloignés, et une connaissance préalable approchée de la position permet de choisir entre eux. Il s'agit de points *dans l'espace*, auxquels correspondent 3 coordonnées : cartésiennes x, y, z, ou bien longitude, latitude, altitude. Les x, y, z se déterminent par la résolution d'un système de 3 équations analogues à la précédente, avec les indices 1, 2 et 3.
Si les 3 observations ne sont pas simultanées, et si l'observateur est immobile dans un repère lié à la Terre rien n'est changé : il se trouve toujours à l'intersection de 3 sphères définies dans ce repère.
Avec un observateur mobile les choses sont moins simples. Il n'est plus question ici de 3 observations, mais de *3 suites d'observations*, plus ou moins continues, sur 3 satellites. Il est possible d'en déduire une suite de positions, et la vitesse de l'observateur à chaque instant.
Avec seulement 2 satellites, l'observateur se trouve à l'intersection de 2 sphères, c'est-à-dire sur un cercle. Mais s'il connaît son altitude (par exemple au moyen d'un altimètre), il se trouve sur une sphère (ou plutôt un ellipsoïde) concentrique à la Terre, dont l'intersection avec le cercle précédent donne la position dans l'espace.

POSITION ET HEURE

Sauf exception, l'horloge de l'observateur n'est pas réglée sur l'heure exacte avec la précision requise. Une inconnue supplémentaire se présente : *la correction d'horloge* ΔT qu'il faut ajouter à l'heure lue T_1 pour obtenir l'heure exacte. L'équation représentative d'une observation devient $(x-x_1)^2 + (y-y_1)^2 + (z-z_1)^2 = c^2\,(T_1 + \Delta T - t_1)^2$
Pour obtenir les 4 inconnues x, y, z, ΔT, il faut 4 équations telles que celle-ci, donc il faut observer 4 satellites (on se contentera de 3 observations si l'altitude est connue). On peut dire que, dans l'espace à 4 dimensions x, y, z, ΔT, cette équation représente une hyperquadrique de révolution autour de l'axe ΔT, et que le problème se ramène à l'intersection de 4 surfaces de ce type. Elles ont en général 4 points d'intersection, dont un seul est voisin de la position quadridimensionnelle préalablement connue.

Ce n'est pas le moindre intérêt du GPS de transmettre, en plus de la position, l'heure avec une grande précision, et à de grandes distances. Il se manifeste ainsi comme l'héritier de la méthode du *transport des chronomètres*, par laquelle on déterminait les longitudes au XIXe siècle, et celui des émissions de *signaux horaires*, qui au XXe siècle, avant les lancements de satellites artificiels, permettait la diffusion de l'heure à la précision de la milliseconde. C'est maintenant de micro ou de nanosecondes qu'il s'agit. Le Bureau International de l'Heure (BIH), devenu Service International de la Rotation Terrestre (IERS), utilise en permanence le GPS et ses nombreuses horloges au césium, pour l'élaboration et la communication de l'heure.

IV - DEGRADATION DE LA PRECISION

ERREUR SUR LES DONNEES, ERREUR SUR LE RESULTAT

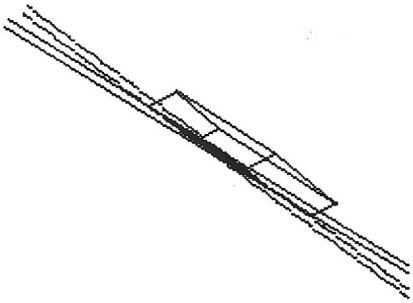
On a vu qu'une observation GPS consiste à déterminer l'instant d'arrivée d'un signal, et sa durée de propagation. Avec 4 observations on dispose de 4 équations, dont la résolution donne les inconnues cherchées : 3 inconnues spatiales, et une temporelle. Dans ce calcul les temps de propagation sont des *données*, les valeurs des inconnues spatio-temporelles constituent le *résultat*.
Le résultat est toujours entaché d'erreur. Il ne saurait s'agir d'une erreur de *calcul*, car la résolution numérique du système d'équations est faite de façon suffisamment rigoureuse. Mais les données, qui proviennent de mesures physiques, comportent des erreurs de *mesure*, qui rejaillissent sur le résultat. Nous examinerons plus loin quelques-unes des causes d'erreur.
Pour fixer les idées, supposons que l'erreur à craindre sur une mesure de temps de propagation soit de 0,1 microseconde. On peut s'attendre sur l'inconnue temporelle à une erreur de *l'ordre* de 0,1 µs, et sur les inconnues spatiales à une erreur du même ordre de grandeur compte-tenu de la vitesse de la lumière, c'est-à-dire 30 mètres.
Il ne s'agit là que d'une évaluation, et il peut arriver que l'erreur sur le résultat soit bien plus grande que l'erreur sur les données, et que la précision se trouve *dégradée* dans le passage des données au résultat. Cette fâcheuse circonstance se présente lorsque le système d'équations à résoudre est un système *mal conditionné*. A la limite un système mal conditionné peut devenir indéterminé (ou impossible), et on peut dire qu'un tel système, malgré une erreur finie sur les données, donne une erreur infinie sur le résultat.
La mauvaise qualité du conditionnement d'un système peut se définir comme le rapport entre l'erreur sur le résultat et l'erreur sur les données. Pour les observations GPS on a l'habitude de désigner ce rapport par le sigle GDOP (Geometric Dilution Of Précision) s'il concerne l'erreur sur

l'ensemble des 4 inconnues, par TDOP (Time Dilution ...) s'il ne concerne que l'inconnue temporelle, PDOP (Position D ...) pour les 3 inconnues de position, VDOP (Vertical ...) ou HDOP (Horizontal . . .) s'il ne s'agit que de l'altitude ou des 2 inconnues latitude et longitude. Beaucoup d'usagers ne sont intéressés que par ce dernier coefficient.

INTERPRETATION GEOMETRIQUE : POINT PAR 3 OBSERVATIONS

Prenons la valeur 0,1 µs pour l'erreur à craindre sur une donnée. Nous entendrons par là que sur cette donnée, l'erreur (qui est aléatoire) a une grande probabilité de tomber dans l'intervalle [-0,1 ; 0,1 µs] - disons 95 chances sur 100.

Plaçons-nous tout d'abord, pour simplifier, dans le cas où l'heure locale est parfaitement connue (ce qui n'empêche pas qu'il y ait une incertitude sur la *durée* de propagation) : il faut faire l'intersection de 3 sphères. Le



rayon de chaque sphère est affecté d'une incertitude de ± 30 mètres, et au lieu de se trouver *sur* une sphère, on est (à la probabilité 0,95) dans une *couche sphérique*, d'épaisseur 60 m. En assimilant, au voisinage du point d'intersection A des sphères, ces couches sphériques à des couches planes, leur intersection est un *parallélépipède*, dans lequel on a une bonne probabilité de se trouver.

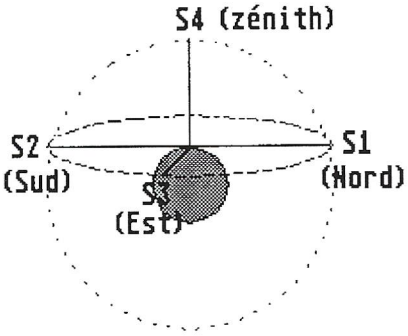
Ce parallélépipède devient un cube dans le cas où les 3 sphères sont orthogonales. Mais si deux d'entre elles se coupent sous un angle faible (par exemple moins de 10°), le parallélépipède s'allonge et l'erreur à craindre, sur au moins une des coordonnées, devient beaucoup plus grande que l'épaisseur des couches : la géométrie du système conduit à une dégradation importante de la précision, le système à résoudre est mal conditionné, le PDOP est grand (alors qu'il est de l'ordre de l'unité dans le cas du cube).

Cette circonstance se présente si deux satellites sont voisins sur le ciel. Ils passent ensemble près d'un point d'intersection de leurs trajectoires apparentes. On a vu au § II que la constellation réalisée évite, autant que faire se peut, de tels rapprochements.

Si par exemple on a observé 2 satellites voisins du zénith (l'un un peu à l'Ouest, l'autre un peu à l'Est) et un troisième près de l'horizon Sud, on a une grande incertitude sur la longitude, mais la latitude et l'altitude sont bien déterminées.

POINT PAR 4 OBSERVATIONS

Revenons au cas plus réaliste où l'heure locale n'est pas parfaitement connue : elle constitue une quatrième inconnue. On peut toujours dire que l'on fait, dans l'espace à 4 dimensions, l'intersection de 4 hyperquadriques, ou plutôt des couches de 60 mètres d'épaisseur qui leur sont associées, et qu'on obtient un hyperparallélépipède plus ou moins allongé. Mais cette façon de voir n'est pas très parlante. Regardons plutôt les choses



de façon directe, sur quelques cas particuliers.

1 - Si deux satellites S_1 et S_2 se trouvent dans des directions diamétralement opposées, par exemple à l'horizon Nord et à l'horizon Sud, leur observation suffit à déterminer l'heure et une coordonnée spatiale, ici la latitude. Les équations représentant ces observations en coordonnées horizontales locales, réduites à leur partie principale, sont

$x_1 - x = c\,(T_1 + \Delta T - t_1)$

$x_2 - x = c\,(T_2 + \Delta T - t_2)$

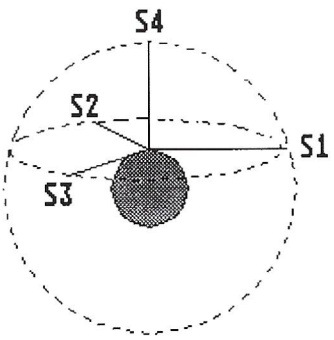
d'où x et ΔT, connaissant x_1 et x_2 (positions des satellites), t_1 et t_2 (heures des émissions), T_1 et T_2 (heure des réceptions, affectées de l'erreur - ΔT). Si on a la chance d'avoir un troisième satellite à l'horizon Est on en tire la longitude, et un quatrième satellite au zénith donne l'altitude, le tout dans de bonnes conditions de précision (on trouve un GODP égal à 2).

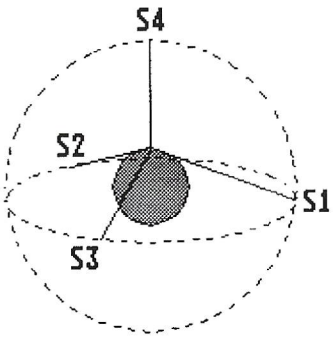
2 - C'est meilleur si les 3 satellites dans l'horizon sont équirépartis de 120 en 120° (le GDOP est 1,73), et meilleur encore avec 4 satellites dans les directions des 4 sommets d'un tétraèdre régulier (par exemple, 1 au zénith, et 3 à une hauteur de -19°,47) : le GDOP est de 1,58. Il n'est pas possible de faire mieux, et l'hyperparallélépipède d'incertitude ne se réduit jamais à un hypercube.

Comme les observations à l'horizon, ou en dessous, sont impossibles, un tel cas de figure reste théorique, sauf peut-être dans le cas de la navigation spatiale.

3 - Avec un satellite au zénith, l'équation se réduit à $z_1 - z = c\,(T_1 + \Delta T - t_1)$

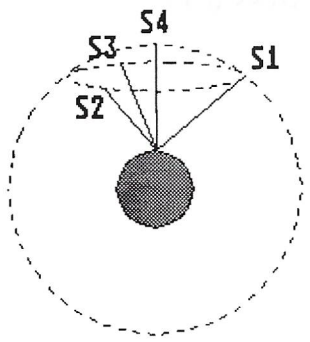
Elle ne détermine ni z ni ΔT, mais détermine bien la combinaison linéaire $z + c\Delta T$ de ces variables. Dans le plan z, $c\Delta T$, le domaine d'incertitude





est allongé dans le sens de la 1ère bissectrice.

4 - Les satellites observés ne sont jamais équirépartis sur la sphère céleste, puisque tous sont nettement au-dessus de l'horizon, et ils sont tous plus ou moins rassemblés autour du zénith. S'ils en sont assez proches on a, comme dans le cas 3, les variables z et ΔT mal séparées, et c'est une combinaison linéaire de ces variables qui est bien déterminée. Par exemple avec un satellite au zénith et 3 autres équirépartis en azimut, à 30° du zénith, on a sur z ou sur t une précision dégradée par un facteur voisin de 8,



alors que pour la combinaison 0,669 z - 0,742 t, ce facteur n'est que de 0,37. D'une manière générale, la précision sur z (altitude) est un peu moins bonne que sur x ou y (longitude et latitude).

V - LES SIGNAUX

Chaque satellite GPS doit émettre des signaux, à des instants bien déterminés. On pourrait imaginer que ces signaux sont des tops, analogues à ceux de l'horloge parlante, émis par exemple à chaque seconde ronde.

Ce schéma simpliste se heurte à plusieurs difficultés

- D'abord le point ne peut se faire, au mieux, qu'une fois par seconde, ce qui peut paraître peu dans le cas d'un avion rapide.
- Ensuite le canal de transmission est bien mal utilisé, puisqu'il ne sert, à chaque seconde, que pendant un bref instant (la durée du top, ou même seulement de son front initial).
- D'ailleurs si l'on veut que ce front reste raide, afin d'être défini à une précision de par exemple 10 nanosecondes, la bande passante doit être large, disons 100 MHz.
- Et comme il faut savoir de quel satellite provient un certain top, chacun d'eux doit émettre sur une fréquence porteuse particulière, de sorte que l'encombrement des fréquences est, au mieux, de 24 fois 100 MHz (ce qui est énorme).

Certes on pourrait multiplier les tops, en en émettant par exemple 10, ou 100, ou 1000 par seconde, ce qui utiliserait mieux le temps de transmission, et permettrait de faire un point plus continu. Mais on se heurterait vite à un problème d'ambiguïté, entre l'instant d'un top et celui du top voisin. Et l'encombrement des fréquences ne serait pas réglé.

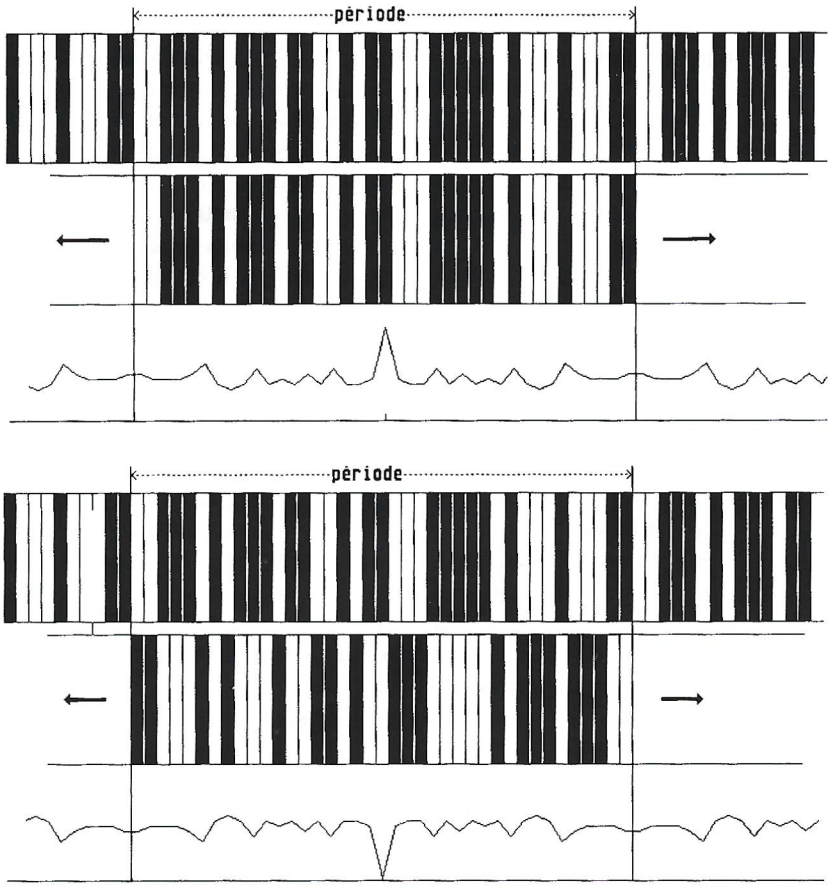
SIGNAUX PSEUDO-ALEATOIRES ET CORRELATION

C'est pourquoi on a choisi de faire émettre tous les satellites sur la *même* fréquence porteuse (1227 MHz), avec une bande assez large (quelques MHz). Chaque satellite émet une suite permanente de signaux, de durée 1 µs chacun, assimilables à des bits 0 ou 1 selon que le signal est présent ou absent. La suite se reproduit périodiquement tous les 1023 bits, c'est-à-dire toutes les millisecondes environ.

Cette suite de bits est différente pour chaque satellite; elle caractérise donc l'émetteur.

Chacune de ces suites est apparemment irrégulière, ou quelconque, ce qui la fait qualifier de *pseudo-aléatoire*. Elle est pourtant tout à fait déterministe, car engendrée par un algorithme de nature bien connue. Ce type d'algorithme donne des suites de nombres (ou de bits) présentant toutes les propriétés statistiques que donneraient des tirages au sort : à peu près autant de bits 1 que de bits 0 ; sur N bits, le nombre de bits 0 est N/2, avec un écart de l'ordre de $\sqrt{N}$; pas de répétitions périodiques ou d'alternances ; etc...

Le récepteur GPS peut lui aussi engendrer la suite de bits caractéristique d'un certain satellite, en utilisant le même algorithme pour l'engendrer. Il peut alors comparer cette



suite avec le signal reçu, en introduisant entre eux un déphasage (ou un décalage temporel) variable : c'est ce qu'on appelle *mettre en corrélation* le signal reçu et le signal créé.
On peut visualiser cette mise en corrélation en remplaçant la suite de bits 0 et 1, par une grille formée de barreaux opaques au transparents. Une seule grille laisse passer la moitié de la lumière. En superposant les 2 grilles, avec un décalage quelconque, il en passe un quart. Avec les 2 grilles superposées, avec le bon décalage, il en passe de nouveau la moitié : on est au maximum de corrélation, ce qui détermine le décalage entre le signal créé et le signal reçu, autrement dit le temps de propagation de ce dernier.
En remplaçant le signal créé par son complémentaire (permutation des régions opaques et transparentes), les grilles superposées ne laissent, au maximum de corrélation, plus rien passer du tout.
Dans une suite de 1024 bits, avec un décalage quelconque, la superposition en laisse passer un quart, soit 256 signaux élémentaires. Ce nombre est affecté d'une variation aléatoire de l'ordre de sa propre racine carrée, ce qui permet de dire qu'on reçoit 256 ± 16. Pour les autres satellites visibles, au nombre supposé de 8, le signal reçu n'est jamais corrélé avec celui que l'on crée, de sorte qu'on reçoit 256 ± 16 signaux élémentaires, quel que soit le décalage. Au total on reçoit 2048 ± 45 signaux, car leurs nombres se composent additivement, et les écarts se composent de façon quadratique (45 est $16\sqrt{8}$) - sauf au maximum de corrélation avec le premier satellite, où l'on reçoit 2560 ± 45 (ou 1536 ± 45 avec la suite complémentaire).
On voit que le pic de corrélation, de hauteur 256, dépasse le bruit de fond, de valeur moyenne 45, mais sans excès : il faut voir là une remarquable adaptation du système GPS aux exigences de son fonctionnement. Sur les figures ci-dessus, où pour la nécessité du graphisme on a adopté des suites périodiques de seulement 39 bits, le pic de corrélation ressort beaucoup moins, et la bonne adaptation ne serait plus satisfaite.
Naturellement on crée aussi les suites pseudo-aléatoires caractéristiques des autres satellites susceptibles d'être reçus, et on les met (successivement, ou simultanément, selon la puissance du récepteur) avec le signal global reçu. Le maximum de corrélation donne alors les temps de propagation pour ces autres satellites. Il peut arriver aussi que le pic de corrélation soit absent, ou insuffisamment distinct : c'est ce qui arrive par exemple si un satellite est masqué par des obstacles environnants.

LE CODE GROSSIER ET LE CODE PRECIS

Les signaux que l'on vient de décrire donnent un pic de corrélation d'une largeur à mi-hauteur de 1 µs, ou 30 mètres. La position de son centre, donc la distance d'un satellite, est définie à une dizaine de mètres près. La précision obtenue sur la position, ou sur l'heure, est la même, multipliée par un coefficient de dégradation géométrique.
D'ailleurs ces signaux, avec leur périodicité 1 milliseconde, ne déterminent la durée de propagation que *modulo* 1 ms, et la distance *modulo* 300 km. Lorsqu'on fait le point GPS, il est bon de connaître préalablement une position approchée à 100 km près, sinon le calcul se complique.
Le signal qui vient d'être décrit est un signal assez grossier (en anglais, signal CA, pour Coarse Acquisition). Il en existe un autre, plus précis (signal PA, ou Précise Acquisition), émis sur une autre fréquence (1575 MHz), où les bits 0 ou 1 sont 10 fois plus serrés que pour le signal grossier : leur durée est de 0,1 µs, le pic de corrélation est 10 fois plus étroit, et il permet en principe une précision 10 fois meilleure : quelques mètres.
Ce signal PA est formé lui aussi d'une suite de bits répétée de façon périodique, mais maintenant la période est très longue : 7 jours, et chaque période contient 6.10^{12} bits, toujours répartis de façon pseudo-aléatoire. Pour engendrer ce signal dans le récepteur il faut connaître, pour chaque satellite, les paramètres de l'algorithme, et ceux-ci sont tenus secrets. Le signal PA n'est donc accessible qu'aux détenteurs du code secret, c'est-à-dire l'armée américaine, et quelques utilisateurs privilégiés; c'est dommage pour les autres.
Quant au code CA, il est du domaine public. Ses paramètres ne sont pas secrets, d'ailleurs la brièveté du code (suite de 1023 bits) permettrait de le découvrir aisément. Il n'en est pas de même du code PA, dont la grande longueur interdit pratiquement son décryptage.
La mise en corrélation du code PA exige, si l'on veut éviter des décalages abusivement nombreux, une connaissance préalable assez précise du point et de l'heure. Elle est fournie par le code CA, qui reste donc nécessaire pour dégrossissage en présence du code PA.

LES MESSAGES

Outre les signaux temporels CA et PA que l'on vient de voir , chaque satellite émet des informations dont l'utilisateur a besoin, essentiellement sa position (ou plutôt ses éléments orbitaux) et la correction de sa propre horloge. Pour cela les signaux CA et PA, sont changés, 50 fois par seconde, en *leur complémentaire* : les bits 1 sont remplacés par 0 et inversement. On a vu que cela ne change pas grand chose à la mise en corrélation, et l'utilisateur reconnaît aisément ces inversions. S'il les considère comme des changements d'une valeur binaire, il reçoit une succession de bits 0 ou 1, de durée 20 ms, qui constituent justement les bits du message. Une page du message est formée de 1500 bits, et dure 30 secondes.
On a vu que les éléments orbitaux, képlériens ou autres, sont au nombre de 15. Ils sont codés sur 344 bits du message, par mots de 18, 24 ou 32 bits. On trouve aussi la correction de l'horloge du satellite, sa marche et sa variation de marche, des données sur le degré de confiance à accorder au satellite, sur la correction ionosphérique, et diverses indications de service, dont de nombreux bits de parité. On trouve aussi, sur chaque page du message, des indications abrégées sur les éléments orbitaux d'un ou 2 autres satellites, ce qui permet, non pas de déterminer leur position précise, mais de savoir s'ils sont visibles, et s'il faut les soumettre à corrélation. Sur une suite de 25 pages (ce qui dure 12 minutes et demie), le message donne des informations sur tous les satellites, actifs ou non.

VI - LES CAUSES D'ERREUR

ERREURS LIEES AU SYSTEME GPS

Comme on vient de le voir, le système GPS est d'une précision limitée mais néanmoins excellente, en relation avec la structure de ses signaux, et la durée de leurs bits élémentaires. On peut estimer qu'avec les signaux CA, de durée 1 µs, la précision est de 30 mètres, et avec les signaux PA, 10 fois plus courts, elle est de 3 mètres. Il s'agit là de la précision en position horizontale, atteinte dans 95% des cas.
Il s'y ajoute des erreurs de diverses origines, extérieures au système GPS lui-même, et que l'on s'efforce de corriger au mieux.

LA DEGRADATION VOLONTAIRE DE PRECISION

L'armée américaine, propriétaire du système GPS, est en possession du code secret PA, qui apporte la précision la plus grande. Elle laisse gracieusement à la disposition du public le code grossier CA, mais estime sans doute que c'est faire là un trop beau cadeau, à des auxquels après tout elle ne doit rien, car elle dégrade volontairement ces signaux : des erreurs sont volontairement introduites sur les horloges des satellites et sur leurs éléments orbitaux, ou plutôt dans les messages donnant ces informations. La précision sur une position horizontale est alors ramenée à 100 m dans 95% des cas, ou à 150 m sur l'altitude.
On peut considérer cette façon de faire comme antiscientifique, ou même immorale.
Il existe deux parades contre cette cause d'erreur. L'une d'elle consiste à *répéter* une mesure de position, par exemple une dizaine de fois, à des intervalles de temps suffisants (par exemple 1 heure) pour que les erreurs de dégradation volontaire deviennent indépendantes les unes des autres. Elles tendent alors à disparaître dans la moyenne des positions calculées. Ceci n'est évidement pas applicable à un observateur mobile, non plus qu'aux déterminations de temps.
L'autre parade consiste à établir un réseau (indépendant de l'armée américaine!) de stations fixes, de positions connues. Les positions (erronées) observées par GPS permettent de déterminer l'erreur volontaire et de la diffuser aux usagers, ce qui permet à ceux-ci d'apporter la correction nécessaires. Nous reviendrons là-dessus à propos du GPS différentiel.

LA PROPAGATION DANS L'IONOSPHERE

Dans le vide, les ondes électromagnétiques se propagent à une vitesse c parfaitement connue. De la durée du trajet on peut donc déduire avec exactitude la distance parcourue.
Il n'en est pas de même dans la traversée de l'atmosphère terrestre, où la vitesse est un peu inférieure à c. Pour les fréquences (de l'ordre du gigahertz) utilisées par GPS, la couche atmosphérique qui joue le plus grand rôle est *l'ionosphère*, à une altitude voisine de 350 km. La basse atmosphère (troposphère) intervient aussi, à un degré moindre.
Le ralentissement par l'ionosphère est inversement proportionnel au carré de la fréquence. Le retard ionosphérique n'est donc pas le même pour les deux fréquences utilisées par le GPS, et les deux durées de propagation sont différentes. Cette différence est mesurée, d'autre part on connaît le rapport des deux retards (c'est le carré du rapport des fréquences), donc on peut calculer les deux retards, et corriger les durées de propagation, pour les ramener à ce qu'elles seraient pour un trajet se faisant totalement dans le vide. C'est pour permettre cette correction que le GPS utilise deux fréquences.
La correction ionosphérique sur les distances des satellites est faible pendant le jour (quelques mètres), plusieurs fois plus forte pendant la nuit. Elle augmente en même temps que la distance zénithale du satellite. Elle varie énormément d'un jour à l'autre, et même d'une heure à l'autre, en fonction de l'activité solaire, de façon assez imprévisible. Ces propriétés de l'ionosphère sont bien connues pour leurs manifestations dans divers phénomènes : aurores boréales, orages magnétiques, et surtout propagation des ondes courtes.
Beaucoup de récepteurs GPS n'utilisent qu'une seule des deux fréquences. La correction ionosphérique ne peut alors être faite comme il vient d'être dit. Il reste possible de la faire à partir d'un *modèle d'ionosphère*, dont les paramètres, au nombre de 8, sont à chaque instant inclus dans les messages des satellites. Le modèle fait intervenir essentiellement la *latitude magnétique* de l'observateur.

PHENOMENES DIVERS

Par ordre d'importance décroissante on voit intervenir :
- l'incertitude sur les éléments orbitaux transmis, qui ont un caractère prévisionnel
- la stabilité des horloges des satellites
- l'incertitude de la correction ionosphérique
- l'incertitude de la correction troposphérique
- le bruit dans le récepteur
- l'accélération du véhicule
- la réflexion des ondes sur les obstacles.

Les masques qui cachent certains satellites pour l'observateur, par exemple en milieu urbain, ne constituent pas une cause d'erreur. Mais ils diminuent la précision en augmentant la dégradation géométrique, car les satellites restants sont tous plus ou moins rassemblés dans un même coin du ciel.

VII - AMELIORATIONS DU SYSTEME GPS

LE GPS DIFFERENTIEL

Pour une station au sol fixe, et pour un observateur qui n'en est pas trop éloigné (par exemple, moins de 300 km), la plupart des causes d'erreur se manifestent de façon identique. Seules les 3 dernières restent indépendantes pour les deux récepteurs.
Connaissant sa vraie position, la station fixe détermine de façon globale les erreurs qui se manifestent, et peut les annuler par des corrections adéquates sur les données de chacun des satellites. Ces corrections sont mises à la disposition des usagers par des messages radio, et ceux-ci peuvent éliminer de la même manière la partie principale des erreurs.

La précision horizontale (dans 95 % des cas) est ainsi ramenée de 100 m à 10 m pour le code grossier, et à 1 m pour le code précis, du moins si l'usager n'est pas éloigné d'une station de plus de quelques centaines de kilomètres.
La mise en oeuvre du GPS différentiel exige un réseau dense de stations au sol, qui n'existe actuellement encore que de façon partielle : côtes très fréquentées, voisinage des aérodromes.

LE SYSTEME GLONASS

Quelques années après l'Amérique, l'URSS a commencé à mettre en place un système de navigation très analogue au GPS, qui a reçu le nom de GLONASS. Il comptait 13 satellites en 1993, et devait lui aussi être complété à 24. Les différences avec GPS sont une altitude un peu moindre, donc une période de révolution plus courte (11 h 16 min.) ; des signaux émis sur des fréquences porteuses différentes pour chaque satellite, ce qui permet de leur affecter un même code pseudo-aléatoire; et pas de dégradation volontaire de la précision.
On peut concevoir un récepteur traitant à la fois GPS et Glonass, mais il est un peu plus complexe que pour un seul système. Il ne semble pas que de tels récepteurs soient commercialisés.

AIDE PAR SATELLITES GEOSTATIONNAIRES

Dans ces dernières années, d'autres pays ont envisagé de lancer des satellites de navigation de type GPS, constituant un service public civil, échappant donc aux servitudes liées au statut militaire de GPS. Il comprendrait évidemment le Glonass. On a envisagé aussi de renforcer un tel service par des satellites géostationnaires destinés plutôt à la diffusion de messages et de corrections, comme pour le GPS différentiel. L'ensemble de ces possibilités est étudié, sous le nom de GNSS (Global Navigation Satellite System) par les organismes internationaux de l'aviation civile.

GEODESIE SPATIALE PAR INTERFEROMETRIE GPS

La géodésie consiste à décrire la figure de la Terre, en déterminant les coordonnées de nombreuses stations terrestres dans des systèmes de référence eux-mêmes bien précisés. La géodésie classique du XIXe siècle, et de la première moitié du XXe, était basée sur des visées optiques entre stations et sa précision, limitée par les effets perturbateurs de l'atmosphère terrestre, était de l'ordre du mètre à l'intérieur d'un même continent. La rattachement des continents entre eux échappait à la géodésie, par suite de l'impossibilité des visées entre stations.
La géodésie spatiale utilise des satellites comme stations auxiliaires, et permet le rattachement des continents, puisque les satellites sont visibles de partout. Elle est largement affranchie de l'atmosphère terrestre, car les lignes de visée la traversent presque verticalement sur des trajets courts, et non plus horizontalement sur des trajets longs.
La géodésie spatiale est née en 1958 avec le premier Spoutnik : dès son lancement, la mesure de la rétrogradation du noeud de son orbite a fourni l'aplatissement de la Terre avec une précision jamais atteinte par la géodésie classique. Depuis, chaque génération de satellites a apporté sa contribution à la géodésie spatiale. Le GPS n'échappe pas à cette règle, et il est même devenu l'outil essentiel de la Géodésie.
Sous la forme qui vient d'être décrite, avec l'utilisation des signaux de précision, et en mettant en oeuvre toutes les possibilités du système, GPS peut fournir des positions absolues à la précision métrique. Il contribue ainsi à l'étude de la rotation de la Terre, et à l'élaboration des échelles de temps (temps atomique, temps universel). Mais le GPS peut dans le domaine de la géodésie être utilisé d'une tout autre manière, qui laisse de côté la modulation pseudo-aléatoire servant aux navigateurs, et ne prend en compte que la phase de la porteuse pure, à 1227 ou à 1575 MHz.
Pour deux satellites simultanément visibles, les porteuses ont la même fréquence, et sont rigoureusement synchronisées. Elles donnent donc un phénomène d'interférences, dont l'interfrange est du même ordre de grandeur que la longueur d'onde, c'est-à-dire de l'ordre de 1 décimètre. Si l'observateur parvient à se localiser dans ce système de franges, il le fait avec une précision de l'ordre du centimètre. On voit que la précision de la géodésie, qui était hectométrique il y a 50 ans, du moins pour la géodésie intercontinentale, est devenue aujourd'hui centimétrique ou millimétrique, grâce au GPS, et à plusieurs autres techniques, toutes plus ou moins spatiales.
A vrai dire le GPS interférométrique ne donne pas des positions absolues au centimètre près, ne serait-ce que parce que les données orbitales ne fournissent pas les positions des satellites avec une telle précision. Mais les techniques d'interférométrie GPS *différentielles* permettent effectivement de comparer des positions, même assez éloignées, avec cette précision.
On peut remarquer que les franges d'interférences de deux satellites GPS ne sont pas immobiles, car les satellites se déplacent à une vitesse de plusieurs kilomètres par seconde. En un point donné les franges *défilent*, à raison de quelques dizaines de milliers par seconde ; mais cela ne constitue pas un obstacle à l'observation. Plus gênante est *l'ambiguïté des phases*, qui ne sont déterminées qu'à 2 k π près ; il faut déterminer, pour chaque satellite, un entier inconnu k dans un intervalle d'ambiguïté de l'ordre de [-10; +10].

VIII - PERSPECTIVES EN NAVIGATION AERONAUTIQUE ET ROUTIERE

PRECISION, FIDELITE, DISPONIBILITE ET INTEGRITE

On a beaucoup parlé de la *précision* du système GPS, mais ce n'est pas la seule qualité qu'on attend de lui. La *fidélité* est la propriété de donner des erreurs reproductibles, autrement dit systématiques, donc pouvant être corrigées. Les erreurs qui restent du domaine de l'imprévisible ou de l'aléatoire concernent au contraire la précision.
La *disponibilité* est la qualité qui permet au système d'être utilisable à chaque instant et en tout lieu. Au début, avec peu de satellites en fonction, et même avec une constellation

de 18 satellites, la disponibilité était incomplète, ou alors avec une précision dégradée. Depuis que la constellation à 24 satellites est fonctionnelle la disponibilité est bonne, surtout si on y ajoute les satellites Glonass.
Mais la qualité qui inquiète le plus les navigateurs aériens, surtout si le GPS doit devenir un jour leur seul moyen de navigation, c'est *l'intégrité*. Cette qualité consiste, non pas en l'absence de défauts, mais à *être informé*, en temps utile, de la présence d'un défaut. Or le GPS présente parfois, des défauts affectant son horloge, ou ses signaux, ou ses éléments orbitaux, nettement supérieurs à ce qu'on est en droit attendre, et qui subsistent pendant *plusieurs minutes* avant d'être signalés dans les messages. Cela peut être catastrophique pour un aéronef, surtout en phase d'approche ou d'atterrissage.
On fait actuellement de gros efforts pour améliorer l'intégrité du GPS. D'une part les stations au sol, qui contrôlent les satellites, exercent une surveillance plus serrée sur ceux-ci. D'autre part les usagers tentent de profiter de la redondance du système (c'est-à-dire qu'ils utilisent un 5ème ou un 6ème satellite en plus des 4 strictement nécessaires) pour déceler eux-mêmes d'éventuelles incohérences. Mais ceci complique les récepteurs et les algorithmes de traitement.

LE GPS, UNIQUE MOYEN DE NAVIGATION AERIENNE ?

Dans ces conditions l'aviation civile, dont les exigences de sécurité sont impératives, n'est pas encore prête à admettre le GPS comme seul moyen de navigation. Cette question fait cependant l'objet de discussions abondantes, et il n'est pas exclu que le GPS, agrémenté des diverses améliorations le transformant en GNSS, ne devienne dans l'avenir le moyen universel de navigation. Le point le plus délicat est l'atterrissage sans visibilité, qui exige une précision en altitude meilleure que le mètre, et une intégrité à l'échelle de la seconde.

LA NAVIGATION ROUTIERE

Le GPS a depuis longtemps investi le domaine de la navigation maritime. Il est utilisé en navigation aérienne, mais pas encore comme unique moyen de positionnement. Reste la navigation terrestre.
Depuis les débuts du GPS, il a paru évident qu'il aurait un rôle à jouer dans le domaine militaire terrestre : positionnement des chars, des fantassins ou des véhicules divers. C'est plus récemment que les véhicules civils ont commencé à reconnaître les vertus d'une bonne navigation.
Les professionnels du transport ont intérêt à contrôler de près la situation de leur flotte routière, et le positionnement par GPS est l'un des moyens qui permet d'y parvenir : on l'a déjà essayé sur les camions et les autobus. Il en est de même dans les chemins de fer, mais il existe là bien d'autres moyens que le GPS; d'ailleurs celui-ci est assez gêné par la présence des caténaires au-dessus des trains.
Mais c'est par la navigation des automobiles que nous sommes tous concernés. S'il nous arrive de fréquenter les transports aériens ou maritimes en tant que passagers, les problèmes de navigation nous échappent; s'il s'agit de navigation de plaisance, il y a au contraire des années que le GPS s'est imposé à nous. Pour la navigation routière privée, le GPS est encore peu répandu, mais il le deviendra certainement, car il résout élégamment les problèmes de navigation qui se posent à l'automobiliste, ou à son navigateur. Comment trouver sans lui, de nuit, un point d'une banlieue inconnue ? Si l'on commence à s'égarer, on commet bientôt des erreurs de plusieurs kilomètres et le GPS, même limité à la précision de 100 mètres, remet vite les choses en ordre.
Sans doute, pour se rendre en un point donné, il faut en connaître les coordonnées : longitude et latitude. Il n'est pas courant que ces informations figurent dans les en-tête de papier à lettres, comme l'adresse et le numéro de téléphone; mais certains on déjà commencé à le faire. Cet usage se répandra, en même temps que la population des possesseurs de GPS, susceptibles d'en tirer parti, va s'accroître.

LE GPS ET LA CARTOGRAPHIE AUTOMATIQUE

Le navigateur a constamment besoin de consulter une carte : hydrographique ou aéronautique pour les marins au les aviateurs, carte Michelin pour l'automobiliste, ou cartes topographiques de l'IGN s'il veut plus de détails. Dans tous les cas il s'agit d'un document imprimé sur papier.
Il existe aujourd'hui des *cartes électroniques*, pour lesquelles les informations cartographiques sont mémorisées dans un ordinateur, et peuvent être visualisées à la demande sur un écran. On peut alors choisir la région à afficher, ainsi que l'échelle désirée, et faire apparaître seulement les éléments cartographiques utiles : routes, chemins, phares, aérodromes ... Si aujourd'hui la totalité du contenu des cartes existantes n'est pas encore digitalisée et mise en mémoire, on est en bonne voie d'y parvenir. Ces cartes électroniques, réservées aux professionnels il y a quelques années, entrent peu à peu dans le domaine public : chacun peut acquérir, pour un millier de francs, une carte routière de la France utilisable sur son ordinateur personnel.
La cartographie devient *automatique* si la carte électronique est couplée à un instrument de navigation - disons à un récepteur GPS - qui matérialise en permanence, sur la carte, la position mesurée. En même temps que le navigateur se déplace, la portion utile de la carte défile automatiquement. Il ne lui reste qu'à vérifier qu'il se trouve bien là où il le veut.
Il est naturel d'associer à un tel système une détermination (toujours automatique) d'itinéraires d'un point à un autre, optimisés selon divers critères (distance, temps, coût). Un programme d'itinéraires optimisés est accessible à tous par le Minitel. Dès lors le suivi de l'itinéraire est vérifié par le système, qui envoie des alarmes, ou même des messages vocaux, en cas d'erreur de parcours.
Verrons-nous les constructeurs automobiles nous proposer, dans quelques années, le GPS et le suivi automatique de l'itinéraire, d'abord en option, puis en série ? Pourquoi pas ? Tous les amateurs de gadgets s'en réjouiront. Ces quelques pages permettront peut-être au lecteur de comprendre qu'il s'agit là de bien plus qu'un gadget, mais d'un progrès technique majeur.

Les manuscrits scientifiques au fil du temps et du hasard

Une partie de la correspondance de Lavoisier retrouvée à Clermont-Ferrand

Extrait de "Pour la Science" n° 185, mars 1993.

Après avoir disparu pendant plusieurs dizaines d'années, près de 350 lettres de Lavoisier viennent de rejoindre la quasi-totalité des écrits du chimiste conservés à l'Académie des Sciences.

Lavoisier est mort sur l'échafaud, le 8 mai 1794, à la suite de la condamnation des fermiers généraux. En 1791, la très impopulaire Ferme générale, chargée de collecter les impôts indirects sur le tabac et sur le sel - la gabelle -, est abolie. Tous les fermiers généraux sont arrêtés le 24 décembre 1793. Traînés devant le Tribunal révolutionnaire, ils sont condamnés et exécutés. Lavoisier ayant demandé un délai de grâce pour achever quelques travaux, le président du tribunal aurait déclaré : "La République n'a pas besoin de savants".

Après sa mort, son épouse, Marie, Anne, Pierrette Paulze, rassemble son œuvre scientifique et sa correspondance. Lavoisier avait occupé de multiples fonctions officielles : régisseur de la Régie des poudres et salpêtres, fermier général et membre de l'Académie des sciences ; il était également membre de l'assemblée régionale de l'Orléanais, et s'intéressait à diverses questions sociales et à l'éducation. N'ayant pas d'enfant, Marie, Anne Paulze lègue tous ses papiers à une de ses nièces, épouse de Léon-de-Chazelles.

En 1846, après avoir fait classer, répertorier et numéroter toutes les pièces, Léon-de-Chazelles remet à l'Académie des sciences l'œuvre scientifique de Lavoisier, les écrits concernant sa vie administrative, ses réflexions sur l'instruction publique et une partie de sa correspondance. Il conserve toute la correspondance privée et les papiers familiaux.

Peu après, le chimiste Jean-Baptiste Dumas, secrétaire perpétuel de l'Académie des sciences, commence à publier l'œuvre de Lavoisier, dont le premier volume paraît en 1862. A la suite de Dumas, Edouard Grimaux, membre de l'Académie et professeur de chimie à l'Ecole polytechnique et à l'Institut d'agronomie, et qui fut aussi l'un des premiers biographes de Lavoisier, continue la publication de ces œuvres.

En 1955, l'ingénieur chimiste René Fric se voit confier par le premier Comité Lavoisier le soin de publier intégralement la correspondance de Lavoisier ; il est chargé de rassembler toutes les lettres reçues ou envoyées par le chimiste. Il a donc accès aux archives conservées par les héritiers de Chazelles, mais, afin de travailler plus aisément, il emporte chez lui, à Clermont-Ferrand, diverses lettres appartenant à l'Académie. Quelques confusions semblent alors avoir été faites entre les deux fonds.

A la mort de R. Fric, les héritiers de Chazelles, la famille de Chabrol, restituent à l'Académie tous ses documents. Puis, en 1991, la famille de Chabrol fait une dation à l'Etat de la correspondance privée. L'Etat la confie à l'Académie des sciences. Le fonds Lavoisier est alors quasiment reconstitué.

Cependant, hormis quelques pièces qui avaient été vendues par Madame de Chazelles à la bibliothèque de l'Université américaine Cornell, dans les années 1950, les lettres que R. Fric avait empruntées à l'Académie des sciences manquaient toujours.

Où étaient ces pièces ? Définitivement perdues ? Pas de traces de cette correspondance. La correspondance de Lavoisier des années 1784 à 1788, éditée par le nouveau Comité Lavoisier, présentait quelques lacunes.

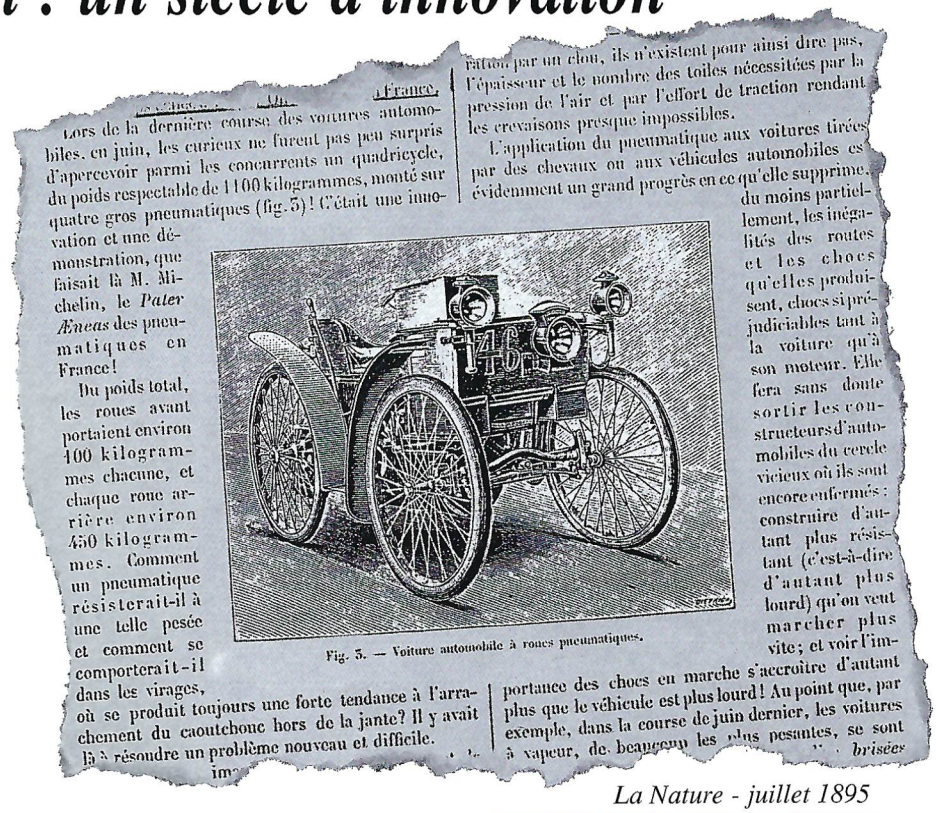
Puis à la fin de l'année 1992, un particulier fait savoir au Comité Lavoisier qu'il est en possession... de lettres qui semblent avoir appartenu à Lavoisier : une maison en démolition, un pan de mur qui résiste encore, un placard béant ; une liasse de documents en émerge ; l'homme s'approche : des lettres qui semblent anciennes. Après de longues recherches, l'auteur semble identifié, le Comité Lavoisier est contacté, les papiers restitués : la maison en démolition était celle de R. Fric, et la correspondance, celle qu'il avait empruntée à l'Académie des sciences, et qui avait disparu.

Aujourd'hui les 214 minutes (ou brouillons), les 87 lettres adressées au chimiste et les quelque 45 documents divers qui lui faisaient défaut ont réintégré le fonds Lavoisier aux archives de l'Académie des sciences.

Michelin : un siècle d'innovation

La course automobile Paris-Bordeaux-Paris de juin 1895 consacrait la supériorité du moteur à pétrole sur le moteur à vapeur. Elle comportait aussi une innovation qui allait révolutionner la conduite automobile. Parmi les concurrents on remarquait "l'ECLAIR", véhicule de 1 100 kg, conçu et réalisé par les frères Michelin, ... et qui roulait sur des pneumatiques, ce qu'on n'avait encore jamais réalisé.

A l'occasion du centenaire de cet événement, la Manufacture Michelin a organisé une animation au Centre Jaude à Clermont-Ferrand. De nombreux visiteurs ont eu ainsi l'occasion de découvrir une reconstitution fidèle du véhicule... et mesurer le chemin parcouru jusqu'au "pneu vert", dernier né de la Manufacture clermontoise.



Lors de la dernière course des voitures automobiles, en juin, les curieux ne furent pas peu surpris d'apercevoir parmi les concurrents un quadricycle, du poids respectable de 1100 kilogrammes, monté sur quatre gros pneumatiques (fig. 5) ! C'était une innovation et une démonstration, que faisait là M. Michelin, le *Pater Æneas* des pneumatiques en France !

Du poids total, les roues avant portaient environ 100 kilogrammes chacune, et chaque roue arrière environ 450 kilogrammes. Comment un pneumatique résisterait-il à une telle pesée et comment se comporterait-il dans les virages, où se produit toujours une forte tendance à l'arrachement du caoutchouc hors de la jante? Il y avait là à résoudre un problème nouveau et difficile.

Fig. 5. — Voiture automobile à roues pneumatiques.

ration par un clou, ils n'existent pour ainsi dire pas, l'épaisseur et le nombre des toiles nécessitées par la pression de l'air et par l'effort de traction rendant les crevaisons presque impossibles.

L'application du pneumatique aux voitures tirées par des chevaux ou aux véhicules automobiles est évidemment un grand progrès en ce qu'elle supprime, du moins partiellement, les inégalités des routes et les chocs qu'elles produisent, chocs si préjudiciables tant à la voiture qu'à son moteur. Elle fera sans doute sortir les constructeurs d'automobiles du cercle vicieux où ils sont encore enfermés : construire d'autant plus résistant (c'est-à-dire d'autant plus lourd) qu'on veut marcher plus vite ; et voir l'importance des chocs en marche s'accroître d'autant plus que le véhicule est plus lourd ! Au point que, par exemple, dans la course de juin dernier, les voitures à vapeur, de beaucoup les plus pesantes, se sont brisées

La Nature - juillet 1895

Université d'été

Pour la sixième fois depuis sa création en 1986, l'ADASTA a organisé, en liaison avec le Département de Physique de l'Université Blaise Pascal, une Université d'été. Ce stage, qui s'est déroulé du 28 août au 2 septembre, avait pour thème : "Images et Télécommunications" ; il s'adressait essentiellement aux formateurs et professeurs de Sciences Physiques chargés d'enseigner les nouveaux programmes des classes terminales des lycées.

Rappelons que le Ministère de l'Education Nationale qui finance ce type d'Université d'Eté a fixé comme objectif principal le développement des projets pédagogiques innovants ainsi que la formation des formateurs.

L'ADASTA s'est efforcée, comme par le passé, d'apporter des solutions pratiques aux nombreux problèmes posés par la mise en place des nouveaux programmes scolaires. Des expériences nouvelles ont été testées, des matériels et documents divers ont été mis à la disposition des stagiaires.

L'équipe pédagogique avait reçu pour la circonstance le renfort de plusieurs physiciens de renom : Gérard ROBLIN, Directeur de recherches à l'Institut Supérieur d'Optique d'Orsay, Michel HENRY, de l'Université P. et M. Curie à Paris, auxquels s'étaient joints nos collègues clermontois J. ALIZON, P. AVAN, L. DETTWILLER et J.-M. GORRAND.

Au cours de cette semaine studieuse les stagiaires ont été reçus par le Conseil Régional d'Auvergne ; ils ont eu aussi le plaisir de découvrir, grâce au talent de François BEAL, les multiples facettes d'Alexandre VIALATTE. Enfin le stage s'est terminé par une sortie touristique dans la chaîne des Puys.

Photo «La Montagne»

Les stagiaires reçus au Conseil Régional par le Vice-Président René Chiroux.

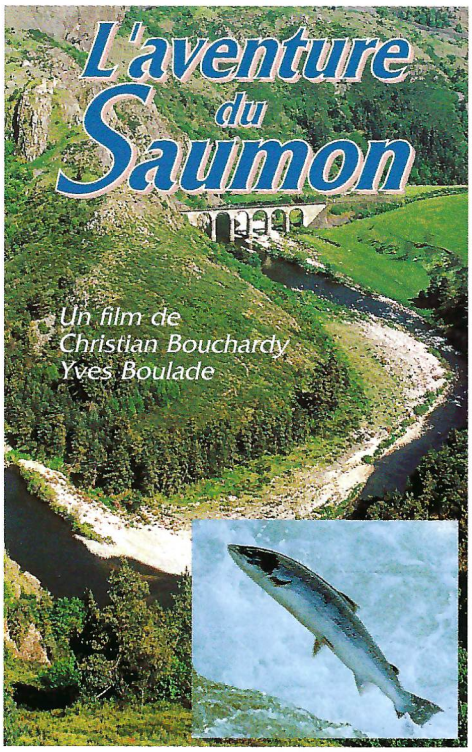
LE REGNE MINERAL : nouvelle revue scientifique

Créer une revue scientifique est un pari un peu fou que seuls des passionnés peuvent faire. Après avoir réuni une équipe de professionnels, de scientifiques, de photographes, Louis Dominique Bayle s'est lancé dans l'aventure en créant "Le Règne Minéral" qui traite de minéralogie, géologie et paléontologie.
Dans cette excellente revue vous trouverez des articles écrits par des scientifiques, des informations multiples sur les expositions, les bourses d'échange, des "fiches minéralogiques" détachables, etc... Le tout est remarquablement illustré.
Une mine - si l'on peut dire - pour les lecteurs et en particulier pour les enseignants.

LE REGNE MINERAL,
Editions du Piat,
1 bis, rue du Piat,
43120 MONISTROL/LOIRE,
Tél. 71 66 54 67

Abonnement annuel :
300 F
(6 numéros + 1 hors série).

L'aventure du saumon



L'Allier est la dernière grande rivière d'Europe où se reproduisent les saumons. Pour aller rejoindre les frayères du haut Allier, il n'y a pas moins de 18 barrages à franchir. Si l'on ajoute la pollution, il ne faut pas s'étonner que le nombre de poissons arrivant au terme de leur voyage diminue, d'année en année, de manière catastrophique.

Il était urgent de réagir. C'est ce qu'on fait divers organismes et associations, émues par cette situation qui risquait de devenir irréversible.

Christian Bouchardy et Yves Boulade ont retracé, avec la passion et le talent qui les caractérisent, cette lutte en nous offrant des images remarquables.

Une aventure à ne pas manquer.

L'Aventure du saumon, film vidéo 42 min.
Catiche Productions,
10, rue de Bellevue, 63830 Nohanent, Tél. 73 60 53 32
149 F + 30 F de port.