AUVERGNE Sciences

N° 55 - AVRIL 2003

L'HEURE POUR TOUS
LE CARBONE
LE VIADUC DE MILLAU

BULLETIN DE L'ADASTA

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

éditorial

Le viaduc de Millau, le plus haut au monde est un ouvrage de grande technicité dessiné par Lord Norman Foster.

Architecte anglais ; la particularité des sept piles est une variation constante de leur géométrie.
D'une surface de 200 m² à sa base, la pile finira par deux branches finales.
Avec une surface porteuse totale d'à peine 30 m² au sommet.
Sur une sorte de diapason s'appuieront le Tablier mais aussi les pylônes métalliques de 90 m de haut.
Autre particularité : le béton haute performance est produit sur site par deux centrales.

La recherche d'un ouvrage esthétique a conduit au principe d'un viaduc multihaubané, composé de piles minces aux lignes élancées et d'un tablier très léger.

La précision requise pour chaque phase technique impose des vérifications multiples notamment par satellite G. P. S Global Positioning System.

Cet ouvrage a été visité en janvier par une quarantaine d'adhérents de l'ADASTA qui ont été enthousiasmés et agréablement surpris par la technicité : de la géologie à la gestion des hommes, de la sécurité aux calculs de résistance des matériaux, etc.

Que cet exemple parmi d'autres puisse contribuer à faire aimer les sciences et la technique, notamment par les jeunes.

J.C Capelani

Adhésions et Abonnements

Adhésions à titre individuel ..... 26€
Adhésions à titre collectif ..... 80€

L'adhésion annuelle donne droit à 3 revues Auvergne-Sciences et leurs suppléments pédagogiques, aux conférences et visites d'entreprises, à des réductions sur les locations et les achats.

Permanences :

Lundi	:		14 h - 18 h
Mardi	:	8 h- 12 h	14 h - 17 h
Mercredi	:	8 h- 12 h	14 h - 18 h
Jeudi	:	8 h- 12 h	14 h - 17 h
Vendredi	:	8 h- 12 h	

Adressez le courrier à
ADASTA, 19, rue de Bien-Assis
63100 Clermont-Ferrand
Tél. 04 73 92 12 24
Fax 04 73 92 11 04
E-mail : adasta@wanadoo.fr
Site internet :
http://perso.wanadoo.fr/adasta

Dépôt légal novembre 2002
N° ISSN - 1166-5904

Merci à nos sponsors

AUVERGNE
CONSEIL RÉGIONAL D'AUVERGNE

CONSEIL GENERAL
DU PUY-DE-DOME

EDF
Electricité de France

overscvn

volvic

MICHELIN

VILLE DE
CLERMONT
FERRAND

ministere
jeunesse
education
recherche

ministere delegue
recherche et nouvelles
technologies

Comité de rédaction de la Revue Auvergne-Sciences
Président : Paul Avan - Rédactrice en chef : Jocelyne Allée
Rédactrice : Nathalie Andreoletti
Membres : Jean-Claude Capelani, Luc Dettwiller, Paul-Louis Hennequin, Roland Jouanisson, Michel Naranjo, Bernard Ragout.

Photo de couverture : Le Chantier du Viaduc de Millau (J.C. Capelani)
Impression : Imprimerie Porçu -Clermont-Ferrand

sommaire

L'heure pour tous 3
Temps scientifique, temps public 9
Le carbone dans tous ses états 11
Transport du pétrole en eaux profondes 18
Le PET-Scan : un progrès en cancérologie 20
Voyage à St-Chély-d'Apcher et Millau 21
Cadre géologique de la sortie de l'ADASTA à Millau 23
Les Principes au XX^{ème} siècle 26
"Les Jeunes Pousses" de l'ADASTA
Livre "Acteurs et fonctions économiques dans la mondialisation" 28

L'heure pour tous : du cadran solaire à l'horloge parlante

Suzanne DÉBARBAT
Observatoire de Paris

L'inauguration de la nouvelle horloge parlante le 18 septembre 1991, coïncidait avec un événement important : le centenaire de l'heure française unifiée. C'est, en effet, en 1891 que l'heure de l'Observatoire de Paris est devenue l'heure légale française, mettant fin ainsi à bien des désordres. Etablir un temps unique pour nos activités et le diffuser n'est pas simple : du cadran solaire à l'horloge atomique, du télégraphe à l'horloge parlante, les systèmes les plus divers se sont succédés. Les deux articles qui suivent sont consacrés l'un aux aspects historiques du sujet, l'autre aux liens qui existent entre le temps qui se « fabrique » et celui qui se « diffuse ».

L'heure, dans le vocabulaire français, a deux significations : elle marque un instant de la journée et elle mesure une durée. L'alternance des saisons, celle des jours et des nuits portaient en elles-mêmes la genèse du découpage et du repérage du temps. Pour de nombreux siècles, ces indications d'origine astronomique fixeront les échelles associées à l'écoulement de la vie des hommes. A la base de toutes ces échelles, un phénomène périodique et si, de nos jours, il s'agit d'un phénomène de caractère physique, l'échelle pratique n'en reste pas moins alignée sur le phénomène astronomique que constitue la rotation de la Terre.

Le jour et l'année

Le jour fut d'abord la période comprise entre le lever et le coucher du Soleil ; on le divisa en 12 heures. Plus tard, on divisa de même la période de la nuit ; l'ensemble des deux, formant un jour complet a la même durée que le jour des astronomes constitué par l'intervalle du temps qui s'écoule entre deux passages successifs du Soleil au méridien d'un lieu produits par la rotation de la Terre sur elle-même. Si le jour des astronomes fut divisé en 24 heures égales, soit 86 400 secondes, ce découpage régulier ne se substitua que tardivement, dans la vie courante, à l'emploi des « heures inégales » (inégales entre le jour et la nuit) ; il ne s'imposera qu'à l'époque des horloges mécaniques.

L'année ramène (sauf aux latitudes très voisines de l'équateur terrestre) le même type de saison (pousse des bourgeons, chute des feuilles...) après un intervalle de temps qui correspond à la durée de la révolution de la Terre autour du Soleil. Pour les astronomes, la durée de référence est l'année tropique qui sépare deux équinoxes de printemps successifs.

Les imprécisions de l'une et de l'autre de ces durées (le jour et l'année) sont rapidement apparues aux yeux des observateurs de l'Antiquité, même si pendant longtemps la vie civile ou religieuse s'en est accommodée. L'introduction d'échelles plus exactes ou plus uniformes s'effectuera progressivement : pour l'année, au XVI^{e} siècle avec le calendrier grégorien ; pour le jour, à partir du XVIII^{e} siècle, avec « l'équation du temps » ; et pour les deux, au XX^{e} siècle, lorsque l'unité de temps (la seconde) sera déterminée avec une précision et une exactitude de plus en plus grandes.

Les heures du jour

Pour interpoler, et diviser en parties égales, l'intervalle entre le lever et le coucher du Soleil, ou l'intervalle entre deux passages successifs du Soleil au méridien d'un lieu, il faut se rapporter à un phénomène évoluant en raison directe du temps. Tel est l'écoulement de l'eau dans la clepsydre de l'Antiquité (on en a retrouvé des vestiges datant de –1500) qui, si elle est bien conçue, fournit une précision satisfaisant les besoins des hommes de l'époque. Encore faut-il noter qu'elle ne mesure que des durées.

L'heure elle-même s'obtient par le cadran solaire, instrument dont on a retrouvé différents modèles remontant jusqu'au VIIIe siècle avant notre ère, aujourd'hui dans les musées.

Le cadran solaire le plus rudimentaire fut certainement constitué d'un bâton fiché en Terre, l'ombre portée permettant de suivre le cours du Soleil, et de noter l'heure de midi. En substituant au bâton un « style » convenablement orienté, on construit un cadran solaire où l'ombre portée se déplace de façon uniforme, permettant de fractionner le temps écoulé en intervalles constants.

Les cadrans solaires indiquent le temps solaire vrai local, c'est-à-dire celui du lieu où ils sont placés ; ils se trouveront sur presque toutes les églises et dans la plupart des châteaux. Ils permettront aux villageois de connaître l'heure vraie locale, les jours où le Soleil brille... Il existera également des cadrans solaires de poche, orientables grâce à une boussole (instrument, d'origine

chinoise, répandu en Occident depuis le XIIIe siècle) ; assez coûteux, ils sont réservés aux gens aisés. Un dispositif ingénieux pour l'orientation fait état de la hauteur du Soleil selon la saison; peu coûteux, il est connu sous le nom de « montre de berger ». Le passage au temps solaire moyen, lequel régularise la durée du jour sur l'année, se fera grâce à l'adjonction d'une « courbe en huit » représentant les variations – en plus ou en moins – de cette durée par rapport à sa valeur moyenne. Il existe en France de nombreux cadrans solaires où ces irrégularités, appelées « équation du temps » sont représentées. Il s'agit d'un écart qui, dans un sens ou dans l'autre, dépasse légèrement 14 minutes à la fin de février et 16 minutes au début de novembre. La population agricole, très majoritaire, n'a pas à s'en soucier jusqu'au XVIIIe siècle.

Les heures du jour et de la nuit

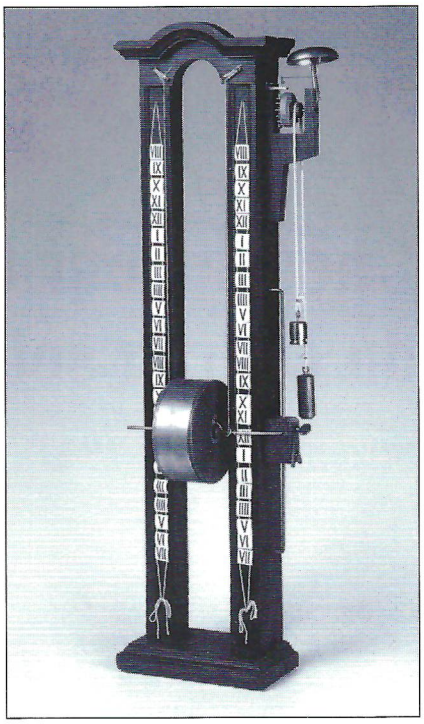
Le cadran solaire donne une précision qui peut atteindre la minute d'heure. Mais il présente un double inconvénient : même s'il bénéficie du meilleur emplacement possible, il ne peut servir que du lever au coucher du Soleil ; de plus, il exige un ciel clair. La clepsydre qui permet « d'interpoler le temps » ne fonctionne guère plus de 24 heures, si l'on désire un écoulement régulier ; elle nécessite donc une surveillance régulière.

Le Moyen-Age verra apparaître de gigantesques horloges mécaniques, avec entraînement à poids quand la technique aura maîtrisé la fabrication des roues dentées. Elles équiperont alors les châteaux, les beffrois, les clochers. Certaines d'entre elles, à Strasbourg, à Rouen ou à Prague par exemple, présentant des phénomènes astronomiques et actionnant des automates, seront des

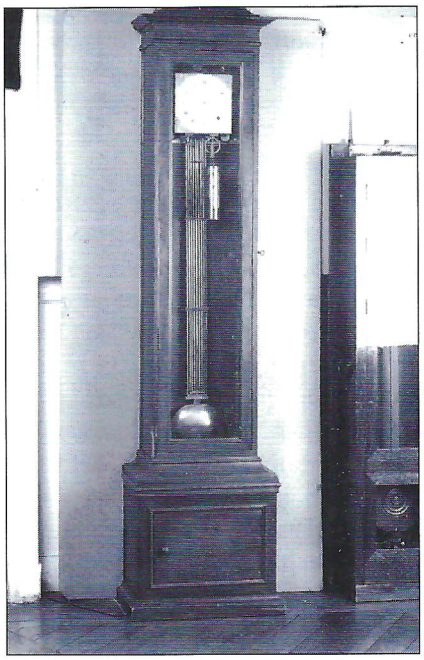
Horloge dite astronomique de Fardoil, Paris, ca 1705-1710
Cette horloge d'époque Louis XIV possède encore, sur la partie centrale de son cadran, la division en heures inégales : 12 heures de jour (partie en argent), 12 heures de nuit (partie bleu sombre avec étoiles). Sur la zone extérieure, les heures égales sont marquées par deux plages de douze heures chacune. Collection Observatoire de Paris.

merveilles de réalisations techniques. Les horloges publiques n'en détrôneront pas pour autant le cadran solaire, lequel permet de contrôler la régularité des ces horloges encore peu fidèles et, le cas échéant, de les remettre à l'heure.

Il faudra attendre la fin du XVIIe siècle et le pendule régulateur de Huygens (1629-1695) pour q'un progrès décisif s'introduise dans la conservation du temps. Pendant tout le XVIIIe siècle, l'homme de la ville ou l'homme des champs n'y sera guère sensible cependant que les scientifiques – grâce à leurs « horloges à pendules » -, décèlent différents phénomènes tributaires du temps : mise en évidence d'une valeur finie de la vitesse de la lumière (par Roemer (1644-1710) à Paris en 1676, découverte de l'aberration des « fixes » par Bradley (1693-1762) à Greenwich en 1728) (1)



Fac-similé d'une horloge à eau
Ce type de clepsydre, remontant au Ve siècle de notre ère, aurait été retrouvé par Dom Charles Vailley au XVIIe siècle et reconstruit en 1690. Le tambour comprend six compartiments dont les cloisons sont percées d'un petit trou. L'écoulement de l'eau entraîne la rotation du tambour dont l'axe se déplace et marque les heures de la journée. Fac-similé dû à l'Atelier R.T. de Souppes-sur-Loing, Collection Observatoire de Paris.



Régulateur de Ferdinand Berthoud, Paris, vers 1790.
Berthoud (1727-1807) a construit de nombreuses horloges équipées du pendule régulateur de Huygens (1629-1695), imaginé près d'un siècle plus tôt. Sous le cadran on voit à droite le poids et à gauche le balancier à gril ; ce dernier est composé de tiges réalisées en deux métaux différents, assurant une meilleure compensation des variations de sa longueur. Collection Observatoire de Paris.

(1) La propagation de la lumière paraît instantanée. C'est O. Roemer qui donna la première estimation correspondant au fait que la lumière a une vitesse « finie » de propagation, en interprétant un résultat astronomique : les phénomènes du voisinage de Jupiter (éclipses de ses satellites) sont observés à des intervalles présentant des irrégularités, se trouvant en avance ou en retard selon que la planète est proche ou éloignée de la Terre. Les différences constatées atteignaient dix minutes d'heure. L'aberration de la lumière est le phénomène qui déplace la direction apparente d'un astre par le fait que le vecteur-vitesse de l'observateur n'est pas dirigé vers l'astre : en première approximation, tout se passe comme si ce vecteur se composait avec le vecteur-vitesse de la lumière pour conduire à la direction apparente (c'est-à-dire observée). Celle-ci a donc, comme l'observateur lui-même, un mouvement annuel périodique, très faible et que seules des observations très précises de la position de l'astre permirent de déceler. En même temps se trouvait démontrée la réalité du mouvement de la Terre autour du Soleil correspondant au système héliocentrique de Copernic (1473-1543). Les mesures se font en déterminant la hauteur et le temps de passage d'astres au méridien du lieu.

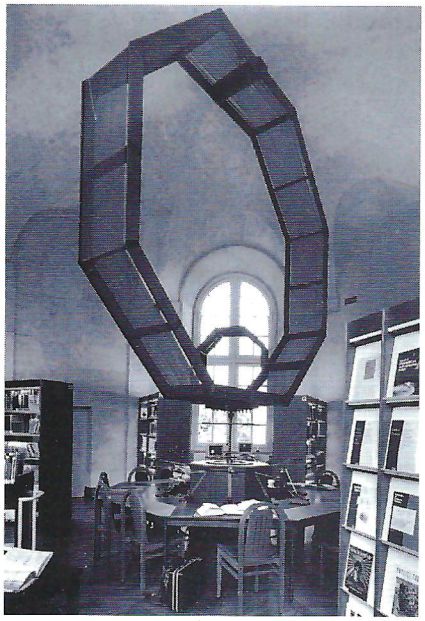
Dans les villes, si le besoin d'une heure scientifiquement correcte n'est pas grand, on commence à se préoccuper de l'incohérence des différentes horloges publiques, souvent répercutées par les sonneries de cloches. Des décisions sont prises localement. A Paris, l'unification de l'heure s'effectue en 1816, les horloges étant alors réglées sur le temps moyen du Méridien de l'Observatoire Paris. Celui-ci a été défini le 21 juin 1667 lorsque les astronomes de la toute nouvelle Académie des Sciences (créée en 1666) vinrent observer le passage du Soleil, au méridien de l'emplacement choisi, le jour du solstice d'été et poser la première.

L'heure d'un lieu à un autre

Les voyageurs ne manquaient pas de remarquer, s'ils se déplaçaient selon un parallèle, que les voyages paraissaient plus courts quand ils se rendaient vers l'Ouest que lors du retour. Cet effet dû à l'utilisation des heures locales, devint plus notable avec la réduction des temps de trajet entraînée par le développement du chemin de fer. Il était nécessaire que les horaires s'appuient sur une heure uniformisée au niveau du territoire, et qui soit connue du public.

Alors que la Grande-Bretagne, patrie du chemin de fer, fixe son heure nationale sur le Méridien de l'Observatoire de Greenwich dès 1848, il faudra attendre 1891 pour que la France prenne une décision analogue. « L'heure légale en France et en Algérie est l'heure, temps moyen de Paris », tel est le texte figurant dans la loi applicable au 15 mars 1891. Le temps solaire moyen du Méridien de Paris, défini par l'axe du bâtiment de l'Observatoire, devient l'heure nationale. Longtemps encore, villages et petites villes vivront à l'heure locale, l'intérêt de « l'heure à la gare » se réduisant à permettre de prendre le train « à l'heure ». Il en ira différemment dans les grandes villes, industrialisées, où l'usine imposera « son heure ».

Dans l'intervalle, églises et mairies se seront équipées d'horloges plus



Deux antennes installées en 1920 dans la Rotonde Est du Bâtiment Perrault de l'Observatoire de Paris.
Ces antennes servaient à la réception et au contrôle des signaux horaires, à l'époque où le Service de l'heure de l'Observatoire de Paris et le Bureau International de l'Heure s'y trouvaient installés. De nos jours, ces antennes ornent la Salle de lecture de la Bibliothèque. Cliché Observatoire de Paris.

fiables. L'électricité apportera avec le télégraphe devenu « électrique » les facilités de synchronisation, non plus seulement à l'échelle de Paris, mais aussi pour nombre de grandes villes à partir de l'horloge fondamentale de l'Observatoire de Paris.

Les besoins maritimes exigeaient une coordination au niveau mondial. Elle fut décidée en 1884, lors d'une conférence internationale tenue à Washington qui créa les fuseaux horaires et qui fixa à l'Observatoire de Greenwich le Méridien international. La France ne se ralliera à cette décision qu'avec la loi du 9 mars 1911 : « L'heure légale, en France et en Algérie, est l'heure temps moyen de Paris, retardée de 9 minutes 21 secondes ». Encore doit-on remarquer que le Méridien de Greenwich n'est pas mentionné, mais qu'au contraire, par la différence de longitude énoncée dans la loi, il se trouve implicitement rapporté au Méridien de l'Observatoire de Paris.

De son côté, la conservation de l'heure au niveau de l'utilisateur avait fait des progrès considérables depuis la fin du XVIIIe siècle : généralisation et banalisation des horloges à pendules ou « pendules », des pendules « de table » ou « de parquet », réalisation des montres de carrosse, de gousset, de voiture automobile, de poignet, etc. L'abaissement du prix de ces objets sera un facteur important de leur diffusion ; aujourd'hui on est parfois un peu surpris lorsque quelqu'un demande l'heure. Il est vrai que, de nos jours, l'heure « exacte » joue un rôle capital dans nombre de domaines.

L'accroissement permanent de la vitesse de déplacement des hommes accentue continuellement les besoins d'une heure précise, exacte, uniformément employée et disponible.

L'heure astronomique universelle

La télégraphie sans fil (la TSF du début du XXe siècle) a permis en France d'émettre et de recevoir des signaux horaires à l'Observatoire de Paris, via la Tour Eiffel, depuis 1910. La généralisation de cette procédure pour les comparaisons d'horloges entre les différents pays conduit, à l'issue de la Première Guerre mondiale, à la création d'un Bureau International de l'Heure.

Page du Bulletin de l'Association amicale du personnel scientifique des observatoires français, 1910-1914.
Les Leroy, grande famille d'horlogers, ont fabriqué plusieurs horloges de l'Observatoire de Paris, régulateurs et/ou horloges fondamentales à température et pression constantes. Cliché Observatoire de Paris.

Son siège est à l'Observatoire de Paris où il demeurera jusqu'en 1987. Jusqu'au début des années 60, il s'occupe des temps astronomiques et, particulièrement, du temps de la rotation de la Terre. Dès le début des horloges atomiques, il participe au Temps atomique. A la fin des années 60, il se voit confier le Temps Atomique International. Fin 1987, il est remplacé pour la partie astronomique, par le Bureau central d'un service international nouveau, l'International Earth Rotation Service ; ce Bureau central sera confié à la France dans une coopération entre l'Observatoire de Paris, l'Institut Géographique National et le Bureau des Longitudes. Quant à la partie temps atomique, elle a été transférée, en 1985, au Bureau International des Poids et Mesures, où elle concentre ses activités sur le Temps Atomique International (TAI).

Le Temps Atomique International a pris la suite du temps atomique intégré mis en place à partir de 1960, à l'Observatoire de Paris lorsque les étalons atomiques de fréquence (arrivés sur le marché de la science en 1955) ont conquis leurs lettres de noblesse dans la conservation du temps. Le TAI, est fondé sur les propriétés du césium, dont les atomes changent d'état énergétique dans le champ d'une cavité résonnante (dans le vide); le courant produit passe par un maximum lorsque la cavité est excitée exactement à la fréquence de la transition ; la détection de ce maximum va asservir un oscillateur (horloge) à quartz de telle sorte que la fréquence de ce dernier soit toujours constante et liée à celle de la transition atomique. Le TAI a pris le relais du temps des éphémérides, échelle de temps fondée sur la durée de l'année tropique laquelle (pour 1900 Janvier 0, à 12 heures de temps des éphémérides) contient 31 556 925,9 747 secondes (2). Cette échelle de temps déterminée principalement par observations lunaires a elle-même, pour une courte durée, remplacé un groupe d'échelles de temps universel (UT) qui ont reçu des dénominations officielles de la part de l'Union Astronomique Internationale en 1976.

L'échelle de temps des éphémérides paraissait, lors de son emploi, plus uniforme que UT0 (résultant de l'observation astronomique directe), UT1 (représentant la rotation proprement dite de la Terre car prenant en compte les effets du mouvement du pôle terrestre), UT2 (après corrections dues aux irrégularités saisonnières de cette rotation.)

Par le biais de l'évolution des sciences, les échelles de temps légal des différents pays se sont donc trouvées successivement fondées sur la rotation de la Terre, sur sa révolution autour du Soleil et, maintenant sur des échelles de temps atomique établies au niveau de ces pays. En France, le Laboratoire de l'Observatoire de Paris (BNM-SYRTE), dans une coopération entre l'Observatoire de Paris et le Bureau National de Métrologie, assure la détermination de l'échelle de temps atomique français TA(F) à partir des indications de ses propres horloges atomiques et de celles de différents laboratoires, comme celui de France Telecom. Au total une vingtaine de tels étalons concourent à cette détermination du temps atomique français ; ils participent aussi, avec plus d'une centaine d'autres étalons au TAI. Celui-ci diffère du Temps de la rotation de la Terre et la différence croît avec le temps ; cet effet est attribué à la planète Terre dont la rotation ralentit de manière séculaire.

Lorsque ce ralentissement atteint 0,9 seconde d'heure, une « seconde intercalaire » est introduite dans l'échelle du temps qui est alors appelée temps universel coordonné (UTC, pour Universal Time Coordinated). Le BNM-SYRTE établit, maintient et diffuse le temps légal français sous la forme UTC (OP) (voir l'article « Temps scientifique, temps public ») laquelle doit suivre, au mieux, UTC de manière à répondre aux besoins et aux usages nationaux et internationaux.

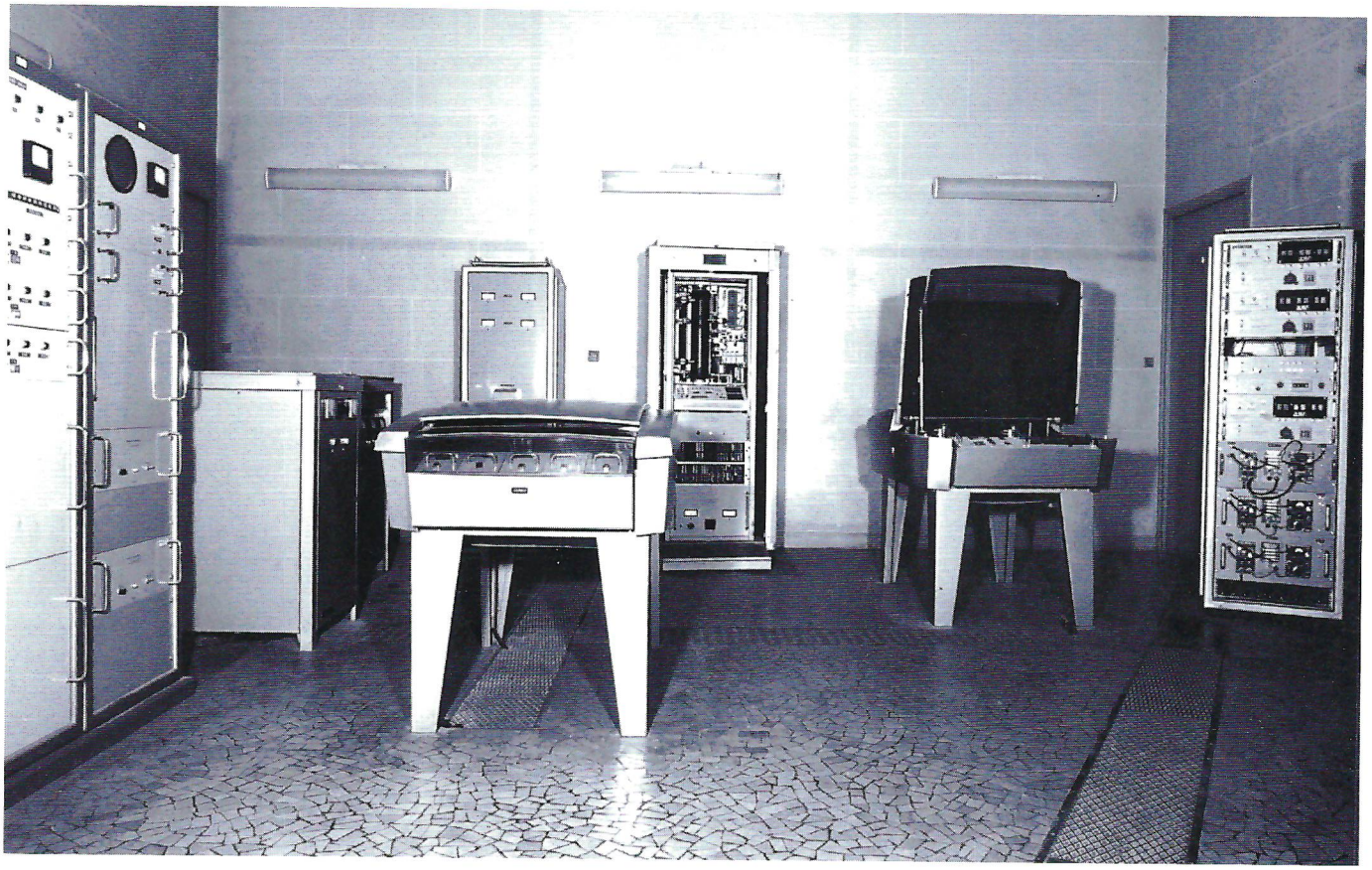
(2) La durée de l'année tropique varie, il faut donc fixer l'année tropique choisie comme référence. Le temps des éphémérides est une échelle de temps fournie par le mouvement de révolution de la Lune autour du Soleil.

Ernest Esclangon (1876-1954).
Esclangon est le père de la première horloge parlante au monde, installée à l'Observatoire de Paris et mise en service public le 14 février 1933 . Cliché Observatoire de Paris.

L'heure de l'horloge parlante

L'horloge parlante, dont le dernier modèle a été mis en service le 18 septembre 1991, est née de l'heureuse conjonction d'un problème technologique et d'une innovation technique propre à le résoudre. Son créateur, Ernest Esclangon (1876-1954), directeur de l'Observatoire de Paris depuis 1929, en expose ainsi l'origine, écrivant en 1933 : « A l'Observatoire de Paris... les demandes d'heure par téléphone étaient devenues si nombreuses, au cours de ces dernières années, que le service organisé à cet effet était lui-même devenu très important,... en même temps que très gênant pour les relations téléphoniques normales... » ; il préconise un peu plus loin : « La technique des films parlants... une méthode simple pour réaliser la distribution parlée et continue de l'heure, sous une forme claire et précise ».

Deux entreprises sont sur les rangs pour réaliser la partie parlante de la machine, celle d'Edouard Belin et la Maison Brillié. Cette dernière est retenue par Esclangon. La machine parlante est constituée d'un cylindre portant trois ensembles de bandes de film parlant : le premier pour l'énoncé des heures de 0h à 22h, le deuxième pour celui des minutes de 0min à 59 min, le troisième comportant les enregistrements correspondant à 10s, 20s, 40s puis l'énoncé



Salle des horloges parlantes, de nos jours Salle Esclangon, au rez-de-chaussée de l'Observatoire de Paris : *Au premier plan, d'une part et ouverte à gauche d'autre part, deux horloges (réalisation du Centre National d'Etudes des Télécommunications, CNET) mises en service en 1965. Au fond, au centre, une troisième horloge parlante verticale, fruit d'une collaboration entre le CNET (France Telecom) et l'Observatoire de Paris. Ces horloges ont été remplacées par les quatre modèles de l'année 1991. Collection Observatoire de Paris.*

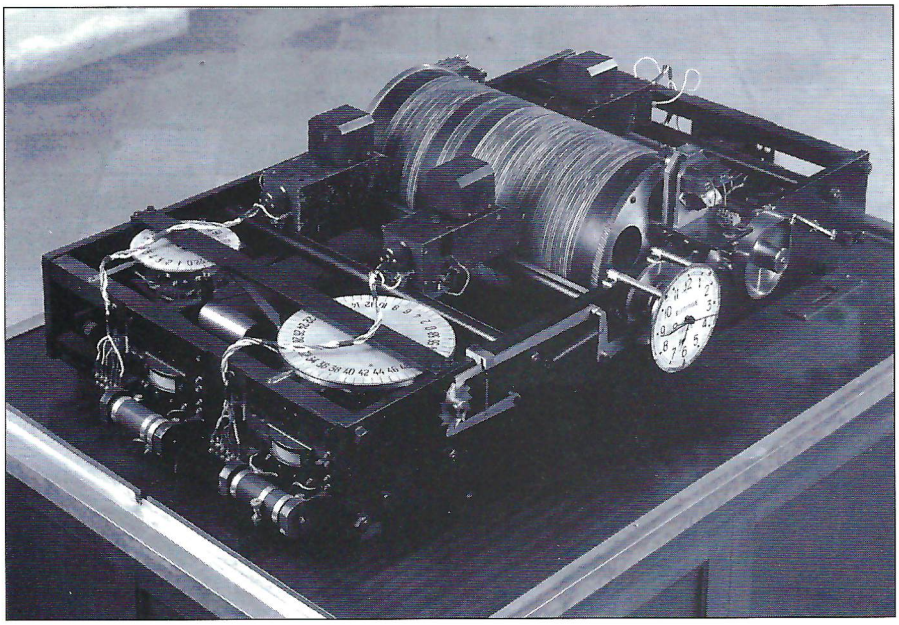
« Au quatrième top il sera exactement... ». Un ensemble de cellules photoélectriques permet la lecture des bandes et la reproduction du son ; leur positionnement assure l'enchaînement correct des indications horaires. Les tops secs, comme le demandait E. Esclangon, sont espacés d'une seconde et le zéro de chaque minute correspond au début du quatrième top. Ces tops proviennent, à l'époque, d'une horloge fondamentale de l'Observatoire de Paris maintenue à température et à pression constantes, sise dans les caves du sous-sol de l'établissement. La machine parlante, quant à elle, est installée au rez-de-chaussée du bâtiment de Claude Perrault, avec deux autres machines en secours.

Après trois mois d'essais à l'Observatoire de Paris, le service est ouvert au public le 14 février 1933. Laissons à nouveau la parole à Ernest Esclangon : « Tout de suite elle (il s'agit de l'horloge parlante) a connu un succès considérable. Vingt lignes avaient été prévues pour ce service. Elles furent immédiatement saturées. Plus de 140 000 demandes se produisirent le premier jour, elles ne purent être satisfaites que dans une faible proportion, puisque 20 000 abonnés seulement reçurent satisfaction ».

A partir de 1967, les tops fixant l'heure légale seront issus d'une horloge pilotée par un étalon atomique de fréquence de l'Observatoire de Paris en accord avec l'échelle de temps international. Mais la machine parlante du temps d'Esclangon commence à donner du souci aux services horaires de l'Observatoire de Paris : la partie mécanique souffre de son âge.

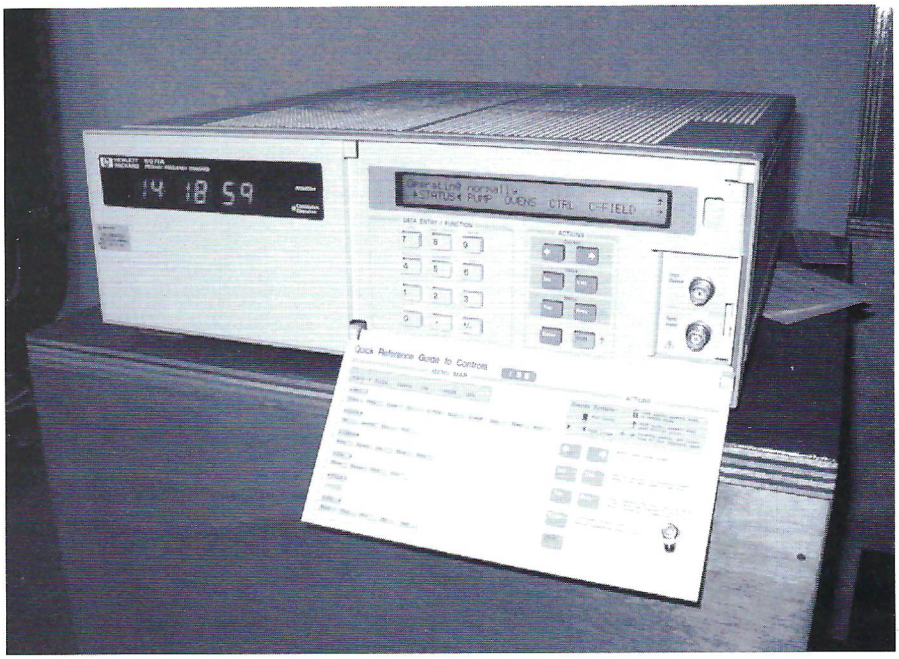
Au début des années 60, un incident émaille l'énoncé régulier de l'heure : une indication parlée erronée, non détectée par le personnel de surveillance est transmise. Il est décidé, sur le champ, de construire une nouvelle machine parlante. La tâche est confiée au Laboratoire de France-Telecom (CNET, Laboratoire National d'Etudes des Télécommunications). Partant du modèle Brillié 1933, le CNET réalise une version modernisée ; deux exemplaires sont mis en place en 1965 à l'Observatoire et remplacent progressivement le modèle de 1933 qui devient une pièce de musée. Six ans plus tard, une nouvelle machine, avec un cylindre vertical, viendra compléter l'ensemble ; elle est née d'une collaboration entre le CNET (pour la partie mécanique) et l'Observatoire (pour la partie électrique). La maintenance et la surveillance de l'horloge parlante sont assurées par le personnel du BNM-SYRTE.

Ces trois horloges parlantes, toujours installées dans la salle du rez-de-chaussée de l'Observatoire, ont conservé les principes mis au point par la Maison Brillié. Des améliorations avaient cependant été apportées par le CNET ou par le Service de l'heure de l'Observatoire de Paris : transistors au lieu des tubes électroniques, photo-diodes à la place de cellules photo-électriques, moteur synchrone relié à une horloge atomique à césium. Le remplacement, pour l'horloge verticale, des bandes de film 35 mm par des bandes de 16 mm, a réduit le diamètre du cylindre tandis que le



Horloge parlante de 1933 *: Cette horloge parlante est devenue pièce de musée en 1965. A l'époque de sa création, elle utilise la toute nouvelle technique du film parlant : des cellules photoélectriques lisent les messages enregistrés sur chaque bande du cylindre tournant. Les tops, en provenance de l'horloge pilote, sont insérés dans les indications parlées. Collection Observatoire de Paris.*

système de détection des pannes est devenu électronique.
Les informations des trois horloges sont, par ailleurs, comparées en permanence, en sorte que toute panne de celle se trouvant sur le réseau entraîne le passage sur la suivante, donnant au personnel du BNM-SYRTE le temps de venir en déterminer la cause, et y porter remède. L'ensemble permettait aussi la remise à l'heure après l'arrêt de l'une d'entre elles, les changements d'heure (selon les décisions gouvernementales) et les ajouts de secondes intercalaires (selon les décisions prises au Bureau International de l'Heure, puis au Bureau Central de l'IERS – International Earth Rotation Service).
Les besoins du public d'avoir une heure « exacte » et « précise » amèneront progressivement la vingtaine de lignes téléphoniques du temps d'Esclangon à plus de 150 liaisons au niveau des centraux téléphoniques, la liaison avec l'Observatoire de Paris demeurant spécialisée, comme le sont aussi celles vers différents organismes tels que la SNCF, EDF, Air-France...
Et si les avions partent assez rarement à l'heure prévue, ils n'en ont pas moins nécessité de connaître l'heure « exacte » pour les besoins de la navigation aérienne. Les trains, quant à eux, partent et arrivent généralement à la « seconde près » ou presque, gageure que les chemins de fer français semblent être les seuls à pouvoir tenir. Les besoins du public se trouvent plus généralement imposés par l'exactitude des horaires : machines à pointer des usines (dont certaines contrôlent plusieurs fois par jour leurs horloges), émissions radiophoniques démarrant à la minute prévue, certaines émissions télévisées suivies, trains de banlieue des grandes villes dont les horaires, ou la fréquence, nécessitent une grande exactitude...
Le 18 septembre 1991, une nouvelle horloge parlante a été mise en service public à l'Observatoire de Paris. La conception de la machine parlante a été réalisée par le laboratoire CNET de France Telecom. De nombreux essais ont été effectués tant au CNET qu'au BNM-SYRTE. La machine parlante est installée au premier étage d'un bâtiment de l'Observatoire de Paris sous la forme de quatre blocs indépendants de telle sorte que des relais soient assurés en cas de panne de l'un d'entre eux.
Les tops qui fixent l'heure légale française sont introduits, directement dans le circuit, à partir d'une horloge de l'Observatoire de Paris; leur élaboration, leur maintenance et leur diffusion font l'objet de l'article intitulé : « Temps scientifique, temps public ».
La précision du top, au départ du BNM-SYRTE est de 0,0001 seconde d'heure; les relais de transmission et la transmission téléphonique elle-même sur le réseau permettent d'assurer aux usagers une précision de 0,02 seconde. Existe-t-il sur le territoire de la France beaucoup d'usagers qui, dans le public actuellement, ont besoin d'une précision plus grande ?



Horloge à césium de l'Observatoire de Paris fournissant, actuellement, les tops horaires aux machines parlantes.
La Section Temps de l'Observatoire de Paris, incluse dans le laboratoire BNM/SYRTE, dispose de six telles horloges (plus deux masers à hydrogène) et détermine le Temps Atomique Français.

Temps scientifique, temps public

par Michel Granveaud
Observatoire de Paris

La réalisation du temps scientifique physique s'est profondément modifiée au cours des quarante dernières années, à la fois sur les plans conceptuels et technologiques. L'introduction de la seconde de temps atomique devenue officielle en 1967, a mis en avant la fréquence comme grandeur fondamentale : le temps physique est basé sur la répétition d'un processus (cycle d'un quartz, fréquence liée à une transition atomique...) et il s'oppose, en quelque sorte, au temps défini comme paramètre des équations, en dynamique astronomique.
L'amélioration des réalisations du temps et de sa mesure résultant de ces changements est remarquable : par exemple, l'imprécision de la réalisation et de la mesure d'un intervalle d'un jour a été divisée par un facteur supérieur à 10^8. Par ailleurs, les durées extrêmement petites ont été explorées avec le développement de générateurs d'impulsions ultra courtes (femtoseconde).

Les applications du temps scientifique, surtout par les aspects fréquence, se sont multipliées : en géodésie, en télécommunications... ; en métrologie des longueurs, la définition du mètre a été changée en 1983 pour tenir compte des progrès réalisés dans les générateurs de fréquence que sont les lasers.

Etalons de fréquence

L'étalon de fréquence à quartz est le générateur de fréquence le plus répandu. Il joue un rôle essentiel, soit seul comme source de fréquence, soit associé à une transition atomique pour réaliser un étalon atomique de fréquence par ses qualités de stabilité à court terme. Parmi les étalons atomiques de fréquence (rubidium, césium, maser à hydrogène), l'étalon à césium joue un rôle essentiel car il réalise la définition de la seconde et du hertz. Sur le plan métrologique, la qualité première est l'exactitude de fréquence; celle-ci atteint, pour un dispositif de laboratoire, 10^{-15}. A côté de développements en laboratoire, des générateurs de fréquence industriels à césium existent depuis 1957.

En 2002, le laboratoire BNM-SYRTE de l'Observatoire de Paris et du Bureau National de Métrologie disposent de trois fontaines atomiques à césium et un étalon à jet. Les dispositifs sont, dans leur catégorie, les plus performants au monde. Par ailleurs, le laboratoire est impliqué fortement dans le développement d'une horloge spatiale à atomes froids qui fonctionnera en 2006 sur la Station Internationale (projet PHARAO du CNES (Centre National d'Etudes Spatiales) et de l'Agence Spatiale Européenne). Une exactitude de quelques 10^{-16} est attendue pour cette horloge.

L'étalon atomique à rubidium, quant à lui, présente un compromis tout à fait intéressant entre le prix et la performance. Il est très utilisé dans l'industrie. Enfin, le maser à hydrogène est le dispositif le plus stable que l'on sache réaliser sur un plan industriel. Toutefois, sa production et son utilisation restent extrêmement limitées car c'est un appareil coûteux. Il est généralement utilisé pour des travaux scientifiques. Toutefois, en Russie, c'est un étalon commercial très employé.

Horloges et références de temps

Tous les étalons de fréquence mentionnés précédemment peuvent être utilisés en horloges. Ce sont essentiellement les étalons commerciaux à césium et à rubidium qui sont à la base des références de temps; ils réalisent un bon compromis performance/prix. En particulier, les laboratoires de métrologie qui fournissent les références officielles de temps sont équipés d'étalons à césium. Il existe une référence mondiale de temps atomique établie par le Bureau International des Poids et Mesures : il s'agit du Temps Atomique International ou TAI. Il s'appuie sur les mesures d'environ 200 horloges fonctionnant dans une cinquantaine de laboratoires.

En 1972, a été défini le Temps Universel Coordonné, UTC, compromis entre le TAI et le Temps Universel (UT) issu de la rotation de la Terre : il s'agit d'un temps atomique qui suit le UT à mieux que 0,9 s près, grâce aux secondes intercalaires. Il est à la base du temps légal de la France et de nombreux pays. En 2002 il existe 32 secondes d'écart entre TAI et UTC, ce qui traduit la divergence des temps atomique et astronomique, dûe au ralentissement de la rotation de la Terre.

Sur le plan national, le Laboratoire BNM-SYRTE de l'Observatoire de Paris a la responsabilité des références de temps et de fréquence. Il établit et met à la disposition des utilisateurs deux références de temps : l'une, le Temps Universel Coordonné de l'Observatoire de Paris, UTC (OP) est disponible en

temps réel, à travers la sortie d'un étalon commercial de fréquence à césium fonctionnant en horloge. Comme l'indique l'adjectif coordonné, des corrections sont appliquées au signal de sortie de l'horloge afin de maintenir le UTC (OP) près du Temps Universel Coordonné international établi par le Bureau International des Poids et Mesures. Elles sont de l'ordre de quelques dizaines de nanosecondes par jour. De plus, le temps UTC (OP) subit les sauts de secondes intercalaires de façon à ce qu'il soit coordonné avec le temps de rotation de la Terre. Réalisation pratique de UTC, il est la matérialisation du temps légal français. Il est disponible par divers moyens suivant la précision requise : horloge parlante (0,02s), temps codé de France Inter (1ms), signaux émis par des systèmes de navigation ou retransmis par des satellites...et la précision peut alors atteindre la nanoseconde ou mieux.

La deuxième référence de temps est un temps scientifique résultant des mesures d'un ensemble d'horloges atomiques fonctionnant dans plusieurs établissements français. Il s'agit d'un vrai temps atomique, contrairement au temps UTC (OP) qui résulte d'un compromis. Les qualités recherchées sont l'exactitude et la stabilité, c'est-à-dire des qualités métrologiques. Ainsi sur des intervalles d'un mois, la stabilité relative de la référence française de temps atomique est de quelque 10^{-15}, c'est-à-dire que les intervalles d'un mois diffèrent en moyenne de quelques nanosecondes. La référence du temps ainsi réalisée est une approximation du temps physique idéal. Il est clair que la qualité de cette référence est directement dépendante des étalons atomiques participant à son calcul.

Comparer pour sécuriser

Un aspect important du temps atomique est constitué par les comparaisons d'horloges. En effet, ces dispositifs sophistiqués peuvent avoir des défaillances et la seule façon de diminuer le risque de discontinuité d'une référence de temps atomique est de faire fonctionner plusieurs étalons en même temps et de les comparer régulièrement, voire de manière continue. Lorsqu'il s'agit d'horloges qui ne sont pas situées dans un même laboratoire, la méthode la plus générale consiste à recevoir quasi simultanément un signal radioélectrique transmis par un émetteur. En tenant compte de différentes corrections – corrections locales, corrections de propagation, corrections relativistes - on détermine l'écart de synchronisation existant entre les deux horloges qui pilotent les stations réceptrices.

Le développement des satellites artificiels a apporté des solutions nouvelles et intéressantes : ainsi par réception des signaux du système de navigation « Global Positioning System », on peut comparer deux horloges atomiques situées de part et d'autre de l'Océan Atlantique avec une précision de quelques nanosecondes. Dans quelques années, les satellites européens du système GALILEO ouvriront des possibilités de comparaison d'horloges. D'autres méthodes de comparaison ont été développées ; la plus simple est le transport d'une horloge en marche entre deux laboratoires ! Signalons une méthode en cours d'expérimentation : elle utilise les tirs de lasers sur un satellite, pilotés par les horloges des stations. Par rétroréflexion, une partie de l'énergie est renvoyée vers la station permettant une mesure de distance ; une autre partie de l'énergie sert à déclencher (ou arrêter) un intervallomètre qui est à bord du satellite. La précision attendue dans la comparaison des horloges est inférieure à la nanoseconde.

Le champ d'application des étalons atomiques de temps/fréquence est très large : l'étalon commercial à jet de césium qui était un objet de laboratoire est maintenant d'usage courant ; on estime à 10 000 leur nombre actuel. On les utilise dans les télécommunications, en géodésie, dans les applications spatiales, dans les armées ...et pour établir nos références de temps.

Le temps atomique fait partie de notre vie quotidienne : le top de l'horloge parlante est issu d'un étalon atomique à césium. On peut donc dire que l'horloge parlante fait la synthèse entre le temps scientifique et le temps public.

Lexique :

Nanoseconde :
10^{-9} en écriture scientifique, vaut un milliardième de seconde.

Picoseconde :
10^{-12}, millième partie d'une nanoseconde.

Femtoseconde :
10^{-15}, millième partie d'une picoseconde.

Maser :
Acronyme de Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation, c'est-à-dire amplification du signal incident grâce à l'émission stimulée. Cet effet est utilisé dans les masers à hydrogène.

Laser :
Acronyme de Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation.

Note : A l'occasion de l'exposition "Temps mesurés – Temps démesurés" de l'Observatoire de Paris (janvier – mars 2001), celui-ci a édité un petit catalogue illustré en noir et blanc que l'on peut acquérir auprès de Mme. P. Lautrer à l'Observatoire de Paris.

Quelques références :

• *Les fondements de la mesure du temps* par C. Audoin et B. Guinot, Masson, 1998.

• *Echelles de temps atomique* par M. Granveaud, Chiron, 1987

• *Le temps en sciences* par le CRDP de Paris, 1993

• *Le Bureau International de l'heure, 75 ans au service de l'heure universelle* par l'Observatoire de Paris, 1992

• *La mesure du temps* par B. Decaux et B. Guinot, PUF, Paris, 1969

• *Cadrans solaires de Paris* par A. Gotteland et Camus, CNRS Editions, 1997

• *Gnomonique moderne* par D. Savoie, Société Astronomique de France Edition, 1997

Le carbone dans tous ses états

Roger VESSIERE

Document aimablement fourni par Madame Vessiere

L'élément carbone, au centre de la ligne 2, colonne 4, de la classification périodique des éléments, joue un rôle particulièrement important en chimie puisqu'il est à la base de la chimie organique, d'ailleurs actuellement définie comme la chimie des composés du carbone.

Toute la chimie organique est, en effet, construite autour de cet élément, avec pour partenaires l'hydrogène, l'oxygène, l'azote, voire à un moindre titre, le soufre et quelques métaux.

On estime que 10^{200} molécules organiques différentes de masse molaire inférieure à 850 peuvent être construites. Pour situer ce type de nombre, rappelons que la surface de notre globe terrestre est, en millimètres carrés, d'environ 5.10^{20} – Or le nombre de molécules organiques décrites à ce jour est de l'ordre de 10^8. Il reste donc beaucoup à faire !!!

Par ailleurs le carbone est susceptible de s'organiser en structures plus ou moins ordonnées dont il est le seul constituant. Les plus connues sont le graphite et le diamant, mais, depuis la fin du siècle précédent, d'autres assemblages fascinants du carbone ont été découverts comme les fullerènes et les nanotubes de carbone.

Chez l'atome de carbone 6 électrons gravitent autour du noyau avec la répartition $1s^2\ 2s^2,\ 2p^2$.

Dans cet état le carbone apparaît comme étant bivalent c'est-à-dire susceptible d'engager deux liaisons comme c'est le cas chez le monoxyde de carbone CO, ou encore, chez les carbènes CH_2 ou CCl_2, espèces à courte durée de vie.

Toutefois, dans la presque totalité des molécules organiques le carbone est tétravalent : tel est le cas chez le méthane CH_4, le plus simple des corps organiques. Pour lever cette difficulté on admet alors que le carbone se trouve dans un état électronique différent de son état fondamental, un électron de la sous-couche 2s passant sur la sous-couche 2p :

$1s^2\ 2s^1,\ 2p^3$

On parle alors quelquefois d'état excité. (Rappelons que dans le modèle ondulatoire une case quantique représente une orbitale atomique).

Dans cet état le carbone est, en principe, susceptible d'engager quatre liaisons puisque disposant de quatre électrons célibataires. (La formation d'une liaison correspond au recouvrement de deux orbitales atomiques pour former une orbitale moléculaire ; le recouvrement pouvant être axial, on forme alors une liaison sigma (σ) , ou latéral on parle alors de liaison pi (π)).

Toutefois on se heurte à une nouvelle difficulté : en effet le carbone devrait alors engager trois liaisons orthogonales par l'intermédiaire des trois orbitales 2p d'axes perpendiculaires, la quatrième liaison, celle résultant du recouvrement de l'orbitale 2s, devant être de direction quelconque puisque les orbitales s sont de symétrie sphérique. Or on sait que chez le méthane, par exemple, les quatre liaisons CH sont équivalentes et dirigées depuis le centre d'un tétraèdre régulier vers les quatre sommets, formant donc des angles valentiels de 109°28'.

Pour lever la difficulté on admet alors que le carbone engage ses liaisons par l'intermédiaire d'orbitales hybrides résultant de la réorganisation des orbitales pures s et p ; c'est ce que l'on appelle la théorie de l'hybridation.

Lorsque le carbone est tétrasubstitué, comme c'est le cas chez le méthane, on admet qu'il engage ses liaisons par recouvrement de 4 orbitales identiques sp^3 provenant de la réorganisation de l'orbitale s avec les 3 orbitales p pour former 4 orbitales sp^3 identiques dont les axes pointent depuis le centre d'un tétraèdre régulier vers les 4 sommets.

Lorsque le carbone est tri-substitué, comme c'est le cas chez l'éthylène $CH_2{=}CH_2$, on postule que le carbone est dans l'état d'hybridation sp^2, une orbitale s fusionnant avec 2 orbitales p pour donner 3 orbitales sp^2, dont les axes sont coplanaires et dirigés à 120° les uns des autres. L'orbitale p pure pointe alors perpendiculairement au plan des 3 orbitales sp^2.

Par exemple chez l'éthylène, chaque carbone assure 3 liaisons sigma (σ) (recouvrement axial), par l'intermédiaire des trois orbitales sp^2, deux avec les hydrogènes, la troisième avec le carbone voisin ; il reste alors sur chaque carbone une orbitale p pure perpendiculaire au plan des orbitales sp^2. Ces orbitales p se disposent pour que leurs axes soient parallèles, ce qui permet un recouvrement latéral, c'est-à-dire la formation d'une liaison pi (π). Ainsi la molécule d'éthylène est plane avec des angles valentiels de 120°.

Lorsque l'atome de carbone est bi-substitué, comme c'est le cas, par exemple, chez l'acétylène, il s'hybride en sp^1, l'orbitale 2s se mixant avec une orbitale p pour donner deux orbitales sp^1 colinéaires (formant un angle de 180°). Chaque carbone engage alors deux liaisons sigma (σ)

avec un hydrogène et le carbone voisin, les orbitales p pures, orthogonales entre elles, permettant, par recouvrement latéral, la formation de deux liaisons pi (π).

Revenons maintenant au carbone, ce dernier existe sous trois formes dites variétés allotropiques ou, si l'on préfère, sous trois formes cristallines douées de propriétés différentes : le diamant, le graphite et les fullerènes ; (le carbone amorphe et la suie qui sont des mélanges ne peuvent pas être considérés comme étant des variétés allotropiques.)

Le noir de carbone n'est pas une véritable variété allotropique puisque la microstructure révèle des cristaux de graphite à côté d'atomes de carbone non ordonnés. On distingue par ailleurs le charbon actif et la suie.

Le charbon actif est voisin du noir de carbone ; il est également formé d'un assemblage désordonné d'atomes de carbone et de minuscules cristaux de graphite, il est poreux, chimiquement actif. Le grand nombre de micropores lui confère une surface intérieure extrêmement étendue d'environ 1000 m^2 par gramme avec une capacité d'absorption correspondante.

La suie est du carbone en fines particules avec H_2, O_2, N_2 et S chimiquement liés ; le carbone y forme des assemblages proches du graphite ; la surface de contact est grande, environ 100 à 1000 m^2 par gramme.

Dans la variété dite **Diamant** les atomes de carbone hybridés en sp^3 forment un réseau tétraédrique où chaque carbone est uni à quatre autres atomes de carbone par quatre liaisons (σ) sigma ; liaisons de grande énergie environ 400 kilojoules par mole ; en conséquence la cohésion du cristal de diamant est très forte, ce qui justifie sa grande dureté et son point de fusion très élevé (environ 3 500°C). En outre tous les électrons étant localisés et fortement liés, le diamant n'est pas conducteur d'électricité.

Il est intéressant de noter que le carbure de silicium possède la même structure, un atome de carbone sur deux étant remplacé par un atome de silicium ; le carborundum, appellation du carbure de silicium, est comme le diamant, très dur et, pour cela, utilisé comme abrasif.

Le diamant existe, vous le savez, à l'état naturel : les cristaux de diamant se forment et subsistent dans le manteau terrestre entre 150 et 1 000 km de profondeur. Il faut, alors, des circonstances particulières et multiples pour que les diamants soient acheminés à la surface de la terre. Ceci explique que les gisements diamantifères ne se trouvent que dans quelques endroits particuliers.

Ce fut, par exemple, le cas lors du volcanisme dit Kimberlitique (région de Kimberley en Afrique du Sud). Mais ceci est du domaine du géologue et non du chimiste, aussi je n'en dirai pas plus.

Les mécanismes de formation des diamants dans la nature sont variés. Le plus souvent ils prennent naissance dans des conditions drastiques de pression et de température ; c'est le cas dans le manteau terrestre où la pression est supérieure à 50 000 bars et la température de l'ordre de 1 500°C. Mais ces circonstances extrêmes ne sont pas l'apanage du centre de la terre, par exemple, lors de l'impact d'un astéroïde à la surface de la terre, l'onde de choc qui se propage sur la croûte terrestre augmente brièvement la température et la pression, et dans de telles roches choquées on trouve quelquefois des petits diamants (tel est le cas pour les diamants trouvés à RIESA en Allemagne).

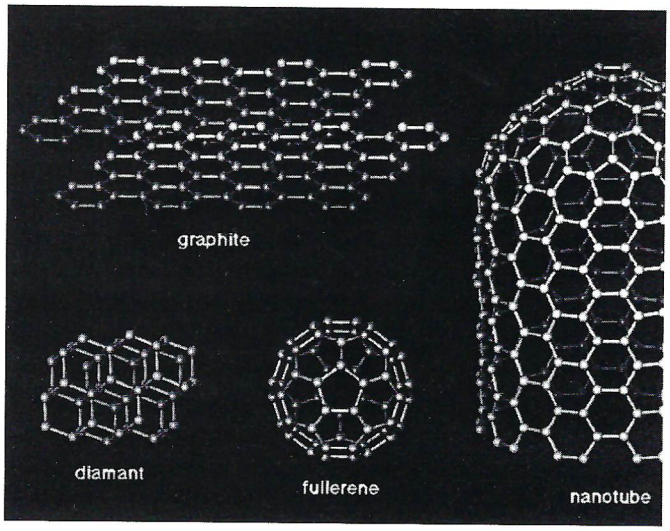
On trouve également des diamants dans certaines météorites ; ils y naissent, par exemple, lors d'un choc violent entre météorites, ce qui peut créer les conditions de température et de pression nécessaires. Ils peuvent, par ailleurs, se former dans des conditions fort différentes ; il en est ainsi lors d'une condensation de vapeur carbonée à relativement basse température et basse pression, conditions qui règnent dans les enveloppes gazeuses des étoiles géantes.

Des diamants synthétiques sont fabriqués depuis 1955 selon un procédé mettant en jeu une très forte pression, de l'ordre de 50 000 bars et une température minimale de 2 000°C. Par ailleurs, dans les dernières années du vingtième siècle on a mis au point un nouveau procédé dit C.V.D. (Chemical Vapor Deposition) qui consiste à chauffer à moins de 1 000°C un mélange de méthane et d'hydrogène sous basse pression ($1/10^e$ de bar environ). On obtient ainsi du diamant sous forme de film, de fibre, de poudre.

Le Graphite est formé d'atomes de carbone disposés sur des réseaux plans parallèles constitués d'hexagones. Le carbone est ici dans l'état d'hybridation sp^2.

Chaque carbone engage trois liaisons sigma (σ) par recouvrement axial de ses trois orbitales sp^2 avec les orbitales sp^2 des carbones voisins ; il reste sur chaque carbone une orbitale p pure perpendiculaire au plan ; ces orbitales parallèles entre elles donnent lieu à un recouvrement global ainsi les électrons sont délocalisés sur l'ensemble du système C-C. Cette délocalisation dans le réseau implique une absorption totale, c'est la raison pour laquelle le graphite est noir. Chaque plan constitue un système non saturé conjugué dans lequel les électrons (π) pi sont délocalisés. Les atomes d'un même plan sont fortement liés par covalence et proches les uns des autres (0,14nm), toutefois la cohésion entre les plans n'est pas très forte, elle est assurée par des forces d'interaction faibles du type force de London, aussi la distance entre les plans est relativement grande (0,33 nm). Il en résulte que, contrairement au diamant, le graphite est tendre car les plans d'atomes de carbone peuvent facilement glisser les uns sur les autres. Ce qui explique que l'on utilise le graphite pour les mines de crayon et comme lubrifiant sous forme de poudre additionnée à des huiles de graissage. Par ailleurs la très forte délocalisation des électrons (π) pi chez le graphite fait que ce dernier est conducteur de l'électricité. (A ce sujet il est intéressant de noter que la conductivité est 104 fois plus grande dans une direction parallèle au plan des atomes que dans une direction perpendiculaire : les électrons passent, en effet, difficilement d'un plan à un autre.

Chez la troisième variété allotropique du carbone **les Fullerènes** la situation est très différente de celle commune au diamant et au graphite, en effet si le graphite et le diamant constituent des systèmes atomiques, les fullerènes sont des systèmes moléculaires. Quant à l'état d'hybri-



Les formes allotropiques du carbone

dation du carbone, il est chez les fullerènes proche de celui caractéristique du graphite, c'est-à-dire de l'état sp^2.

L'existence de molécules constituées par de longues chaînes d'atomes de carbone avait été suggérée par des chimistes théoriciens soviétiques dans les années 60-70 pour justifier les propriétés du rayonnement de l'espace interstellaire. Il s'agissait d'expliquer certaines anomalies observées dans les bandes d'absorption et d'émission du rayonnement de la matière interstellaire dont les spécialistes ne parvenaient pas à déterminer l'origine et, par ailleurs, de comprendre la chimie du carbone dans les étoiles Géantes Rouges.

Ceci devait alors exciter la curiosité des chimistes et les motiver pour rechercher de nouvelles structures carbonées.

Les premiers résultats ne devraient pas se faire attendre : en 1985 une équipe anglo-américaine dirigée par H. KROTO et R. SMALLEY réussit, pour la première fois, à fabriquer de nouvelles formes de carbone qu'ils baptisent FULLERENES, en raison de la forme de leurs molécules qui ressemblent aux dômes construits par l'architecte américain R. BUCKMINSTER FULLER.

Celui-ci avait conçu dans les années 50 un style architectural à base de dômes géodésiques constitués de pentagones et d'hexagones. Le pavillon des Etats-Unis à l'exposition universelle de Montréal en 1967 ou la géode de la Cité des Sciences à Paris sont des exemples de ce type d'architecture.

L'archétype des molécules isolées par KROTO et SMALLEY est la molécule dite C_{60}, formée de 60 atomes de carbone disposés aux sommets d'une structure composée de 12 pentagones et 20 hexagones, analogue à un ballon de football, d'où le nom de FOOTBALLENE donné aussi à cette molécule (encore, par ailleurs, désignée par le nom familier de BUCKYBALL).

Le procédé utilisé par SMALLEY et Coll pour synthétiser ces molécules consistait à attaquer, dans une enceinte remplie d'hélium, un disque de graphite à l'aide d'un faisceau laser. Les atomes de carbone ainsi libérés se regroupent pour former diverses molécules et, en particulier, le C_{60}. Toutefois le rendement du procédé est médiocre.

En 1990, W. KRATSCHMER et Coll. puis en 1991 R.E. HAUFLER mettaient au point un procédé beaucoup plus simple, permettant d'accéder, avec des rendements meilleurs, à la molécule C_{60} et à quelques uns de ses homologues supérieurs. Il consistait à faire éclater, toujours dans une enceinte remplie d'hélium un arc électrique entre deux barreaux de graphite et à récolter la suie déposée sur les parois du réacteur ; celle-ci est ensuite l'objet d'un traitement par chromatographie sur colonne d'alumine ce qui permet d'isoler, chimiquement purs, les différents constituants du mélange et, en particulier, les molécules C_{60} et C_{70}. (Ces molécules sont solubles dans les solvants organiques classiques).

La molécule C_{60}, produit principal de la réaction, a été la première étudiée. Par spectroscopie de masse on a évalué sa masse molaire, à savoir 720, ce qui correspond à 60 atomes de carbone. La forme sphérique de la molécule a été établie par microscopie à effet tunnel. Les caractéristiques physico-chimiques ont été déterminées par les méthodes classiques : spectroscopie IR et visible, spectroscopie Raman, spectroscopie de Rayons X, R.M.N. 13C. Dans ce dernier cas on observe une seule raie fine, ce qui prouve l'équivalence de tous les carbones donc la sphéricité de la molécule. En I.R. comme en Raman, on observe seulement un petit nombre de bandes d'absorption, ce qui confirme la haute symétrie de la molécule C_{60}.

Les 60 atomes de carbone sont répartis à la surface d'une sphère creuse de 0,71 nm de diamètre, formant un icosaèdre tronqué dont les faces sont 12 pentagones et 20 hexagones, chaque pentagone est entouré de 5 hexagones. Chaque atome de carbone est commun à 1 pentagone et 2 hexagones.

La longueur des liaisons est de 0,145 nm pour les pentagones et 0,14 nm pour les hexagones, valeurs intermédiaires entre celle de la simple liaison 0,154 nm et celle de la double liaison 0,134 nm. On peut écrire une structure de résonance avec 30 doubles liaisons et 60 simples.

La molécule C_{60} se décompose aux environs de 1 200° (Le livre « De divina proportione » de Fra Lucia PACIOLINI contient une illustration représentant une cage en forme d'icosaèdre tronqué correspondant précisément à la structure du C_{60}.

Pour la molécule C_{70} les résultats des données spectroscopiques, et en particulier de la R.M.N., donnent à penser que la molécule n'est plus de symétrie sphérique mais se rapproche plutôt de la forme d'un ballon de rugby.

Pour cette molécule la théorie prévoit cinq types de liaison possibles entre les atomes de carbone ; ceci est parfaitement vérifié par le spectre de R.M.N. 13C où l'on observe cinq raies de résonance. Les spectres I.R. et Raman présentent un nombre de bandes d'absorption plus élevé que chez la molécule C_{60}, ce qui est en accord avec la forme ovoïde postulée. La molécule C_{70} serait formée de 12 pentagones et 25 hexagones.

En 1993, les fullerènes C_{60} et C_{70} ont été, par ailleurs, obtenus en sublimant du graphite dans un four solaire construit à cet effet par le C.N.R.S. à ODEILLO ; le rendement du procédé est encore modeste (20 pour cent), mais on pense pouvoir l'améliorer par l'emploi d'un four plus puissant

(1 000 kW) que l'on construit actuellement.

Des roches à l'espace interstellaire. Les fullerènes C_{60} et C_{70} ont été trouvées à l'état de traces dans des roches datant du précambrien (600 millions à 4 milliards d'années). Ces roches portent le nom de shungite (de SHUNGA, ville russe à 400 km au N.E. de St. Peters bourg).

L'espace interstellaire contient, sans aucun doute, des substances carbonées et, vraisemblablement différentes associations d'atomes de carbone dont des fullerènes. Preuve en est : on a découvert des fullerènes dans un petit cratère provoqué par le choc d'une petite météorite sur la paroi d'un satellite en orbite autour de la terre et récupéré par la navette spatiale.

Il convient aussi de signaler que l'on a également obtenu dernièrement les molécules C_{76}, C_{78}, C_{82}, C_{84}.

Revenons à la molécule C_{60}, la plus étudiée. Ses propriétés chimiques mettent en évidence son insaturation.Son hydrogénation conduit à une molécule stable C_{60} H_{36} de même que sa fluoration qui fournit le dérivé C_{60} F_{36} ; ces dérivés d'addition constituent des matériaux d'une remarquable stabilité à haute température puisqu'ils résistent jusqu'à 500°C. Notons que ce caractère d'insaturation confère au C_{60} un certain caractère aromatique confirmé par la valeur de longueur de la liaison C – C environ 0,140 nm proche de la valeur observée chez le benzène par exemple.

Les fullerènes se prêtent facilement à la formation de composés d'inclusion dans lesquels un métal se trouve inséré en leur centre ; ces derniers se comportent comme des fullerènes dopés ; par exemple, on a préparé les composés K_3 C_{60}, Rb_3 C_{60}, Cs_3 C_{60} qui se sont révélés supraconducteurs jusqu'à des températures relativement élevées (17, 28, 33K respectivement). De nombreuses études sont poursuivies dans ce domaine. On a également pensé que cette aptitude à pouvoir se comporter comme des molécules « cage » pouvait être utilisée, soit pour y placer des molécules biologiquement actives qui seraient lentement diffusées dans le corps (certains dérivés des fullerènes manifestent une activité pharmacologique intéressante comme inhibiteur du V.I.H.), soit pour piéger des éléments toxiques dans leur cavité.

Par ailleurs, la grande stabilité des fullerènes permet de les inclure facilement dans d'autres matériaux en particulier des polymères ou fibres de carbone ; on a ainsi fabriqué des films photoconducteurs ; l'irradiation de ces films par la lumière entraîne, en moins de 10 millisecondes l'apparition d'un courant stationnaire, lequel dépend fortement de la concentration en oxygène fixé par le fullerène C_{60}. Cette propriété pourrait permettre d'améliorer la sensibilité des oxymètres et de les miniaturiser.

Dans un domaine très différent, et toujours à titre d'exemple, on cherche à utiliser les fullerènes pour la préparation de superlubrifiants : chaque molécule formant une bille microscopique il devrait, en principe, suffire de diminuer quelque peu les interactions moléculaires pour obtenir le résultat escompté. Ainsi on a préparé la molécule C_{60} F_{60} avec l'espoir d'obtenir un super téflon ; ce ne fut pas le cas et, dans ce domaine, comme dans d'autres, les espoirs ont été déçus.

Toutefois les recherches se poursuivent pour trouver des applications à ces fascinantes molécules.

Actuellement plusieurs équipes de recherche s'intéressent à la possibilité d'utiliser ces molécules comme composants électroniques ; par exemple le C_{60} a été utilisé pour construire le premier transistor moléculaire : la compression exercée sur la molécule sphérique par la pointe d'un microscope à effet tunnel module le passage du courant électrique à travers le circuit (schéma p.20 « La Recherche » Nov. 2001).

Cependant, les applications pratiques tardant à venir, l'enthousiasme pour le footballène retombait peu à peu ; fort heureusement la découverte des nanotubes, homologues supérieurs des C_{60} – C_{80}, devait susciter de nouveaux espoirs pour accéder à des réalisations intéressantes.

Toutefois, avant d'aborder ce sujet, je voudrais vous dire quelques mots sur les homologues inférieurs de la molécule C_{60}, ne serait-ce que pour rendre hommage à l'imagination fertile et à la merveilleuse habileté des chimistes pour synthétiser des molécules, en apparence, inaccessibles.

La molécule C_{20}, le plus petit fullerène jusqu'à ce jour isolé, a pu être synthétisée à partir du dodécaéohane, un hydrocarbure stable formé de 20 atomes de carbone et 20 atomes d'hydrogène C_{20} H_{20}. Dans un processus en deux étapes les atomes d'hydrogène ont été substitués par des atomes de brome, lesquels présentent avec le carbone une liaison plus fragile que la liaison C – H. Les Br ont été ensuite éliminés pour donner naissance au C_{20}. Les contraintes exercées dans cette molécule sont évidemment très grandes et tendent à briser les liaisons C – C, aussi sa durée de vie est très courte, environ 1/4 de seconde. Les 20 atomes de carbone forment 12 pentagones, la molécule ne comporte pas d'hexagones. La formation de cette molécule est accompagnée de celle de deux isomères non moins remarquables, l'un en forme d'anneau, l'autre en forme de bol.

$$C_{20}H_{20}+16Br_2 \rightarrow C_{20}HBr_{13} + 19HBr$$

$$C_{20}HBr_{13} \rightarrow C_{20} + HBr + 6Br_2$$

Le dérivé bromé a une structure de cyclotriène.

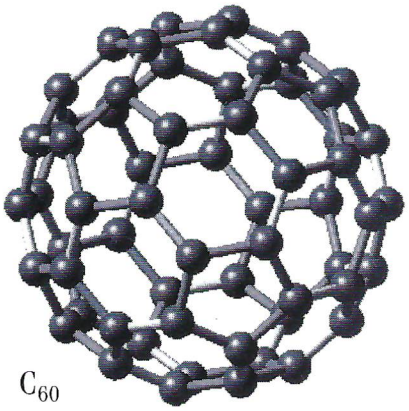
Les nanotubes

L'histoire de ces macromolécules débute en 1991. Un Japonais Sumio IIJIMA remarque par observation au microscope électronique, dans la suie obtenue par évaporation du graphite, de minuscules tubes de carbone pur. Il s'agit de macromolécules longues et fines formées de carbone pur et aussi ordonnées que des cristaux. On les nomme « nanotubes ». Elles vont faire l'objet de très nombreuses études tant au Japon qu'aux Etats-Unis ou en Europe.

Les premiers nanotubes observés par IIJIMA étaient des tubes à parois multiples : chaque nanotube contenant plusieurs cylindres creux imbriqués les uns dans les autres, un peu à la manière des poupées russes. Chaque cylindre est fermé à ses extrémités par deux capsules coniques ou polyédriques, six pentagones apparaissant dans chacune des capsules terminales. Leur diamètre peut varier de quelques nanomètres à plusieurs dizaines, leur

longueur est très variable, en principe non limitée. Ils sont, comme leurs cousins, les footballènes, de structure très stable.

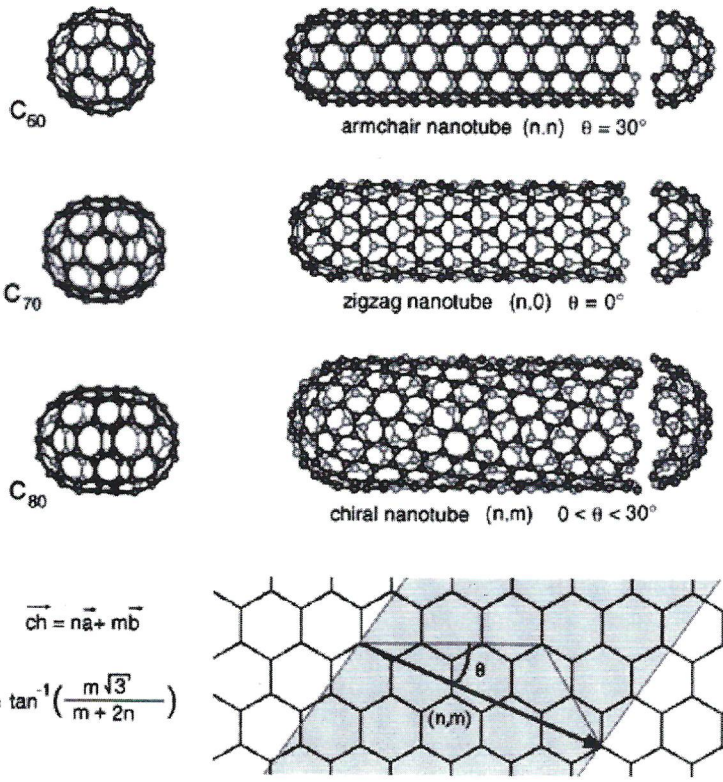
Les nanotubes à parois multiples sont quelquefois ouverts à leur extrémité, dans ce cas, sur chaque tube, les hexagones d'atomes de carbone sont disposés en hélice autour de l'axe du tube dont le diamètre extérieur peut aller de quelques nanomètres à plusieurs dizaines de nanomètres.



En 1992 IIJIMA et BETHUME de la Société I.B.M. créèrent des nanotubes à paroi unique, c'est-à-dire constitués d'une seule couche d'atomes de carbone. Ces macromolécules ont un diamètre d'un nanomètre sur une longueur de plusieurs milliers de nanomètres.

Les nanotubes à paroi unique sont généralement fermés à leur extrémité mais on peut les ouvrir par une réaction d'oxydation.

Dans les nanotubes les carbones forment des hexagones comme chez le graphite, donc sont dans un état proche de l'hybridation sp^2 et on peut dire qu'un nanotube ressemble à une feuille de graphite dont on aurait fait un cylindre sans soudure.



Actuellement il existe trois techniques pour fabriquer des nanotubes ; les trois méthodes produisent toutefois des mélanges de tubes de longueur et de torsion variées et qui, malheureusement, possèdent de nombreux défauts.

1. Le procédé EBBENSEN – AJAYAN

Il consister à placer deux barres de graphite à quelques millimètres l'une de l'autre, sous atmosphère inerte, et à leur appliquer une forte tension. Lorsqu'une étincelle de 100 ampères jaillit entre les deux barres, le carbone se vaporise en plasma chaud, les atomes se recombinant sous forme de nanotubes. (Une électrode – l'anode – se consume pour former un plasma chaud à environ 6 000°C).Le rendement est de l'ordre de 40 % en masse. Les tubes formés par ce procédé sont, généralement, relativement courts, leur taille et leur orientation sont aléatoires.

2. Le procédé ENDO

Il est dû à un Japonais MORINUBO ENDO. On dispose un substrat dans un four chauffé entre 500 et 1 100°C et on envoie un lent courant de méthane (ou autre hydrocarbure gazeux), le gaz, en se décomposant, libère des atomes de carbone qui se combinent de nouveau sur le substrat sous forme de nanotubes ; dans ce procédé il est possible de contrôler la croissance des tubes par l'emploi de catalyseurs adéquats. Le rendement est de l'ordre de 20 %. Ce procédé est simple et devrait permettre un développement industriel. Il est, par ailleurs particulièrement intéressant car les nanotubes formés sont suffisamment longs pour être utilisés dans des composites. Malheureusement, là encore, les nanotubes formés sont, le plus souvent, à parois multiples et leur résistance est plus faible que celle des tubes fabriqués à l'arc électrique.

3. Le procédé SMALLEY

Il consiste à vaporiser des barres de graphite au moyen d'un faisceau laser de très forte intensité ; les atomes de carbone libérés se combinent à nouveau sous forme de nanotubes ; l'emploi d'un catalyseur approprié permet d'orienter la recombinaison vers des systèmes à paroi unique. Le rendement est élevé (70 %) mais la méthode est coûteuse puisque nécessitant l'emploi d'un laser.

Nouvelles méthodes de préparation des fullerènes et nanotubes

Actuellement, plusieurs équipes de recherche proposent de préparer les fullerènes et nanotubes à partir du charbon. Deux procédés ont été expérimentés. Le premier consiste à réaliser une pyrolyse du charbon au moyen d'un faisceau laser, le second à utiliser un arc à plasma avec une anode de charbon. On peut orienter préférentiellement la réaction vers la formation de fullerènes ou de nanotubes en faisant appel à divers catalyseurs. Toutefois le procédé est entaché par la formation de composés aromatiques polycycliques (naphtalène en particulier).

Propriétés des nanotubes

Les propriétés des nanotubes sont remarquables, voire étonnantes.

• Tout d'abord leur taille : leur diamètre est généralement compris entre 0,6 et 1,8 nanomètre : à titre de comparaison la lithographie par faisceau électronique peut créer des lignes de 50 nm de large et de quelques nm d'épaisseur.

• La masse volumique des nanotubes est de l'ordre de 1,38 gramme par cm^3, toujours à titre de comparaison celle de l'aluminium est 2,7 g par cm^3.

• La résistance mécanique des nanotubes est très grande : 4,5 milliards de pascals ; les alliages les plus résistants se brisant aux environs de 2 milliards de pascals.

• Leur élasticité est exceptionnelle : ils peuvent facilement être courbés sans déformation irréversible, alors que les fibres de carbone ou les métaux se fracturent au niveau des limites entre les grains.

• Leur capacité de transport du courant électrique est considérable, on l'estime à 1 milliard d'ampères par cm^2 alors que les fils de cuivre grillent à 1 million d'ampères par cm^2.

• Leur pouvoir à transmettre la chaleur : 6 000 watts par mètre et par kelvin est supérieur à celui du diamant : 3 200 $W.m^{-1}.K^{-1}$

• Leur stabilité thermique est également considérable : ils sont stables jusqu'à 2 500°C dans le vide, 750°C dans l'air ; les fils métalliques des micro-puces fondent entre 600°C et 1 000°C.

• Enfin leur prix : actuellement on l'estime à 5 000 F (environ 760 Euros) le gramme ; l'or vaut actuellement environ 70 F le gramme.

Les premières applications des nanotubes reposent sur leurs propriétés électriques : les voitures de la General Motor sont déjà équipées de pièces en plastique qui contiennent des nanotubes afin de faciliter, et surtout d'optimiser, leur peinture ; en effet, pendant l'opération de peinture, un courant électrique circule ainsi dans ces pièces , facilitant grandement l'adhésion de la peinture. Par ailleurs, on vient de commercialiser des dispositifs d'éclairage et d'affichage contenant des nanotubes : en particulier des lampes à vide pour l'éclairage et des écrans plats pour télévision couleur.

Ces applications reposent sur le fait que les nanotubes ont des extrémités très fines, réduites à quelques atomes. Ces pointes ont le meilleur pouvoir d'émission sous champ électrique actuellement connu. Dans ces lampes pour éclairage ou dans ces écrans plats on exploite la capacité des nanotubes à émettre des électrons à des tensions relativement basses, ce qui a pour conséquence une économie d'énergie et une durée de vie supérieure.

Nous avons vu que la résistance mécanique des nanotubes était importante : ils sont environ 100 fois plus résistants que l'acier et, par ailleurs, six fois plus légers, ce qui les rend très intéressants pour la fabrication de câbles et de matériaux composites.

D'autre part ils se déforment sous l'action d'un champ électrique et, inversement, libèrent de l'énergie électrique lorsqu'ils sont déformés. Ainsi des muscles en nanotubes seraient plus résistants que des muscles humains et plus rapides que les systèmes artificiels actuels. De nombreux laboratoires étudient ce problème. Les principaux obstacles à franchir proviennent des impuretés et de la difficulté à mettre en forme le matériau brut issu de la synthèse à savoir une suie fragile, difficile à manipuler. Une solution consiste à mélanger cette suie à des polymères pour faire des fibres ou des matériaux composites plus faciles à manipuler.

Une autre façon de faire revient à disperser la suie dans un solvant puis à la sécher sur une membrane de filtration. On obtient ainsi une espèce de papier formé de nanotubes enchevêtrés ; ce papier pourrait être utilisé pour la réalisation de muscles artificiels.

On peut, par ailleurs, fabriquer des films de nanotubes alignés par action d'un champ magnétique puissant, ce qui permet d'améliorer les propriétés électriques et mécaniques des nanotubes - cela pourrait être mis à profit pour la confection de muscles artificiels - l'idée est de coupler une sollicitation électrique à une déformation mécanique de l'objet. Mais ce procédé est onéreux et contraignant.

Une équipe française du centre Paul PASCAL de Bordeaux vient, dans cet esprit, de breveter un nouveau procédé permettant d'aligner les nanotubes sous forme de fibres très longues et ainsi de filer les nanotubes de façon simple et rapide en production continue.

Les fils ainsi obtenus possèdent une grande résistance à la torsion et pourraient, dans l'avenir, remplacer les fibres de carbone ou autres polymères et surtout devraient permettre la fabrication de muscles artificiels dont les performances, dans cet usage, devraient être supérieures à celles obtenues avec le papier de nanotubes.

Ce nouveau procédé repose sur le caractère hydrophobe des nanotubes ; placés dans l'eau ils se dispersent en présence d'un tensioactif, par exemple un détergent, la dispersion obtenue est ensuite injectée en continu dans une solution visqueuse qui s'écoule et contient un polymère soluble dans l'eau (par exemple un polyol) ; ce dernier déstabilise la suspension et permet l'agrégation des nanotubes sous forme de rubans fins dont la croissance est très rapide. Ces rubans, dont la largeur est de quelques dixièmes de millimètres sont constitués de nanotubes enchevêtrés qui ont une orientation préférentielle due à l'écoulement de la suspension. Une fois séchés, ces rubans forment des fibres denses, assimilables à du fil de plusieurs micromètres de diamètre.

Ces fils possèdent une grande résistance à la torsion, supérieure à celle des fibres de carbone.

Les propriétés électroniques des nanotubes laissent, par ailleurs, espérer d'intéressantes applications : selon la température et leur structure, ils peuvent se comporter comme des conducteurs, des semi-conducteurs, ou encore des isolants .

Selon le grand principe de la mécanique quantique, les électrons se comportent, à la fois, comme des ondes et des corpuscules, (dualité onde-corpuscule). Les ondes électroniques peuvent, bien entendu, se combiner ou s'annuler ; ainsi un électron qui se propage à la surface d'un nanotube peut « s'annuler », seuls subsistent les électrons qui ont une longueur d'onde adéquate. Parmi les états électroniques autorisés seules quelques longueurs d'onde dans une feuille de graphite sont conservées lorsque la feuille est enroulée pour

former un nanotube ; ces longueurs d'onde conservées dépendent de la circonférence du tube. Par ailleurs, dans une feuille de graphite, un état électronique particulier, dit niveau de FERMI, confère au graphite la conductivité, les électrons qui ne sont pas dans cet état, restent immobiles. Un tiers seulement des nanotubes torsadés ont un diamètre et un degré de tension tel que le niveau de FERMI fait partie des états permis ; on peut dire que ce sont des nanotubes métalliques. Les autres nanotubes sont des semi-conducteurs, ils peuvent conduire le courant si on leur fournit de l'énergie. La quantité d'énergie nécessaire dépend de l'écart entre le niveau le plus haut de la bande de valence et le niveau le plus bas de la bande de conduction. Cet écart correspond à ce que l'on appelle « bande d'énergie interdite » ou gap du semi-conducteur.

Les divers nanotubes n'ont pas tous le même gap ; celui-ci dépend essentiellement du diamètre des tubes ; les nanotubes de faible diamètre ont un gap élevé, lorsque le diamètre augmente le gap diminue ; ceci devrait, en principe, permettre d'ajuster le gap ; malheureusement les techniques actuelles ne permettent pas la production de tubes de diamètre contrôlé.

On a toutefois, d'ores et déjà, construit des dispositifs électroniques qui comportent des nanotubes de carbone : par exemple, on a construit des transistors à effet de champ au moyen de nanotubes à paroi unique ; ceux-ci constituent le canal où s'écoulent les électrons entre deux électrodes métalliques. Le courant circulant dans ce canal peut être activé ou interrompu au moyen d'une troisième électrode, dite électrode de commande et nommée « grille ». Ces dispositifs, qui fonctionnent à température ambiante, ont des caractéristiques électriques comparables à celles des dispositifs classiques au silicium. On peut, en principe, aujourd'hui, fabriquer des dispositifs constituant des nanocircuits qui ont des fils, des commutateurs et des éléments de stockage entièrement constitués de nanotubes de carbone et autres molécules. En 2001, les premiers circuits logiques utilisant ces composants ont été fabriqués simultanément par quatre groupes de recherche à Harvard, dans le New Jersey, à New-York et à Paris.

Toutefois, on est encore ici dans le domaine de la recherche mais les avancées et les enjeux sont tels que tous les espoirs sont permis pour demain ; il suffit pour s'en convaincre de voir les efforts financiers dévolus à ces recherches : pour l'année 2000 l'Union Européenne a dépensé 184 millions d'Euros, le Japon 170 et les Etats-Unis 270.

De nombreuses autres applications sont actuellement envisagées pour les nanotubes. Par exemple, on étudie actuellement la possibilité de stocker de l'hydrogène en leur sein.

En effet, depuis quelques années, la voiture à pile à combustible utilisant l'hydrogène apparaît comme étant la meilleure solution pour éliminer la pollution urbaine due à la circulation automobile (rappelons que la réaction mise en jeu est la réaction de synthèse de l'eau). Or, jusqu'à ce jour, le développement de cette technique s'est trouvé limité par le problème de stockage de l'hydrogène à bord du véhicule.

Actuellement, le stockage maximum obtenu sur les systèmes tubulaires étudiés, n'excède pas 6,5 % de l'espace disponible, ce qui est insuffisant pour que l'opération soit rentable. Toutefois de récentes publications donnent à penser que la présence de métaux alcalins intercalés sur des nanotubes, particulièrement à paroi unique, pouvait améliorer le taux d'hydrogène absorbé de façon significative. Par ailleurs, la grande facilité de compactage des nanotubes est un élément favorable pour un usage comme matériau de stockage. En effet, dans un volume donné, si la quantité d'hydrogène stocké dépend du pouvoir absorbant, (en pourcentage massique), elle dépend aussi de la masse totale de l'absorbant qui a intérêt à être la plus grande possible ; pour cela l'absorbant doit être le plus compact possible. Or les nanotubes se compactent très facilement pour donner un solide non friable, dont les propriétés absorbantes ne sont pas altérées, ce qui n'est pas le cas des absorbants carbonés microporeux courants.

Diverses autres utilisations sont, d'ores et déjà, mises en œuvre ou envisagées pour les nanotubes. Je citerai brièvement :

• La fabrication de sondes génétiques ou chimiques par utilisation d'un microscope à force atomique.

Avec un microscope atomique, dont la pointe se réduit à un nanotube, on peut détecter, par exemple, un brin d'A.D.N. et identifier les marqueurs qui repèrent les variants d'un même gêne.

• La fabrication de microscopes très puissants : fixés à la pointe d'une sonde de microscope les nanotubes améliorent la résolution latérale de l'instrument d'un facteur 10, ce qui facilite, par exemple, l'observation des protéines et d'autres molécules.

Remarquables par l'élégance et la beauté de leurs formes, les fullerènes et leurs homologues supérieurs, les nanotubes sont certainement appelés à jouer un rôle important pour le développement de ce que l'on désigne aujourd'hui sous le nom de nanotechnologies. Ces nouvelles sciences ont émergé au cours de la dernière décennie grâce aux progrès instrumentaux de la fin du XX^{e} siècle ; la découverte du microscope à effet tunnel et le développement du microscope à force atomique ont été, de ce point de vue, déterminants.

Ceci explique, entre autres, l'engouement, ces dernières années pour la chimie des fullerènes et de leurs homologues supérieurs les nanotubes. Actuellement, environ 30 publications par mois sont consacrées à ces sujets.

J'espère lors de cette conférence, avoir attiré votre attention sur la diversité et la beauté des nombreuses formes moléculaires que nous offre la chimie : molécules cycliques, en triangle : le cyclopropane et ses dérivés, en rectangle : le cyclobutane par exemple, pentagonales, hexagonales, en forme de cube : le cubane, quasi sphérique : l'adamentane, sphérique : le C_{60}... etc....

Platon avait-il soupçonné tout ceci lorsqu'il affectait une forme aux quatre éléments de l'époque : le tétraèdre pour le feu, l'octaèdre pour l'air, l'icosaèdre pour l'eau, le cube pour la terre sans oublier le dodécaèdre qui aurait servi à Dieu pour achever l'Univers ?

On peut se poser la question.

Dossier

Transport du pétrole en eaux profondes

(Source : Trelleborg Industrie, Jacques Cognard responsable Oil and Marine)

Pour répondre aux conditions difficiles associées au transport du pétrole en eaux profondes, (lignes pouvant atteindre deux kilomètres de long) Trelleborg Industrie développe un nouveau système de flexibles caoutchouc.

L'extraction du pétrole en eaux profondes, de 800 à 3000 mètres est une tâche complexe qui impose de toutes nouvelles exigences sur l'équipement utilisé. Dans ce domaine, le développement vient tout juste de commencer. Le champ de Girasol, au large de l'Afrique de l'Ouest, à 1200 mètres de profondeur, constituant le premier projet grandeur nature. D'autres projets Ouest africains étant prévus dans un futur très proche.

Parmi les nouveaux problèmes il faut considérer la façon de transporter le pétrole de manière sûre et efficace à partir de la source Dans la mesure où il est trop risqué de laisser un tanker s'approcher d'une plate-forme pétrolière, il faut pomper le pétrole de la tour de forage à une bouée dite CALM, une construction flottante placée à environ deux kilomètres de la plate-forme pétrolière où les tankers peuvent s'amarrer.

Pour les forages normaux en mer, la plate-forme pétrolière est reliée au CALM par un oléoduc d'acier sur le fond. Il n'est pas possible d'utiliser cette méthode pour les forages en eaux profondes.

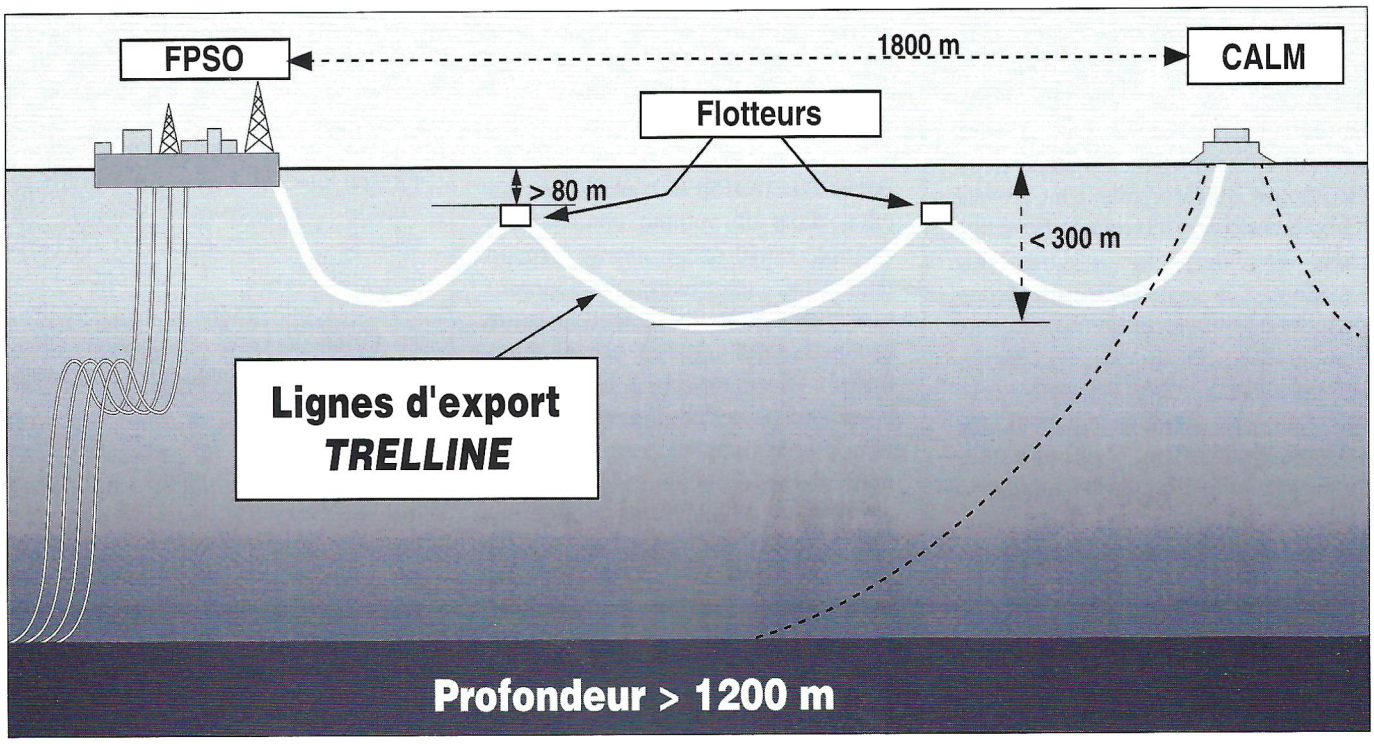
Il serait extrêmement difficile d'installer et d'entretenir des oléoducs à de telles profondeurs et d'importantes forces seraient nécessaires pour pomper le pétrole au fond. Compte tenu des risques de collisions, il n'est pas non plus possible d'avoir des flexibles flottant à la surface. La solution consiste à suspendre le tuyau à des flotteurs entre 80 et 300 mètres de profondeur.

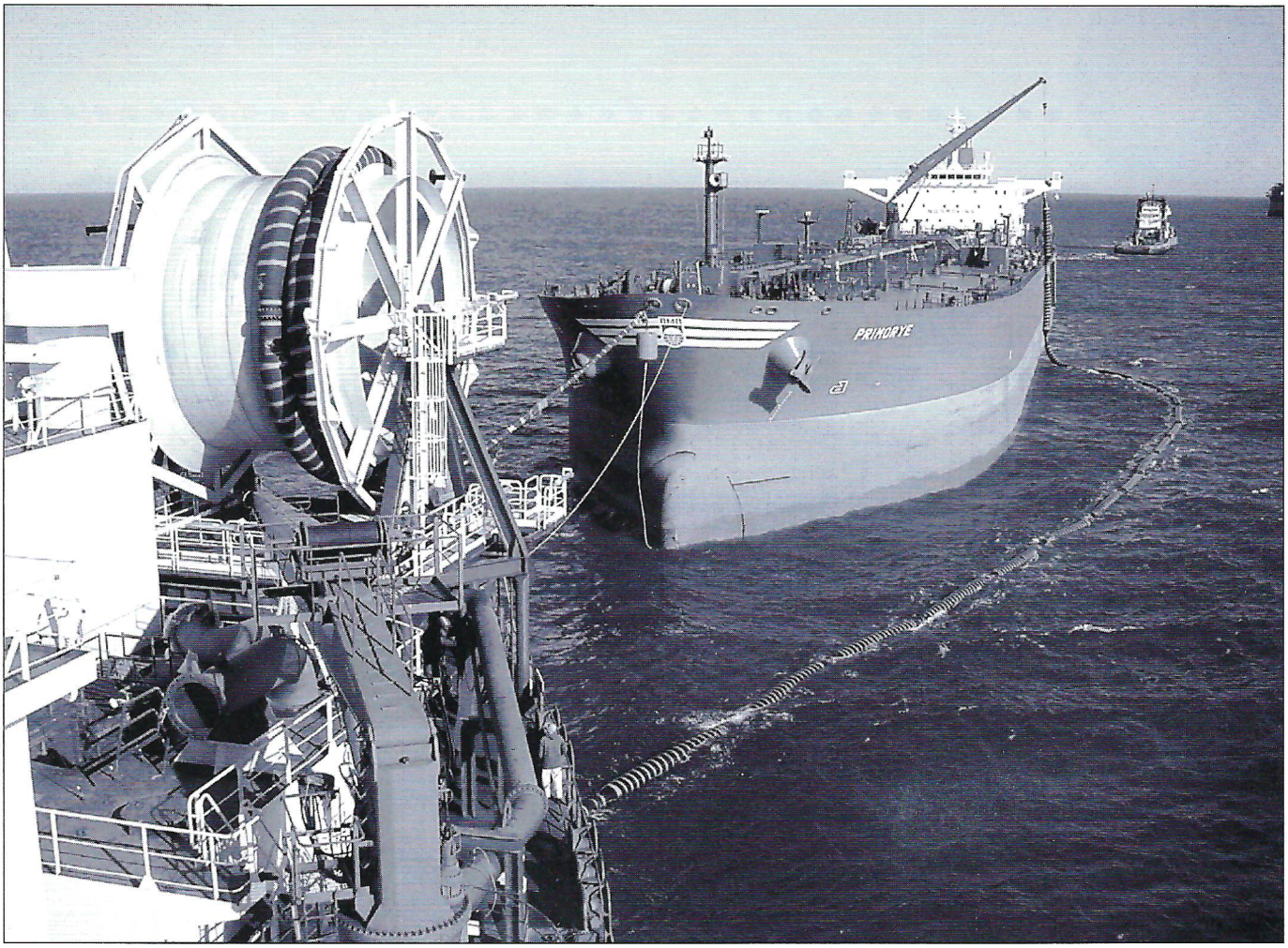
Maniement difficile des conduites en acier

Lors des prospections réalisées en eaux profondes, le pétrole a été transporté dans une ligne flexible en acier. Une ligne en acier longue de deux kilomètres ne se manipule pas sans problèmes en raison des tensions dynamiques dues au poids et à la rigidité. C'est pourquoi un de nos clients nous a demandé s'il était possible de résoudre le problème plus souplement.

En fait, lors de notre rencontre, grâce à une simple esquisse, nous avons pu présenter le concept d'une solution.

Nous avons profité de nos expériences d'applications semblables et développé un nouveau concept. Compte tenu des impératifs difficiles que font peser les eaux profondes sur l'équipement, le développement du





projet, les essais et les certifications ont duré deux ans. Le développement du produit « Trelline » est aujourd'hui dans sa phase finale.

Nous avons collaboré avec plusieurs universités et des sociétés d'ingénieurs spécialisés pour nous assurer que Trelline allait résister à toutes les contraintes possibles – pression interne et externe, vagues et effets répétés d'allongement et de flexion. Les éléments de base de Trelline sont des segments de flexibles de 12 mètres de long, avec un diamètre intérieur de 60 centimètres.

Ils sont assemblés en sections de 360 mètres de long, qui sont elles-mêmes assemblées en mer selon la longueur souhaitée.

On utilise des flotteurs avec une puissance de levage de 25 tonnes pour maintenir l'installation à la profondeur voulue.

De nombreux avantages

Trelline offre de nombreux atouts en raison des avantages généraux du caoutchouc par rapport aux métaux, particulièrement son poids, sa flexibilité, ses propriétés isolantes, sa résistance à la corrosion et son entretien. L'assemblage de segments courts a d'autres avantages. En cas d'incident, compte tenu des raccordements tous les douze mètres, il n'est pas nécessaire de transporter l'ensemble de l'installation à terre. La section concernée est remontée jusqu'à un navire de maintenance où l'élément endommagé peut être facilement remplacé.

L'installation de Trelline sera facilitée par le fait que le système de flexibles remplis d'air flotte. Grâce à sa flexibilité, le système de flexibles peut s'enrouler sur un touret de dimensions adaptées et être transporté sur site par un navire ordinaire. Un navire spécial n'étant pas nécessaire, les coûts sont par suite réduits. On peut parfaitement utiliser les navires sur place par exemple en Afrique de l'Ouest.

Fort potentiel

Nous voyons l'avenir de Trelline de façon positive : Compte tenu de l'importance du projet et des difficultés techniques, il n'y aura bien évidemment pas de nombreux projets par an, mais en revanche chacun génère un chiffre d'affaires très important. Des prospections en eaux profondes ont été réalisées ou sont actuellement planifiées sur plusieurs sites et nous envisageons des débouchés potentiels pour Trelline. Les zones les plus d'actualité se trouvent au large de l'Afrique de l'Ouest, du Brésil et dans le Golfe du Mexique. Comme notre solution présente des avantages fonctionnels et économiques par rapport à nos concurrents, je crois que Trelline offre le potentiel pour devenir un produit important. Trelline a déjà commencé à être utilisé avec succès pour des applications moins contraignantes dans la Mer du Nord.

Note : ce type de flexible n'est pas destiné à la récupération du pétrole suite à marée noire mais au pompage et convoyage en eaux profondes du pétrole brut destiné à être raffiné.

Dossier

Le PET-scan : un progrès en cancérologie

Professeur Jean Maublant

Chef du service de Médecine Nucléaire - Centre Jean Perrin, Clermont-ferrand

Qu'est-ce que le PET-scan ?

Le PET-scan est une technique d'imagerie médicale d'apparition récente qui vient compléter la gamme d'examens regroupés dans la spécialité médicale dénommée médecine nucléaire. Ces examens reposent sur l'utilisation de substances faiblement radioactives qui sont administrées dans un but diagnostique, c'est-à-dire en vue de la détection et de l'identification d'une maladie. De nombreux cancers sont connus pour concentrer de façon importante certains types de sucres comme le glucose. Si du glucose radioactif est administré dans l'organisme, et si le signal émis par ce glucose radioactif peut être décelé par un capteur externe, alors il devient possible de détecter la présence d'un cancer, d'en préciser le siège et d'en déceler les éventuelles localisations secondaires (métastases).

Le PET-scan (abréviation de Positron Emission Tomography, ou tomographie par émission de positon) est un détecteur dédié à la détection du signal émis par le glucose radioactif.

Quelles sont les propriétés du glucose radioactif ?

Le glucose est rendu radioactif en lui greffant un atome de fluor-18. Le composé ainsi formé est du fluoro-désoxy-glucose, ou FDG. Le signal émis est un positon, particule que l'on peut assimiler à un "électron positif". Ce positon subit spontanément une réaction dite d'annihilation qui se traduit par l'émission de deux photons gamma qui partent à 180° l'un de l'autre.

En raison de sa durée de vie brève, le FDG doit être fabriqué à proximité de son lieu d'utilisation. Plusieurs installations sont en cours de construction en France. Un industriel spécialisé dans cette activité (Cyclopharma) a prévu de s'implanter au Biopôle de Saint-Beauzire.

Comment fonctionne le PET-scan ?

Le PET-scan est un détecteur extrêmement sensible, spécialisé dans la détection des photons issus de positons. Une telle fonction explique sa structure annulaire car il doit pouvoir identifier deux photons émis simultanément dans deux directions opposées. Il doit aussi pouvoir localiser avec précision l'origine de l'émission, et cela à la cadence extrêmement élevée de plusieurs millions d'évènements par seconde. Par comparaison avec les détecteurs habituellement utilisés médecine nucléaire, la surface sensible du PET-scan est plus grande et le nombre d'unités fonctionnelles (les photomultiplicateurs) qu'il contient est multiplié par 50. Ces caractéristiques expliquent son coût nettement plus élevé (de 2 à 4 fois plus, suivant les modèles).

Dans leur version la plus récente, les PET-scans sont couplés avec un scanner radiologique (un tomodensitomètre à rayons x). Cette option permet de mettre en correspondance exacte les images du PET-scan et celles du scanner, ce qui fournit des renseignements extrêmement précieux quant à la localisation anatomique du cancer. Le surcoût engendré par l'adjonction d'un scanner est significatif, mais le bénéfice médical est largement à la hauteur de l'investissement (trois millions d'euros).

Comment est réalisé un PET-scan au FDG ?

L'administration du FDG, qui se fait dans une veine, est sans risque ; en particulier elle ne peut pas provoquer de réaction allergique. Afin d'optimiser l'examen, il est important que le patient soit à jeun depuis au moins quatre heures et qu'il n'ait pratiqué aucune activité physique importante avant l'examen. Chez les diabétiques, la glycémie doit être corrigée.

Le PET-scan est un appareil qui se présente extérieurement comme un scanner. Le patient est allongé sur un lit qui se déplace à l'intérieur d'un court tunnel. L'appareil est silencieux. La prise de vues est totalement indolore et dure environ 30 minutes.

Quelle sera l'utilisation du PET-scan ?

L'indication la plus fréquente et la plus utile de l'examen au FDG est la suspicion de cancer du poumon. Les techniques conventionnelles d'imagerie (radiographie, scanner et IRM) ne permettent pas toujours d'éviter l'intervention chirurgicale dont le seul but est de faire le diagnostic de cancer. Or cette intervention est parfois la source de séquelles importantes, et elle révèle dans plus de la moitié des cas la présence d'une lésion bénigne, non cancéreuse. Le PET-scan au FDG permet d'obtenir la même réponse avec un très haut degré de confiance. Par ailleurs l'examen révèle dans le même temps l'existence d'éventuelles métastases. Ces éléments sont d'une importance primordiale pour choisir la thérapeutique la mieux appropriée (chirurgie, radiothérapie, chimiothérapie, seules ou en association). Les renseignements fournis par le PET-scan au FDG sont d'une telle importance que la plupart des équipes médicales étrangères ayant accès à la technique l'utilisent de façon presque systématique dans cette indication.

Le PET-scan présente également un intérêt majeur dans d'autres localisations, en particulier pour la recherche de métastases et le diagnostic des récidives locales : tumeurs cutanées (mélanome cutané), digestives (œsophage, pancréas, colon et rectum), de la sphère ORL, des ganglions lymphatiques (lymphomes). Les indications du FDG restent à définir plus précisément dans les tumeurs du sein, du cerveau et de la thyroïde. Elles semblent limitées dans le cancer de la prostate du fait d'une faible affinité du FDG pour ce type de lésions.

Au total, les données de la littérature internationale s'accordent pour reconnaître que la pratique du PET-scan au FDG modifie dans plus de 30% des cas le plan thérapeutique qui aurait été adopté si cet examen n'avait pas été réalisé. Il s'agit donc d'un progrès considérable en terme d'efficacité du traitement, de diminution de la morbidité, de qualité de vie des patients et de coût de la santé en cancérologie.

Voyage à Saint Chély d'Apcher et Millau

les 10 et 11 janvier 2003

Jocelyne Allée

Beau souvenir pour les 38 participants à l'excursion de Saint Chély d'Apcher et Millau, malgré la température hivernale qui règne sur notre région les 10 et 11 janvier 2003.

Le départ a lieu en car de l'ADASTA le vendredi aux environs de midi et demie. Une première étape, au cours de laquelle nous écoutons les explications de Jean-Pierre Carroué sur la géologie des régions traversées, et celles de Denis Bérard sur les techniques de construction des ponts, nous transporte jusqu'à Saint Chély d'Apcher où l'on nous attend pour la visite de l'usine métallurgique qui fait partie de Sollac Méditerranée, et qui fabrique des tôles magnétiques. Des guides compétents nous informent sur le laminage à froid de l'acier. En fin d'après-midi, nous nous rendons au Musée de la Métallurgie qui complète nos connaissances sur l'usine, son histoire industrielle et humaine, et qui expose de nombreux matériels du siècle dernier. Puis le car nous amène, non loin de là, à Fau de Peyre, où nous trouvons un restaurant et un hôtel confortables. Les amateurs de spécialités régionales ne manquent pas de goûter l'aligot et les mannouls préparés à partir de panse de brebis.

Après une nuit de grand calme, nous voilà prêts, samedi matin, à repartir, direction Millau où nous visitons le chantier du futur viaduc sous un beau soleil, émerveillés par le caractère grandiose du projet.
Réchauffés par un copieux repas à Buzeins près de Sévérac-le-Château, nous prenons la route du retour. A proximité du col de la Fageole, le soleil cède la place au brouillard et à quelques flocons qui ralentissent un peu la marche du car. Mais rien de grave, et c'est sans encombre que nous arrivons à Clermont-Ferrand en début de soirée, enchantés de ces deux journées bien remplies.

L'usine Métallurgique Sollac Méditerranée (groupe Arcelor)

L'usine, qui a employé 242 personnes en 2002, produit annuellement 110 000 tonnes de tôles électriques à grains non orientés, qui trouvent des applications aussi bien dans les appareils ménagers (aspirateurs, robots, machines à laver) que dans le domaine industriel (moteurs, transformateurs, alternateurs). Pour ses besoins énergétiques, l'usine dispose de deux centrales hydroélectriques, la centrale du Ranc sur la Truyère, et la centrale du Vergne, installée sur le Bès, affluent de la Truyère.

Les tôles électriques sont fabriquées à partir de bobines appelées « coils » laminées à chaud dans les Aciéries de Sollac Fos ou Dunkerque, et amenées par chemin de fer sur le site de Saint Chély.
Un premier traitement consiste à éliminer sur les coils la calamine par un grenaillage sur les deux faces, suivi d'un décapage chimique au moyen d'acide sulfurique.
La deuxième étape est le laminage à froid qui permet, en 5 à 7 passages, de réduire l'épaisseur de la tôle de 2,5 à 0,5 mm. Ce laminage est suivi d'un recuit sous atmosphère contrôlée pour donner au métal les propriétés électriques désirées, puis d'une opération de vernissage qui protège la tôle par une couche de vernis de quelques micromètres d'épaisseur.
Les bobines obtenues sont refendues en bobineaux de différentes largeurs suivant les besoins des clients. Les bobineaux sont enfin emballés, conditionnés sur palettes, et expédiés par camions.
Tout au long de la production, ont lieu des vérifications en ligne qui garantissent la qualité des tôles.
Parmi les clients français, on compte Alsthom, Leroy-Somer, Jeumont, Schneider, Télémécanique, Moulinex, Schwab, Usocom. Cependant 70% de la production sont exportés.
La protection de l'environnement n'est pas oubliée à l'usine de Saint Chély qui est équipée d'une centrale d'épuration.
Parce qu'elle a su s'adapter et s'organiser pour valoriser ses points forts, l'usine de Saint Chély d'Apcher qui appartient au puissant groupe Usinor est un important site industriel qui participe au développement économique de la région.

Le musée de la Métallurgie

Le musée de la Métallurgie, créé en 1991 par une association de retraités dynamiques et dévoués, rassemble le patrimoine de tout un siècle de métallurgie en Haute – Lozère. De nombreuses photos, des outils et matériels, des mannequins, des tableaux explicatifs évoquent non seulement les techniques du siècle dernier et leur évolution, mais aussi l'histoire de l'usine et tous les aspects humains qui lui sont liés.

Divers documents retracent l'origine de la métallurgie à Saint Chély d'Apcher. Pendant la première guerre mondiale, la Société des Aciéries et Forges de Firminy fabrique du matériel d'armement ce qui nécessite de grosses quantités de ferrosilicium. Pour la production de ce dernier l'implantation d'un site industriel à Saint Chély d'Apcher est retenue. Plusieurs arguments plaident en effet en faveur de ce choix : l'éloignement du front, les ressources énergétiques fournies par les centrales hydroélectriques susceptibles de s'établir sur le Bès et la Truyère, la proximité d'un gisement de quartz pouvant fournir le silicium. Les constructions, usine et barrage, commencent en 1916 et sont rendues pénibles par les conditions climatiques et les restrictions du ravitaillement. Les premiers fours à ferrosilicium fonctionnent à partir de 1919.

Le gisement de quartz le plus important, situé à 5 km au nord de Saint Chély d'Apcher, a une teneur en oxyde de silicium SiO_2 d'environ 98 %. Au départ le travail consiste en un simple ramassage des blocs suivi de concassage. Par la suite, il faudra attaquer la roche à l'explosif.

En raison de la faible production d'électricité les fours ne fonctionnent pas l'été, ce qui favorise l'embauche des paysans des environs qui peuvent ainsi poursuivre leurs activités agricoles durant la belle saison.

En 1924 l'usine se développe avec l'installation de laminoirs pour la fabrication de tôles magnétiques destinées à la construction de dynamos, moteurs, alternateurs et transformateurs. Puis est implantée une aciérie électrique comprenant deux fours de type Héroult (fours à arc avec électrodes en graphite) qui produisent des aciers spéciaux. Les lingots issus des fours sont ensuite laminés à chaud (1 000°C) et transformés en tôles. A cette époque les diverses opérations ne sont pas mécanisées et les ouvriers travaillent durement dans la chaleur et le bruit : le chauffeur, par exemple, qui sort la pièce à 1 000°C du four au bout de lourdes tenailles, le lamineur qui la pousse entre les cylindres, le décolleur qui sépare les tôles les unes des autres. Le poste de décolleur en particulier est l'un des plus dangereux, coupures et brûlures sont fréquentes. Des femmes aussi sont présentes dans les ateliers et notamment pendant la seconde guerre mondiale.

Peu à peu les différents postes subissent des mécanisations successives qui améliorent la condition des ouvriers. Le laminage à chaud est finalement abandonné en 1969. Quant à la fabrication des ferroalliages, elle cesse en 1987.

Une importante documentation sur les conséquences sociales de ces fermetures est mise à la disposition du public. Outre le marteau-pilon exposé devant l'entrée du musée, les visiteurs remarqueront :

- des appareils de mesures physiques (machines pour les mesures magnétiques, pour les essais de dureté, pour les essais de traction…)
- des appareils de contrôle (pour la mesure des débits de gaz, des températures…)
- des appareils de mesures chimiques (balances de précision, verrerie, appareils de dosage…)
- du matériel pour les services généraux (machines à écrire et à calculer…)

Le Musée présente également de nombreux objets et documents illustrant les usages des tôles fabriquées par l'usine, tels que les petits moteurs d'électroménager (rasoirs, moulins à café, aspirateurs, moteurs de machines à laver), les accessoires d'automobiles (essuie-glaces, lave-vitres, ventilateurs, démarreurs), les moteurs industriels (motrices TGV…) ; les transformateurs présents dans les petits appareillages (fours à micro-ondes, postes de télévision, compteurs électriques…). Les fameux casques bleus des soldats de l'ONU proviennent aussi de l'acier fabriqué à Saint Chély d'Apcher.

Enfin nous avons particulièrement apprécié l'accueil chaleureux et sympathique des bénévoles qui ont guidé notre visite tout au long des cinq salles du Musée.

Le chantier du viaduc de Millau

Tout près de Millau, et dernier tronçon de l'autoroute A 75 Clermont-Ferrand-Béziers, le viaduc de Millau commence à se dessiner dans le paysage. Un peu plus d'un an après le début des travaux, on peut voir désormais les sept piles creuses et les culées, qui servent de points d'appui avec la vallée. Chacune des piles fait l'objet d'un chantier indépendant avec un responsable et des équipes réparties en deux postes. Ce type d'organisation est aussi utilisé pour les deux point d'ancrage du tablier que constituent les culées. Conçu par l'architecte anglais Lord Norman Foster, le viaduc sera un ouvrage multihaubané, d'une hauteur maximale de 343 m au-dessus du Tarn. L'ensemble est financé et réalisé par le groupe Eiffage dont la filiale, la compagnie Eiffage du viaduc de Millau est concessionnaire du viaduc pour une durée de 75 ans.

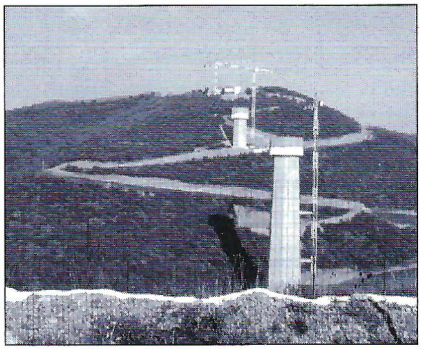
Les futures étapes du chantier doivent être la mise en place du tablier et la construction de la barrière de péage. Le tablier doit être lancé depuis des plates-formes situées en bordure des Causses, de chaque côté du Tarn. De part et d'autre, une travée métallique, équipée d'un pylône à l'une de ses extrémités et de haubanages provisoires, avance par poussages successifs de 171 m. Elle progresse ainsi vers les appuis définitifs en s'appuyant sur des palées provisoires. Les deux parties du tablier se rejoignent au-dessus du Tarn à une hauteur de 270 m. Les cinq autres pylônes sont alors mis en place. Puis les haubans sont montés et tendus. Le tablier en acier représente 36 000 tonnes de charpente métallique, mais il est remarquable par sa finesse et sa légèreté. Le choix de pylônes en acier, en forme de Y renversé, contribue à la légèreté de la structure.

Les différentes phases techniques de la construction requièrent une grande précision qu'assure la vérification par satellite GPS.

La mise en service du viaduc est prévue pour janvier 2005. Son franchissement sera payant. La barrière de péage comportera 18 voies.

Par son élégance, le viaduc de Millau qui détiendra le record mondial de hauteur, s'intégrera de façon heureuse dans le paysage et participera à l'essor touristique de la région.

Sources : *Documents Sollac-Méditerranée*
Brochure Musée de la Métallurgie
Le journal du viaduc édité par la compagnie Eiffage du viaduc de Millau



Cadre géologique de la sortie de l'ADASTA à Millau

les 10 et 11 janvier 2003

Jean-Pierre Carroué, Géologue

Coupe le long de la A 75

De Clermont à Lempdes, l'autoroute est tracée sur la plaine sédimentaire oligocène (tertiaire) de Limagne, à l'exception d'un court tracé dans la vallée de l'Allier pour traverser le « horst granitique de Saint-Yvoine ». De Lempdes à la sortie 29 (Loubaresse) c'est le domaine de la « série du Haut-Allier », qui comporte les roches les plus métamorphiques, du Massif Central.

Les premières de celles-ci affleurent particulièrement bien dans les gorges de l'Allagnon, c'étaient les « embréchites de Léotoing » chères aux vieux géologues de l'université de Clermont auxquels je m'identifie sans rougir, ce sont dorénavant les « orthogneiss » de l'unité supérieure de la série, des roches de composition presque granitique mais de texture rubanée, datées de 570 Millions d'années (Briovérien à Cambrien). A ces roches sont associés des gneiss dits « anactectiques », à texture floue, ainsi que des leptynites, sortes de gneiss à grain fin riches en quartz et enfin des amphibolites, qui dérivent d'anciennes roches volcaniques.

Dès la sortie « Massiac-Nord », apparaissent des gneiss de faciès plus classique, riches en biotite et sillimanite. Ils appartiennent à l'unité dite inférieure de la série.Placés stratigraphique-ment sous les précédents, ils ont pourtant un âge plus jeune (540 à 550 Millions d'années). L'unité plus ancienne a en effet été « charriée » sur la plus jeune lors de l'orogénie varisque (dite autrefois hercynienne) due au rapprochement de la plaque Afrique et de la plaque Europe.

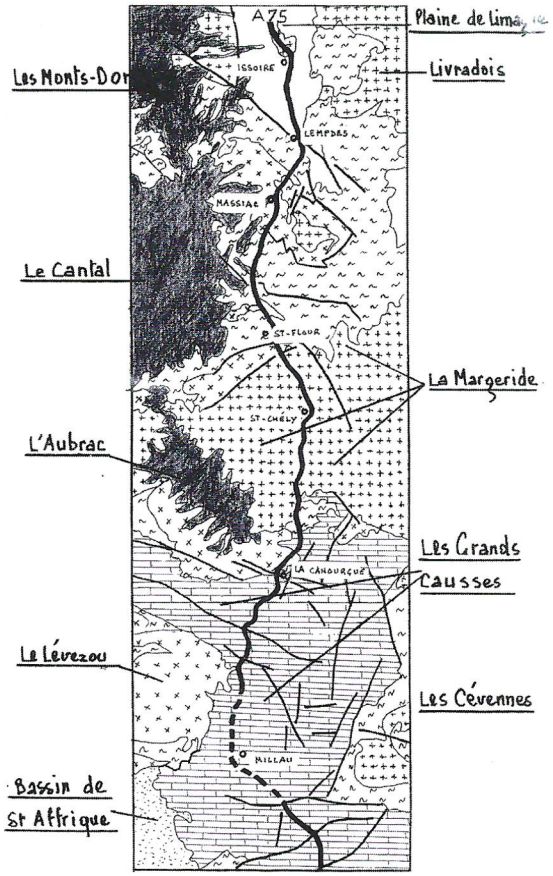
A partir de « Massiac-Sud » et jusqu'à la sortie 29 (Garabit) réaffleurent les leptynites et amphibolites de l'unité supérieure.

Localement apparaissent des coulées basaltiques, des cheminées déchaussées avec des prismes disposés en rosaces, manifestations périphériques du volcanisme cantalien.

A hauteur de Loubaresse, le paysage change, les reliefs sont plus arrondis, on entre dans le massif de granite de la Margeride, caractérisé par ses gros phénocristaux de feldspath orthose pouvant atteindre plusieurs cm. Le long de l'ancienne RN9 on voyait des piquets de clôture en granite, ce qui a dû inspirer les aménageurs de l'aire de la Lozère où sont plantées de grandes colonnades de la même roche.

Sur cette aire, s'impose un arrêt d'une petite heure au « géoscope » sous la direction de Jean-Couturié, maître de conférence en géologie à l'université de Clermont : une carte et une coupe géantes et de gros blocs de roches initient le visiteur à la géologie du département de la Lozère.

Le granite de Margeride, du nom de la montagne entre Haut-Allier et



PANORAMA GÉOLOGIQUE DE L'AUTOROUTE A 75
ENTRE ISSOIRE ET MILLAU

Echelle approximative 1/700 00

Carte synthétique dessinée à partir de la Carte des Curiosités géologiques du Massif-Central publiée par le Bureau de Recherches Géologiques et Minières avec le concours de la DATAR

Légende

- Volcanisme plio-quaternaire
- Calcaires, marnes... oligocène de Limagne
- Calcaires, marnes, dolomies...secondaires des Causses (1)
- Argiles et grès du Permien dans le Bassin de Saint-Affrique
- Granites dont granite carbonifère de Margeride (320 M.A) intrusif dans la série du Haut-Allier
- Métamorphites de « l'unité inférieure » de la série du Haut-Allier (âge cambrien 540 à 550 M.A.)
  Les métamorphites de la série du Lot, sensiblement plus jeunes, n'ont pas été cartographiquement distinguées.
- Métamorphites de « l'unité supérieure » (âge briovérien 570 M.A.)
- Failles principales

Note 1 : La figure 2 donne un esquisse géologique plus détaillée des Causses

Truyère, affleure très largement sur l'Aubrac, région à ne pas limiter au seul plateau basaltique du même nom. Le village du Fau-de-Peyre, qui accueillera les participants le 10 au soir, sa chapelle et les tombes du cimetière, sont construits avec ce granite. Tout au long de la route suivie ensuite pour regagner Aumont-Aubrac, les glaciers du Quaternaire ont laissé leur trace : relief moutonné, blocs erratiques.

Malgré ses contacts avec la roche encaissante, souvent marqués par une forte mylonitisation, ce granite, rapporté à un âge de 320 Millions d'années, est nettement intrusif dans la série.

Le massif est parcouru par un réseau de grandes fractures de direction générale NNW-SSE dans lesquelles sont installés des filons de quartz. L'un d'eux a été activement exploité dans la carrière du Rocher Blanc, un peu au Sud de la sortie La Garde le long de la RN9, pour les besoins de la production de ferro-silicium de l'usine métallurgique de Saint-Chély d'Apcher.

Reprise de la A 75 pour retrouver à hauteur de la sortie 38 (Marvejols) les formations métamorphiques de la « série du Lot » comparables à celles du Haut-Allier bien que sensiblement plus jeunes (Cambrien à Ordovicien).

Bientôt apparaissent sur la gauche, au-delà de la vallée du Lot, les reliefs tabulaires caractéristiques, les Causses. Le talus de l'autoroute, sur la droite, est de plus en plus fréquemment taillé dans des roches stratifiées, des marnes, des calcaires, mais des lambeaux de terrains cristallins persistent, les contacts faillés sont fréquents... Peu après la sortie 39, affleure un faciès particulier de la série, une métadiorite quartzique, âgée de 540 Millions d'années (la plus vieille roche connue en Lozère) exploitée dans la carrière des Ajustons, en bordure de la RN 9.
Il faut arriver à La Canourgue pour atteindre vraiment le Causse.

Les Causses

Deux grandes étendues tabulaires formées de calcaires jurassiques bordent la partie méridienne du Massif-Central : le Quercy, au sud-ouest, connu par le site de Rocamadour ou le gouffre de Padirac... et les Causses des Cévennes ou Grands Causses.

Ceux-ci dessinent un Z passant par Rodez, Mende, Millau, Lodève et Le Vigan et s'étalent sur une surface de 3000 km² à cheval sur les départements de l'Aveyron, de la Lozère, du Gard et de l'Hérault.

Ils sont encastrés dans le socle cristallin à l'exception de la partie méridionale où ils surplombent les bassins permiens de Saint-Affrique et de Lodève.

Le Tarn et ses affluents sont encaissés sur 3 à 600 m de profondeur, ils forment les pittoresques gorges qui découpent l'ensemble en Causse de Sauveterre, Causse Méjean, Causse noir et Larzac.

De quoi sont formés les Causses et comment se sont-ils formés ?

Il faut revenir à l'âge du Carbonifère où, sous l'effet de la collision entre les plaques Afrique et Europe, s'est érigée une chaîne montagneuse dont l'altitude pouvait atteindre celle des Alpes actuelles. Plus tard, sous l'effet de la surcharge, la croûte va céder et se disloquer.

L'érosion va entrer en action d'autant plus vivement que le climat est tropical.

La mer, une mer chaude et peu profonde, va envahir le territoire et ce d'autant plus que le jeu des fractures va entraîner la permanence de conditions subsidentes.

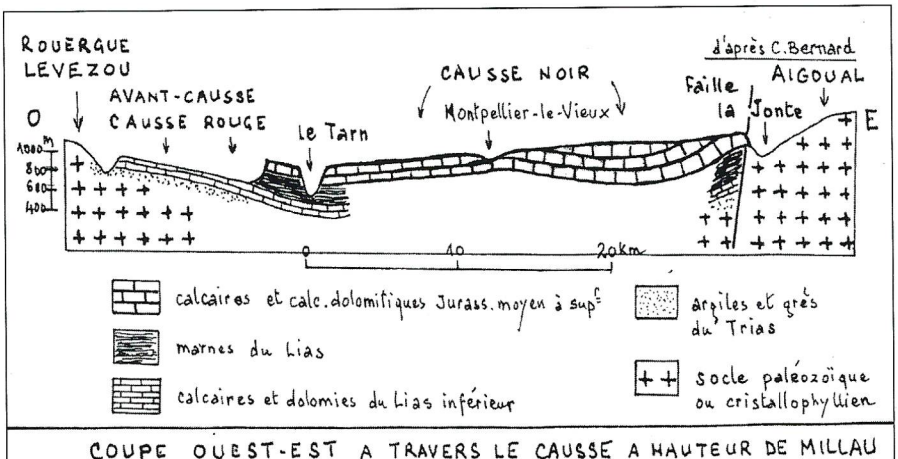
Ainsi vont se déposer successivement :

- les argiles et grès verts ou rouges du Trias (200 mètres)
- les calcaires et les dolomies (250 mètres) de l'Infralias (Rhétien et Hettangien) qui forment surtout les avant-causses (Causse rouge et Causse de Saint-Affrique)
- les calcaires et les marnes du Lias (« schistes-cartons » du Toarcien) qui affleurent à la base des Causses majeurs et dans les vallées (épaisseur : 2 à 300 mètres)
- les calcaires et dolomies du Jurassique moyen (le Bajocien et le Bathonien) dont l'épaisseur avoisine 500 mètres.

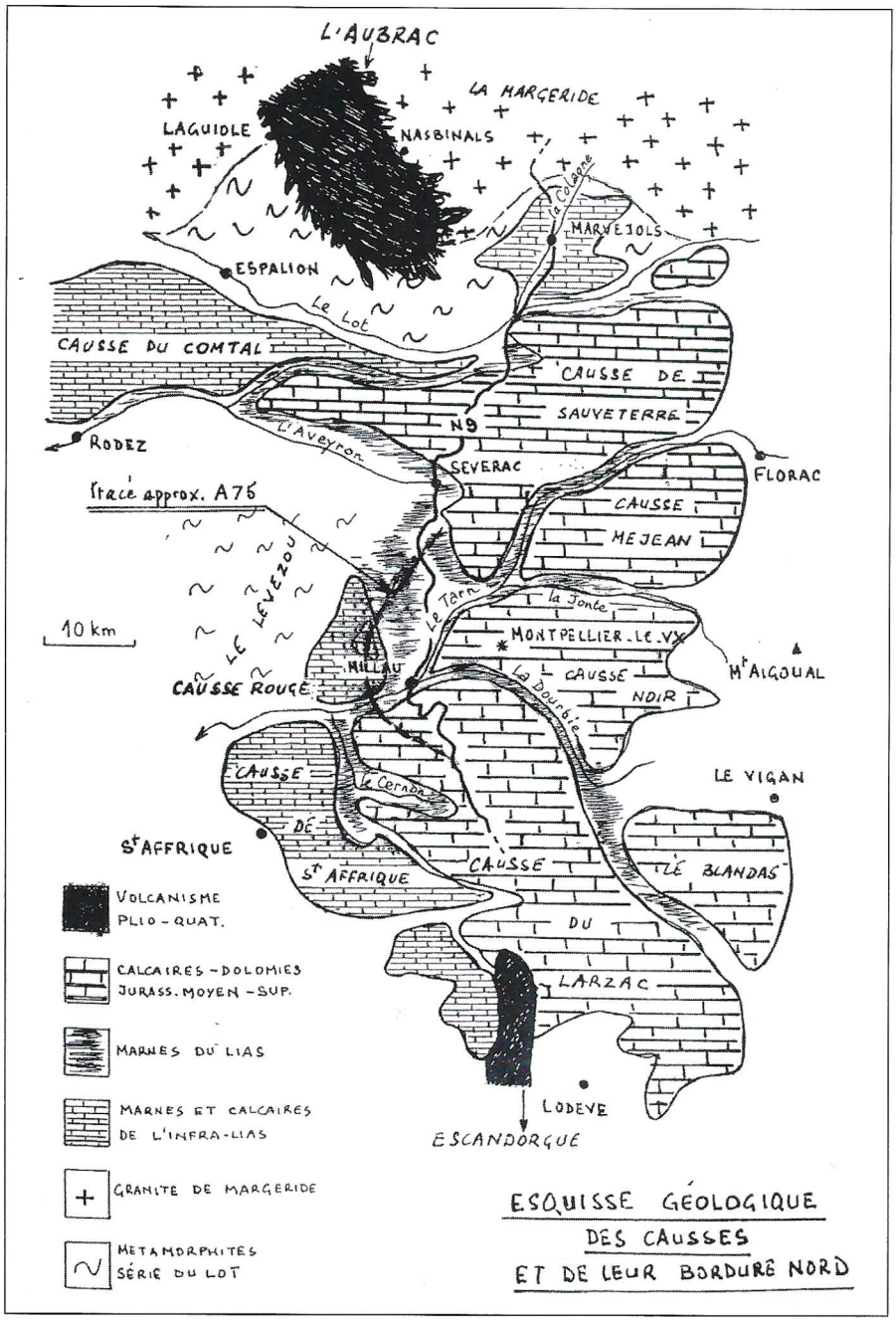
Mais dès la fin du Jurassique s'amorce un nouveau soulèvement du Massif Central : la mer se retire, l'érosion reprend, les sédiments ne seront guère conservés qu'à la périphérie des massifs ou dans les Causses.

Reprenons la coupe de la A 75 à partir de La Canourgue pour identifier ces termes. L'autoroute s'élève rapide-ment depuis les niveaux argilo-gréseux du Permien jusqu'aux calcaires du Bajocien et du Bathonien inférieur (Jurassique moyen) mais en montant vers le Col de l'Engayresque, à la faveur de jeux de failles, on va retrouver les niveaux inférieurs, les schistes et grès permiens et les marnes et grès du Trias.

Après le col la coupe se simplifie, c'est la montée progressive dans la série stratigraphique depuis les calcaires marneux infralia-siques jusqu'aux calcaires et dolomies du Sinémurien (le Lias qui marque l'apparition des Gryphées, les huîtres de l'époque) et enfin aux marnes fossilifères du Toarcien. On notera que l'on monte dans la stratigraphie alors que la topographie diminue, c'est que les couches sont assez forte-ment inclinées vers le Sud-Sud-Est.



COUPE OUEST-EST A TRAVERS LE CAUSSE A HAUTEUR DE MILLAU



Dans le fossé gauche de la route à 3 voies, presque face à la voie de détresse, en descendant du col de l'Engayresque, des lits et des amandes de barytine blanche sont interstratifiés dans les dolomies de l'Hettangien.

Plus loin, la falaise livre de beaux plis-failles. Le viaduc de Verrières apparaît, il est appuyé sur les calcaires et dolomies du Sinémurien.

A l'examen de la carte géologique au 1/50 000 (coupures Saint-Beauzély et Millau) le viaduc de Millau paraît lancé en rive droite du Tarn à partir des mêmes formations mais vient s'appuyer en rive gauche sur les dolomies du Bathonien inférieur.

La piste d'accès au chantier de la culée rive droite depuis le fond de la vallée paraît en effet taillée dans une alternance de niveaux argileux, de marnes ou calcaires, caractéristique de l'Infralias et du Lias. Sur le plateau sommital affleurent les dolomies hettangiennes à lentilles de barytine.

La coupe de la rive gauche est masquée par un très important glissement de terrain mais on aperçoit en aval de la culée des reliefs ruiniformes annonçant le Bathonien supérieur.

Au-delà du viaduc, la tranchée de l'autoroute est creusée dans les niveaux marneux à lentilles de charbon du Bathonien inférieur (oui on a exploité le charbon à Saint-Georges-de-Luzençon et à La Cavalerie !) avant d'entrer dans les calcaires et les dolomies bathoniens qui donnent les reliefs ruiniformes si caractéristiques du Caylar et de Montpellier-le Vieux.

A défaut de pouvoir faire, marteau en main, la coupe géologique des deux versants, j'avais espéré de nos guides le commentaire d'une coupe de sondage, comme on a dû en effectuer de nombreuses lors des études préliminaires et au moins connaître la profondeur des fouilles au droit des piliers. !Une réponse est attendue à l'ADASTA.

Autre question posée : d'où proviennent les différents types de matériaux utilisés sur le chantier ?

Les ciments viendraient de l'usine des Ciments Lafarge au Teil (Ardèche).

Les roches entrant dans la fabrication du béton « haute performance » qui constitue les piles seraient extraites de la carrière toute proche du Rascalat, ce sont donc des calcaires ou des dolomies, ce que semble confirmer l'observation à l'œil nu d'une « éprouvette » de béton exposée. J'avoue ma surprise, m'attendant plus à l'utilisation d'un matériau plus « noble » tel que les « amphibolites » de la carrière de La Bègue à Arvieu (Aveyron) ou les basaltes d'Azinières. Je n'avais préalablement à la visite pu obtenir aucun renseignement en ce sens, où va se nicher la crainte de l'espionnage !

Le site de Buzeins

Le dépliant publicitaire de l'auberge qui nous accueillit samedi annonce « au pied du volcan » ! En plein Causse ?

Vérification faite, oui il y a bien un petit pointement basaltique, on est tout prêt de l'Aubrac. La lave a fait son chemin dans une enclave de grès permiens qui s'étaient déjà ouverts pour permettre la mise en place d'une minéralisation hydrothermale en antimoine (de la stibine) objet de recherches au 19ème siècle.

Jean-Pierre CARROUÉ

Langues & Sciences

Les Principes au XX^{ème} siècle

10ème panneau de l'exposition (disponible à l'ADASTA) consacrée à Isaac Newton

Traduction de M^{me} Suzanne Gély

Suite aux numéros 46, 47, 48, 49, 50, 51, 52, 53 et 54 d'Auvergne-Sciences

Pendant le premier quart du vingtième siècle, la Physique théorique subit une transformation qui changea radicalement la perception des Principes par les physiciens.

La nouvelle physique qui émergea au cours des années 1920, bâtie sur les théories de la Relativité et de la Mécanique quantique, jeta un doute sur les principes fondamentaux posés par Newton et on crut généralement que les lois de la Mécanique et la théorie de la gravitation avaient été renversées. Le rôle des Principes, comme guide absolu de la pratique de la Physique, fut alors considérablement diminué. Alors qu'en 1900, par exemple, le physicien mathématicien britannique Joseph Larmor citait des passages des Principes afin de démontrer qu'il suivait Newton en affirmant l'existence d'un éther, vers le milieu des années 1920 une telle référence aurait été de peu de poids.

En 1919, l'astronome et astrophysicien britannique A.S. Eddington réussit à apporter un large support à la nouvelle théorie relativiste de la gravitation d'Einstein en affirmant l'avoir vérifiée expérimentalement contre ce qu'il appelait « la Loi Newtonienne ». L'expérience consistait à mesurer la distance à laquelle un rayon de lumière d'étoile était dévié lorsqu'il passait près du Soleil, et quand Eddington annonça que l'expérience avait confirmé la théorie d'Einstein, le résultat fut diffusé de manière sensationnelle dans la presse populaire et largement accepté comme concluant.

Cependant, l'image de Newton ne parut pas ternie par ces événements et les Principes assumèrent rapidement un nouveau rôle comme texte fondamental pour ce que l'on appela alors « la Physique classique ». Ecrivant en 1928, Eddington soutint que, bien que le terme « Physique classique » n'ait jamais été précisément défini, l'idée générale est que le schéma de loi naturelle développé par Newton dans les Principes propose un modèle dans lequel tous les développements ultérieurs peuvent être envisagés comme en découlant. D'après Eddington, la théorie ondulatoire de la lumière, la théorie cinétique de la chaleur et le concept de l'électricité comme « grain de tension dans l'éther » étaient tous en accord avec l'extensibilité du schéma original. Le fait, comme Eddington le croyait, qu'aucune révision majeure des principes fondamentaux de Newton n'ait eu lieu jusqu'au vingtième siècle était un hommage à la perspective originale et universelle de Newton.

PRINCIPIA THE 20TH CENTURY

During the first quarter of the twentieth century, theoretical physics underwent a transformation that radically changed physicists, perception of the Principia. The new physics which emerged during the 1920s, built upon the theories of relativity and quantum mechanics, cast doubt upon the fundamental principles laid down by Newton, and it was generally believed that his laws of mechanics and theory of gravitation had been overthrown. The role of the Principia as an authoritative guide to the practice of physics was thus consider-ably diminished. In 1900, for example, the British mathematical physicist Joseph Larmor cited passages from the Principia in order to demonstrate that he was following Newton in assuming the existence of an ether; by the mid-1920s such an appeal would have carried little weight.

In 1919 the British astronomer and astrophysicist A.S. Eddington succeeded in gaining widespread support for Einstein's new relativity theory of gravitation by claiming to have tested it experimentally against what he called the 'Newtonian Law'. The test consisted in measuring the extent to which a beam of starlight was bent as it passed close to the Sun, and when Eddington announced that the test had confirmed the Einsteinian theory, the result was sensationally reported in the popular press and widely accepted as conclusive.

Newton's image remained untarnished by these events, however, and the Principia quickly assumed a new role as the foundational text for what was referred to as 'classical physics'. Writing in 1928 Eddington argued that although the phase 'classical physics' had never been 'closely defined... the general idea is that the scheme of natural law developed by Newton in the Principia provided a pattern which all subsequent developments might be expected to follow. According to Eddington, the wave theory of light, the kinetic theory of heat and the concept of electricity as 'nuclei of strain in

Des remarques de cette sorte encouragèrent la croyance en l'existence d'une unique « Physique classique » d'avant le vingtième siècle qui représentait l'inévitable développement des principes posés par Newton dans les Principes. Cette image perdure et aujourd'hui, la Physique classique représente un cadre dans lequel les lois de Newton et la théorie de la gravitation sont enseignées et sur lequel sont basés les plus élémentaires sujets de Physique : rôle analogue à celui joué par les Principes eux-mêmes, au début du dix-neuvième siècle, dans les licences mathématiques de Cambridge.

L'année 1927 marqua le deux-centième anniversaire de la mort de Newton et quoique, à ce moment là, les nouvelles physiques fussent largement adoptées, les Britanniques profitèrent de l'occasion pour réaffirmer leur croyance en la prééminence du rôle de Newton dans l'histoire de la Science. Un large éventail de « célébrations » eut lieu pour marquer l'occasion et, ouvrant une telle réunion dans la vieille école de Newton à Grantham, l'éminent physicien James Jeans parla pour la plupart de ses collègues britanniques en proclamant qu'il croyait que Newton était certainement le plus grand homme de science et peut-être la plus grande intelligence que la race humaine ait jamais connue.

Les célébrations de 1927 soulevèrent un nouvel intérêt au sujet de la vie et des travaux de Newton, et durant les années qui suivirent, un courant continu d'études historiques furent publiées. L'augmentation rapide du nombre d'historiens professionnels et philosophes scientifiques durant les années 1950 et 1960 fit de ce courant un torrent et en plus des nombreux livres et textes scolaires, la correspondance et les documents mathématiques de Newton sont apparus en publications intégrales multivolumes. « L'Industrie Newton » ainsi que cela a été qualifié ne montre aucun signe de récession, néanmoins, et il semble que le débat prolongé entre les historiens et les philosophes sur la signification réelle du travail du plus grand philosophe de Grande-Bretagne doive continuer sans répit.

Ce texte est la dernière traduction des 10 panneaux de la belle Exposition sur « Les Principes » que l'ADASTA a le privilège de posséder et de proposer en location.

Pour conclure ce travail, dans le prochain numéro d'AUVERGNE SCIENCES sera publiée une courte biographie de Newton.

S. Gely

the ether' were all'allowed for in the elasticity of the original scheme'and the fact, as Eddington believed, that no major revision of Newton's fundamental principles occurred until the twentieth century was'a tribute to the comprehensiveness of Newton's original outlook.'

Remarks of this kind fostered belief in the existence of a unique pre-twentieth century 'classical physics', which represented the inevitable development of the principles set down by Newton in the Principia. This image has endured, and today 'classical physics' represents a framework within which Newton's laws and theory of gravitation are taught, and upon which most elementary courses in physics are based - a role similar to that played by the Principia itself in the Cambridge Mathematical Tripos during the early nineteenth century.

The year 1927 marked the two hundredth anniversary of Newton's death and although by this time the new physics was being widely adopted, the British took advantage of the occasion to reaffirm their belief in the pre-eminence of Newton's role in the history of science. Large scale 'celebrations' were held to mark the occasion and, opening one such meeting at Newton's old school in Grantham, the eminent physicist James Jeans spoke for most of his British colleagues in proclaiming his belief that Newton was 'certainly the greatest man of science, and perhaps the greatest intellect that the human race has ever seen'.

The 1927 celebrations aroused fresh interest in Newton's life and works, and during the years that followed a steady stream of historical studies were published. With the rapid increase in the number of professional historians and philosophers of science during the 1950s and 1960s, this stream became a torrent and, in addition to numerous books and scholarly articles, Newton's correspondence and mathematical papers have now appeared in comprehensive multi-volume publications. The' Newton industry', as it has been dubbed, shows no sign of going into recession, however, and it seems that the protracted debate amongst historians and philosophers over the real significance of the work of Britain's greatest natural philosopher is set to continue unabated.

Written and compiled by A. C. Warwick

Les Jeunes Pousses

Malgré les intempéries hivernales et la neige qui a choisi de tomber en abondance le mercredi, « les Jeunes Pousses » ont été assidues à l'ADASTA et je les en félicite.

En décembre les enfants ont visité le musée Lecocq, l'exposition sur l'ADN et se sont initiés aux notions d'atomes et de molécules. En janvier et février ils ont « fait » de la chimie en réalisant quelques expériences : diverses électrolyses, la digestion de l'amidon par la salive, la recherche du glucose dans les aliments, etc...

La séance de mars était consacrée à l'étude du son. Messieurs Garcia et Ragout ont fait fabriquer aux « Jeunes Pousses » un violon et une flûte. Quelle joie de jouer en orchestre avec des instruments très rudimentaires mais créés par soi-même.

Nos « Jeunes Pousses » sont devenues de véritables stars. Clermont-1ère leur a consacré une émission le 22 janvier et le journal « La Montagne » a écrit un intéressant article les concernant sous le titre « Les sciences on en a une énorme envie ! »

Le 29 mars prochain les « Jeunes Pousses » iront à Paris au Palais de la Découverte ; ils visiteront aussi la Conciergerie et Notre Dame de Paris.

A suivre dans le prochain numéro.

P. Tourreix

Livre « Acteurs et Fonctions Economiques dans la Mondialisation »

Suite à la conférence de Monsieur Jean FAU le 20 novembre 2002

La mondialisation peut-elle être pensée sans Internet, sans les délocalisations, sans les paradis fiscaux..., sans la « nouvelle économie » ? Ces événements ont un impact immédiat sur les conditions de vie et de travail dans les pays industriels et en développement. Jean Fau se propose d'en étudier les mécanismes en partant de la relation clients-fournisseurs, base de l'économie de marché. Il explore ainsi les grands champs macroéconomiques pour présenter les acteurs (l'individu, l'entreprise, l'Etat, les organismes internationaux) dans la mondialisation et leurs fonctions économiques.

- Le contrat : base de l'économie de marché
- L'argent dans l'économie de marché
- La mondialisation et ses conséquences
- L'économie solidaire et sociale

Une série de fiches thématiques, en fin d'ouvrage, guide le lecteur dans la compréhension des changements économiques. Ce livre s'adresse aux étudiants et aux jeunes chercheurs en économie, en gestion et en sciences sociales, plus généralement.

Jean FAU, diplômé de l'Ecole Nationale Supérieure des Arts et Métiers et ingénieur européen, a exercé dans l'industrie dans les domaines d'ingénierie, de l'industrialisation de produit, de gestion et de management de la qualité. Chargé de cours dans plusieurs écoles d'ingénieur, il a publié « La Qualité au Quotidien », éditions Polytechnica, Paris 1992.