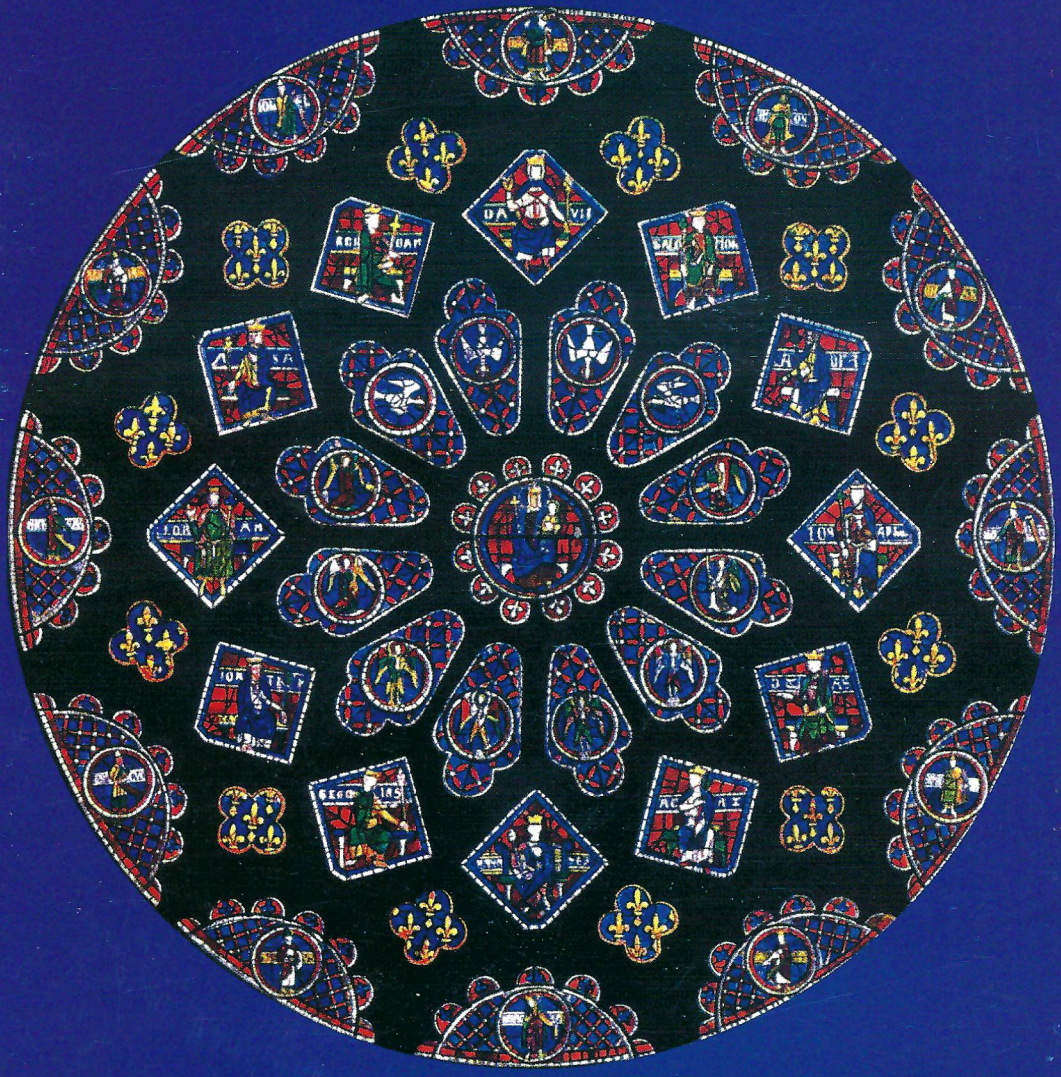
AUVERGNE Sciences

N° 64 - décembre 2006



Les 20 ans de l'Adasta
Hommage à Roland Jouanisson
Le laser mégajoule
Les Jeunes Pousses

BULLETIN DE L'ADASTA

Association pour le Développement de l'Animation Scientifique et Technique en Auvergne

éditorial



Le 05 juin 1986 l'Association pour le Développement de l'Animation Scientifique et Technique en Auvergne est née officiellement par le dépôt de ses statuts et la déclaration publique de sa fondation. C'est après avoir fait connaître les travaux pédagogiques du Père Merle que Roland Jouanisson, encouragé par les responsables du Palais de la Découverte, a pensé que l'heure était venue de fédérer les bonnes volontés pour créer un centre régional scientifique : l'ADASTA.

En fêtant ses 20 ans d'existence le 4 octobre 2006, elle se devait de célébrer son fondateur, Roland Jouanisson. Cet évènement quasi-historique fut commémoré par un émouvant hommage rendu à cet éminent physicien en présence de physiciens, chimistes, biologistes, géologues, ingénieurs et relayé par la presse écrite, la radio et la télévision. Etaient également associés les représentants des administrations, des sociétés et des associations qui nous apportent leur soutien scientifique et financier.

Grâce à un partenariat scientifique efficace et convivial avec le Président du site Riche-Lieu, Monsieur Louis Avan, l'ADASTA continue d'accomplir sa mission en toute sérénité.

Roland Jouanisson est mort il y a deux ans et son œuvre perdure ; dans sa grande modestie il n'avait qu'un seul objectif : faire partager au plus grand nombre son amour de la science ; c'est pourquoi nous avons choisi la photo de la Rose de la façade Est de la cathédrale de Chartres en première page de couverture. La démonstration en est faite dans le document :

IMAGES DE DIFFRACTION
Extrait de texte et documents de Roland Jouanisson
présentés lors des 50e journées nationales de l'Union des Physiciens- Clermont-Ferrand 2002

Roland Jouanisson écrivait que les structures périodiques sont susceptibles de fournir des figures présentant un intérêt esthétique, par exemple de trouver des ressemblances avec les oeuvres artisanales ou architecturales, comme les Roses de nos cathédrales gothiques. Habituellement la source est un laser He-Ne de faible puissance, pour certains un laser à argon dont on a séparé les raies vertes, bleues et violettes.

Laser, toujours, avec l'article « Le Laser Mégajoule » écrit par Michel Massaux qui fut aussi un très proche collaborateur de Roland Jouanisson.

C'est avec une grande tristesse que nous venons d'apprendre le décès de la maman de notre secrétaire générale Annie Ville. D'un dévouement exemplaire à l'ADASTA, nous lui présentons nos bien sincères condoléances et prenons part à son immense peine.

Le Président
Jean-Claude CAPELANI

Merci à nos sponsors

AUVERGNE
CONSEIL RÉGIONAL D'AUVERGNE
CEA
CONSEIL GENERAL DU PUY-DE-DOME
ministere jeunesse education recherche
ministere delegue recherche et nouvelles technologies
MICHELIN
VILLE DE CLERMONT FERRAND
IMPRIMERIE PORCU
Volvic
EDF

Comité de rédaction de la Revue Auvergne-Sciences
Président : *Paul Avan*
Rédacteur en chef : *Philippe Choisel*
Membres : *Jocelyne Allée, Nathalie Andréoletti, Georges Anton, Vincent Barra, Jean-Claude Capelani, Jean Chandezon, Luc Dettwiller, Paul-Louis Hennequin, Michel Naranjo, Annie Ville.*

sommaire

Les 20 ans de l'ADASTA 3
Hommage à Roland JOUANISSON 4
L'eau, élément fondamental du vivant 7
Un chantier médiéval en Bourgogne : le château de Guédelon 9
Le laser mégajoule 11
Divers aspects de l'eau 19
Sons musicaux continus de basses fréquences 22
Lumière et luminescence Nanosciences et nanatechnologies 25
Visite du site des pistes d'essais de la Manufacture française Michelin 26
Jeunes Pousses et informations 27

Photo de couverture : *cliché aimablement prêté par Louis AVAN de l'Adasta.*
Remerciement également aux auteurs des autres photos.
Impression : *Imprimerie Porçu - Cournon d'Auvergne*

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







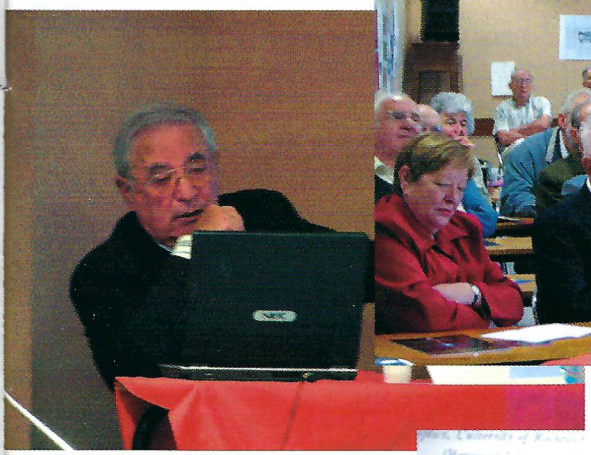

HOMMAGE A R.JOUANISSON

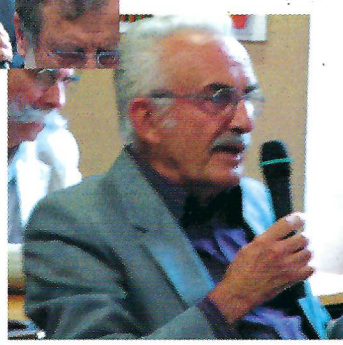


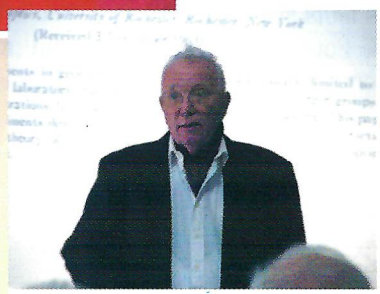


20 ans
4 octobre 2006










Hommage à Roland JOUANISSON

Par Marcel BATHIER

Professeur honoraire à l'Université Blaise Pascal

J'ai connu Roland Jouanisson dès les années cinquante lorsque, préparant la licence ès sciences à la Faculté de Clermont, il a été mon élève dans le cadre du certificat d'études supérieures de physique générale. J'étais alors chargé des travaux pratiques et des séances de problèmes – qu'on n'appelait pas encore travaux dirigés – et, après le demi-siècle qui s'est écoulé depuis cette époque, je garde le souvenir de l'étudiant brillant et enthousiaste, manifestant un constant intérêt pour les applications des cours, posant des questions pertinentes, rédigeant ses devoirs d'une manière impeccable, effectuant les manipulations avec un soin et une habileté qui déjà présageaient les qualités du remarquable expérimentateur dont on allait admirer la dextérité quelques années plus tard.

Après avoir passé avec succès le concours de l'agrégation des sciences physiques, Roland Jouanisson a exercé pendant plusieurs années les fonctions de professeur de lycée, puis il a été nommé dans un poste de maître-assistant à la Faculté des sciences de Clermont. De retour dans l'établissement où il avait fait une partie de ses études, il a assuré jusqu'à la fin de son activité professionnelle la préparation des candidats aux épreuves de montages du CAPES et de l'agrégation. Les capésiens et les agrégatifs qui se sont succédé pendant près de trente ans ont bénéficié de sa compétence et de son dévouement. Toujours disponible, attentif aux difficultés des étudiants qui résidaient hors de Clermont, il s'est adonné avec passion à sa tâche d'enseignant.

Du 23 au 26 octobre 1982 se sont tenues à Clermont les journées nationales de l'Union des Physiciens. Au laboratoire de physique de l'UER des sciences exactes et naturelles de l'Université de Clermont II, nous avions souhaité apporter notre contribution à ces rencontres. Roland Jouanisson a alors suggéré de présenter aux participants des expériences spectaculaires trop difficiles à réaliser pour qu'on puisse les monter couramment. Il a choisi deux expériences fondamentales que Foucault avait mises au point au XIX^{e} siècle : la mesure de la vitesse de la lumière dans l'air et le pendule de Foucault. Pour lui permettre d'aborder dans les meilleures conditions leur réalisation qui comporte de multiples embûches, nous sommes remontés à la source, à savoir au Recueil des travaux scientifiques de Léon Foucault, et nous avons également consulté le plus grand nombre possible d'ouvrages, d'articles et de publications traitant de nombreux sujets théoriques et pratiques concernant ces deux expériences.

Les problèmes auxquels on est confronté pour construire un pendule de Foucault susceptible d'osciller d'une manière satisfaisante pendant plusieurs heures concernent essentiellement la boule, le fil, la suspension, la mise en mouvement, l'amortissement et l'observation des oscillations. Quelques mots sur l'historique du pendule de Foucault vont nous permettre de montrer comment Roland Jouanisson s'est inspiré des réalisations passées et a apporté des solutions personnelles dans le but de mettre au point sans difficultés majeures une expérience de cours concluante.

Foucault a observé pour la première fois le mouvement du pendule en 1850, dans la cave de sa maison, à Paris. L'appareil qu'il avait construit était constitué par une sphère de laiton pesant 5 kilogrammes, suspendue par un fil d'acier de 2 mètres de longueur à un support en fonte scellé au sommet de la voûte de la cave. Il mettait le pendule en marche dans une direction quelconque en immobilisant d'abord au moyen d'un fil combustible la boule écartée de sa position d'équilibre, puis, écrit-il, *« on mettait le feu au fil, qui, par ce moyen, rompu sans secousse, laissait le pendule osciller dans un plan bien déterminé. Une demi-heure plus tard, ce plan avait tellement changé de direction qu'on s'en apercevait au premier coup d'oeil. Répétée une multitude de fois dans des directions variées, l'expérience a toujours donné le même résultat. Le plan a constamment dévié ; et même il a toujours tourné autour de la verticale dans un sens tel, que dans ses retours successifs au-devant de l'observateur, la boule se portait de plus en plus vers la gauche. »*

L'étude théorique du pendule de Foucault permet de confirmer les faits observés. Pour établir, dans un repère terrestre, les équations du mouvement de la boule assimilée à un point matériel M, on part de l'équation fondamentale de la Dynamique écrite dans le repère de Copernic, en considérant comme constant en module et en direction le

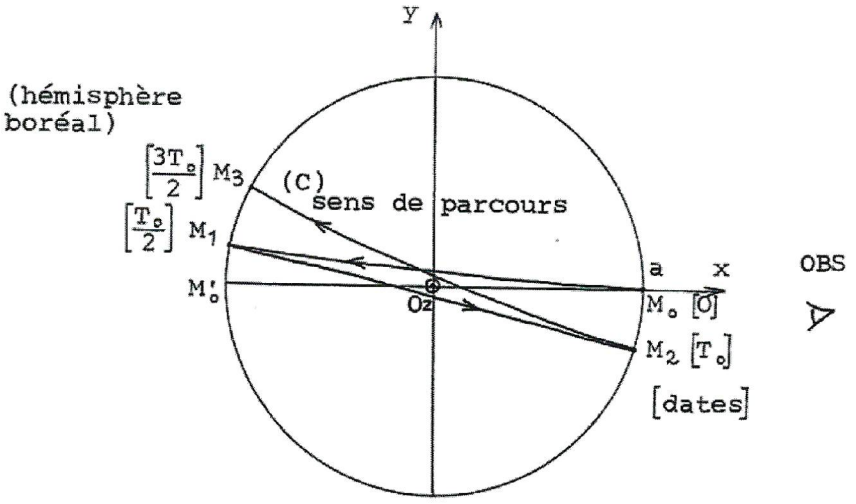


Fig. 1

vecteur rotation $\vec{\omega}$ de la Terre autour de l'axe des pôles car la précession et la nutation terrestres sont très faibles et on néglige l'accélération absolue du centre de la Terre. On ne tient pas compte de l'amortissement. Le pendule de Foucault met en évidence l'accélération de Coriolis, bien qu'elle soit extrêmement petite (inférieure à 20.10^{-6}g, g désignant l'accélération de la pesanteur), car ses effets accumulés deviennent apparents en raison de la durée importante de l'expérience.

Le pendule de Foucault démontre donc le caractère non galiléen des repères terrestres, conséquence de la rotation de la Terre autour de son axe, mais il serait incorrect de dire qu'il fait voir directement le mouvement diurne. Lorsque l'amplitude des oscillations est faible, si on la considère comme un infiniment petit du premier ordre, le point M se déplace, au second ordre près, dans le plan horizontal Oxy, Oz désignant la verticale ascendante du point O, position d'équilibre de M. Les calculs montrent que, dans le repère terrestre Oxyz, le point M, parti de M_0 à la date zéro sans vitesse initiale, a pour trajectoire (C) une hypocycloïde $M_0M_1M_2M_3$...représentée sur la figure 1. Ils permettent aussi d'établir que la période T_0 des oscillations est pratiquement celle des oscillations du pendule simple de la théorie élémentaire.

Ces différents résultats rendent compte des observations rapportées plus haut : l'arc de courbe M_0M_1 est très voisin du diamètre M_0M_0', beaucoup plus voisin que ne le montre la figure ; il est donc légitime de dire que la demi-oscillation du pendule se fait pratiquement dans un plan vertical et que, dans l'hémisphère nord, ce plan tourne autour de Oz dans le sens des aiguilles d'une montre ; la position de M correspondant aux élongations maximales successives en M_0, M_2, M_4... se déplace vers la gauche de l'observateur OBS.

Foucault avait prévu qu'en augmentant la longueur du fil on obtiendrait de meilleurs résultats, ce qui l'a conduit, dans une première étape, à construire un pendule de 11 mètres à l'Observatoire. Il a ensuite réalisé le pendule du Panthéon constitué par une boule de 28 kilogrammes suspendue à un fil de 67 mètres de longueur. La boule était primitivement immobilisée à 3 mètres de la verticale du point de suspension par un système d'attache comportant un fil combustible ; on la lâchait en brûlant le fil comme pour les premiers pendules. L'expérience du pendule de Foucault est l'une des plus célèbres du XIX^{e} siècle. Elle a passionné à la fois les hommes de science et le public. Pour disposer d'une hauteur importante, on l'a répétée dans les cathédrales de Reims, d'Amiens et de Cologne.

Pour présenter le pendule dans une salle de classe, on est contraint de limiter la longueur du fil à 2 mètres environ, ce qu'a dû faire Roland Jouanisson. Dès les premiers essais est apparue l'importance capitale de la mise en mouvement sans vitesse initiale. Des calculs numériques simples le confirment : pour le pendule du Panthéon, par exemple, la vitesse maximale de la boule au cours des oscillations est V_{max} = 1,15 m/s ; une vitesse initiale aussi faible que $V_0 = V_{max}/100$ suffirait pour transformer le pendule de Foucault en un pendule conique dont le mouvement schématisé par les figures 2 et 3 masquerait la rotation du plan d'oscillation.

Cette remarque explique pourquoi Roland Jouanisson a observé parfois une rotation en sens inverse du sens attendu lorsqu'il lâchait la boule sans précautions particulières. Pour obtenir la mise en mouvement du pendule avec une vitesse initiale négligeable, il a utilisé un électroaimant immobilisant la boule avant de la libérer. Il intercalait entre la boule et la pièce

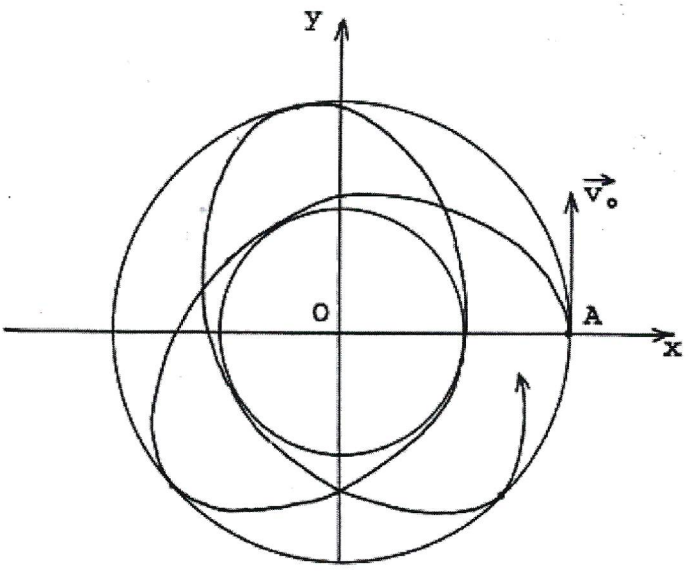


Fig. 2

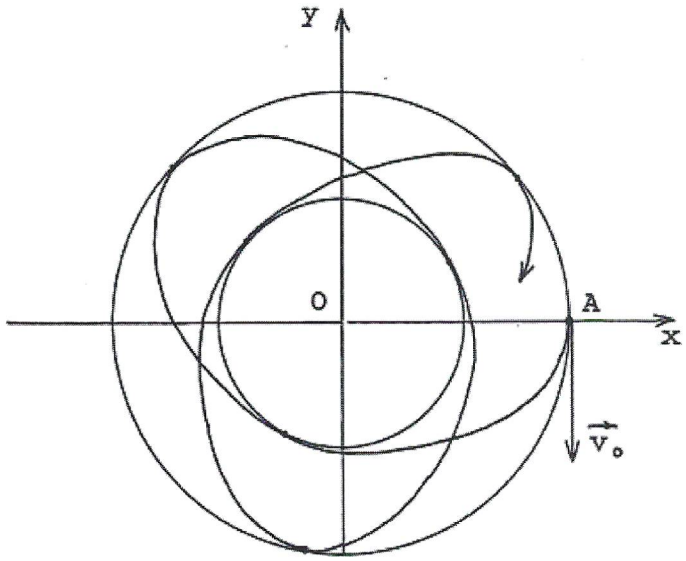


Fig. 3

polaire de l'électroaimant une petite bille d'acier afin que le contact soit aussi proche que possible du contact ponctuel idéal. Par tâtonnements, il réglait la hauteur de la bille de manière que la force d'attraction passe par le centre de gravité de la boule. Cette astuce devait assurer de meilleures conditions que ne l'aurait fait le contact direct entre la boule et l'extrémité plus ou moins plane de la pièce polaire.

On sait que le fil du pendule du Panthéon était en acier ; il avait un diamètre de 1,4 mm. Mais Foucault n'a laissé aucune autre indication au sujet de la suspension de la boule. D'après Lissajous, on avait fait subir au fil des retouches locales pour qu'il offre la même résistance à la flexion dans tous les sens. Aucun renseignement ne nous est parvenu en ce qui concerne la fixation de l'extrémité supérieure du fil. Roland Jouanisson a remplacé le fil d'acier par un fil de nylon de 0,3 mm de diamètre qu'on peut trouver dans les magasins d'articles de pêche. Le fil, fixé à sa partie supérieure à un support, traversait un trou de diamètre 0,4 mm percé dans une plaque métallique placée à quelques centimètres au-dessous du support. Cette ouverture devait être bien circulaire. Elle avait été faite au moyen d'un foret et on avait ébarbé ses bords à l'aide d'une pointe métallique, puis le résultat avait été contrôlé avec un microscope. Elle constituait le point d'attache du pendule. La sphère métallique était une boule de pétanque.

Le mouvement du pendule de Foucault n'est pas aussi simple que le prévoit la théorie élémentaire. Pendant la première demi-heure, le pendule oscille bien pratiquement dans un plan qui tourne autour de la verticale, mais le mouvement de la boule devient ensuite nettement elliptique. Cette dégradation du mouvement, qui avait été signalée par Bravais, va en s'amplifiant au cours du temps. Il ne s'agit pas de l'effet d'une vitesse initiale non négligeable, sinon il se manifesterait dès la mise en marche du pendule. Kamerlingh Onnes a donné une explication théorique du phénomène dans sa thèse (1879) en considérant le pendule de Foucault comme un pendule simple soumis à deux perturbations : l'action de la rotation de la Terre et la dissymétrie du fil. La première provoque une polarisation circulaire et la seconde une polarisation rectiligne ; la résultante est une polarisation elliptique. Kamerlingh Onnes a caractérisé quantitativement les dissymétries à partir de la trajectoire observée et il en a déduit une méthode permettant de les corriger. Cette théorie a été reprise par Schultz-DuBois beaucoup plus tard (1970) avec une nouvelle formulation, ce qui montre qu'après avoir intéressé nombre de chercheurs pendant plus d'un siècle le pendule de Foucault n'a pas encore livré tous ses secrets.

La boule du pendule du Panthéon portait un prolongement pointu, dirigé vers le bas, qui permettait de suivre son mouvement. Au repos, la pointe était au centre d'un grand cercle de bois de 6 mètres de diamètre divisé en 360°, chaque degré étant divisé lui-même en 4 parties. On donnait à la boule un déplacement initial de 3 mètres. Des tas de sable humide fraîchement moulés étaient placés près du rebord du cercle de bois de manière que la pointe du pendule, en les ébréchant, permette de repérer la trace du plan d'oscillation. La période était de 16,4 secondes et la rotation de près de 12° par heure. Roland Jouanisson a fait appel à une méthode optique pour mesurer l'angle de rotation du plan d'oscillation. Un faisceau laser horizontal lui permettait d'observer l'ombre du fil sur un écran placé à quelques mètres. Le fil étant fin, on voyait sur l'écran une figure de diffraction dont il était facile de repérer le milieu. En opérant pendant une durée de 5 minutes, valeur suffisamment petite pour que le pendule oscille bien dans un plan, on obtenait une rotation d'environ 1°. D'autre part, la durée des mesures étant faible, il n'avait pas été nécessaire de prévoir un dispositif d'entretien des oscillations.

La vitesse angulaire ω du plan d'oscillation du pendule s'exprime en fonction de la vitesse angulaire $\omega_1 = 7{,}3.10^{-5}$ rad/s de la Terre autour de l'axe des pôles et de la latitude $\lambda = 45°46'$ du lieu par la relation : $\omega = \omega_1 \sin \lambda$. Roland Jouanisson a vérifié la relation du sinus à 10 % près, résultat tout à fait honorable pour une expérience de démonstration.

Au cours des journées de l'UDP en 1982, Roland Jouanisson a également présenté, à la Maison des Congrès de Clermont, l'expérience de la mesure de la vitesse de la lumière par la méthode du miroir tournant en s'inspirant des descriptions et des schémas laissés par Foucault. Le montage réalisé ne permettait pas d'obtenir des résultats quantitatifs, mais il donnait un déplacement de l'image lumineuse de plusieurs centimètres. Les participants au congrès ont apprécié ces deux expériences que beaucoup voyaient pour la première fois.

Dossier



L'eau, élément fondamental du vivant

Propriétés physiques et physiologiques

Par Georges ANTON

Ingénieur chimiste ENSCT, Vice-Président de l'ADASTA.

INTRODUCTION

Plus de 50% du poids corporel humain est constitué d'eau dont les 2/3 se trouvent sous forme de liquide intracellulaire. Le 1/3 restant se retrouve essentiellement dans le plasma sanguin qui représente à lui seul environ 25% du liquide extracellulaire. Le produit par excellence de nos cellules est donc bien cette petite molécule chimiquement représentée par la formule ***H_2O.***

Les biomolécules organiques et inorganiques présentes dans les cellules vivantes réagissent principalement dans un environnement aqueux. L'eau solubilise et modifie les propriétés des biomolécules comme les acides nucléiques, les protéines et les hydrates de carbone, en formant des liaisons hydrogène avec leurs groupements polaires fonctionnels. Ces interactions modifient les propriétés des molécules et changent leur conformation en solution, ce qui leur fait acquérir ainsi les propriétés essentielles nécessaires au bon déroulement des processus de la vie.

Importance biomédicale

Parmi les mécanismes homéostasiques, c'est-à-dire ceux grâce auxquels les organismes maintiennent un environnement intracellulaire constant, la régulation du bilan hydrique joue un rôle essentiel. Celui-ci est sous la dépendance des mécanismes hypothalamiques contrôlant la soif, et de l'hormone antidiurétique pour ce qui est de la rétention et de l'excrétion de l'eau par les reins. Les états de déplétion hydrique et ceux d'excès en eau de l'organisme, qui sont courants, sont souvent accompagnés d'un manque ou d'un excès de sodium. La ***déshydratation*** *peut résulter d'une diminution des apports en eau (coma par exemple) ou d'une augmentation des pertes en eau (sueurs profuses, pertes d'origine rénale dans le diabète sucré, diarrhée chez les enfants ou en cas de choléra). L'****hyperhydratation*** *est due à une augmentation des apports en eau ou à une baisse des excrétions (insuffisance rénale sévère par exemple). Deux réponses distinctes, la conservation de l'eau par diminution de la diurèse et l'augmentation des apports par la soif, servent à maintenir l'homéostasie. On notera qu'en ce qui concerne une bonne régulation de ce bilan hydrique, le maintien du pH du liquide extracellulaire entre 7.35 et 7.45 cad dans des limites extrêmement étroites, est absolument indispensable quant à la préservation de la santé.*

A] L'EAU EST LE SOLVANT BIOLOGIQUE IDÉAL

A1] H_2O est une molécule tétraédrique légèrement oblique

La molécule d'eau est un tétraèdre irrégulier ayant un atome d'oxygène en son centre. Les deux liaisons avec les atomes d'hydrogène sont dirigées vers deux sommets du tétraèdre, tandis que les électrons non appariés sur les deux orbitales hybrides sp^3, occupent les deux autres sommets. L'angle (105°) entre les deux atomes d'hydrogène est légèrement inférieur à l'angle tétraédrique (109 ° 28 ') que l'on trouve dans la molécule parfaitement symétrique du méthane CH_4. On obtient ainsi pour l'eau un tétraèdre légèrement oblique.

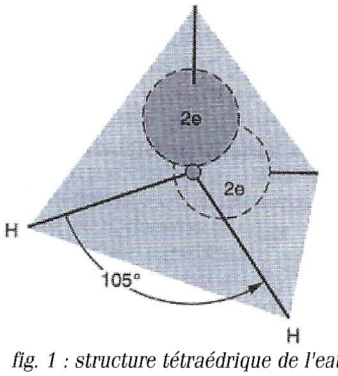


fig. 1 : structure tétraédrique de l'eau

A2] Les molécules d'eau forment des dipôles

En raison de cette structure oblique, la charge électrique n'est pas répartie de façon uniforme dans la molécule d'eau. Le côté de l'atome d'oxygène opposé à celui des deux hydrogènes est relativement riche en électrons tandis que de l'autre côté, les noyaux d'hydrogène relativement non protégés forment une région de charge locale positive. Le terme "dipôle" désigne des molécules comme l'eau, qui ont une charge électrique (électrons) non uniformément distribuée dans leur structure. *L'ammoniac est aussi dipolaire comme le sont de nombreux constituants biochimiques tels que les alcools, les phospholipides, les acides aminés et les acides nucléiques.*

A3] Les molécules d'eau forment des liaisons hydrogène

Les liaisons hydrogène confèrent à l'eau liquide une structure macromoléculaire comme la glace. Ceci est la conséquence de la capacité des dipôles d'eau à s'auto-associer à l'état liquide et solide. L'interaction électrostatique entre le noyau d'hydrogène d'une molécule d'eau et la paire d'électrons non appariés d'une autre molécule s'appelle **liaison hydrogène**. Ces liaisons favorisent l'association des molécules d'eau dipolaires en rangs ordonnés. Pour se former, une liaison hydrogène a besoin d'un donneur et d'un accepteur d'hydrogène. On remarquera que le dipôle de l'eau peut constituer à la fois un accepteur et un donneur d'atome d'hydrogène (cf. figure ci-après).

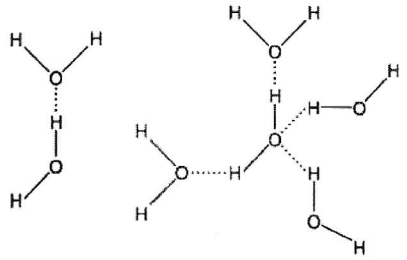


Fig. 2 : à gauche: association de deux molécules d'eau dipolaires. Les lignes pointillées représentent les liaisons hydrogène.
A droite: association d'une molécule d'eau centrale à quatre autres molécules par des liaisons hydrogène. Cette structure est typique de la glace et à un degré moindre de l'eau liquide.

Les liaisons hydrogène formées au sein de l'eau liquide sont de caractère transitoire et leur demi-vie d'association-dissociation est de l'ordre de la microseconde. Dans la glace chaque dipôle est associé à quatre autres dipôles d'eau, alors qu'à l'état liquide ce nombre est voisin de 3,5. A l'exception du caractère transitoire des interactions dipolaires, l'eau liquide ressemble plus à la glace qu'on ne l'avait imaginé à l'origine. Comparées aux liaisons covalentes, les liaisons hydrogène sont faibles. La rupture d'une telle liaison dans l'eau liquide nécessite une énergie d'environ 4,5 kcal / mol, ce qui équivaut à moins de 5% des 110 kcal nécessaires pour rompre une liaison O – H de l'eau.

A4] Les liaisons hydrogène stabilisent les protéines et les acides nucléiques

Tandis que le méthane (masse moléculaire 16) et l'ammoniac (m = 17) sont des gaz à température ambiante, l'eau (m = 18) est un liquide. Quelle en est la raison ? La réponse se trouve dans la capacité qu'a l'eau de former des liaisons hydrogène, lesquelles permettent aussi d'expliquer la viscosité et la tension superficielle relativement élevées de l'eau.
Du fait de son caractère dipolaire et de sa capacité de former des liaisons hydrogène, l'eau est capable de servir de solvant aux ions et à de nombreuses molécules organiques. Les molécules qui peuvent former des liaisons hydrogène avec l'eau (les composés ayant un groupement – OH - SH ou – NH_2, par exemple les amines, les esters, les aldéhydes et les cétones) sont facilement solvatées et leur solubilité dans l'eau est, de ce fait, augmentée. Les macromolécules, telles que les protéines, qui sont stabilisées par des liaisons intermoléculaires peuvent échanger certaines de ces liaisons hydrogène au niveau de leur surface contre des liaisons hydrogène avec l'eau, ce qui augmente encore leur solubilité. Ainsi, les protéines solubles sont entourées d'une couche de molécules d'eau.

Le caractère dipolaire de l'eau modifie profondément ses interactions avec les biomolécules. Dans l'environnement aqueux des cellules vivantes, de nombreuses interactions électrostatiques s'établissent entre les groupements polaires des biomolécules. Les molécules d'ADN se replient de telle sorte que leurs sucres et leurs groupes phosphates polaires soient en contact avec les molécules d'eau. De façon similaire, les résidus polaires des protéines se retrouvent essentiellement à la surface des biopolymères, où ils participent à de nombreuses interactions avec les molécules d'eau. La figure 3 illustre la formation des liaisons hydrogène entre l'eau et certains groupements fonctionnels représentatifs des biomolécules. On notera que les alcools, tout comme l'eau, peuvent participer à la fois comme donneur et accepteur d'hydrogène, à la formation de liaisons hydrogène avec les molécules d'eau ou d'autres biomolécules. Par contre les atomes d'oxygène des cétones ou des esters servent seulement d'accepteurs d'hydrogène.

B] UNE CONSÉQUENCE EXTRAORDINAIRE DES PROPRIÉTÉS DE LA MOLÉCULE H_2O DANS LE DOMAINE DE LA PHYSIOLOGIE VÉGÉTALE

Plusieurs mécanismes peuvent être invoqués, d'importance très inégale, pour expliquer la montée de la sève brute dans les tiges des végétaux. On

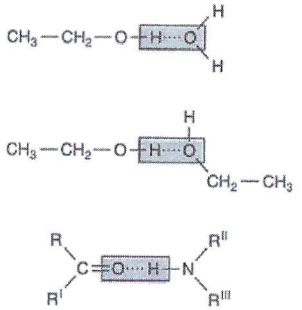


Fig. 3 : autres groupements polaires participant à la formation de liaisons hydrogène

soulignera cependant le caractère extraordinaire du phénomène que l'on peut expliciter sous la forme d'une question simple, longtemps restée sans réponse et qui pourrait être :
Comment l'eau, qui est absorbée au niveau des racines, peut-elle monter jusqu'au sommet d'arbres de 30 à 40 mètres de haut, quand ils ne font pas 100 mètres ou plus comme c'est le cas pour les séquoias d'Amérique ?
Les forces de capillarité ne peuvent être envisagées que dans le cas des végétaux très bas ou des fleurs coupées. La poussée radiculaire - encore appelée poussée racinaire - joue un rôle important la nuit, la transpiration étant alors faible, ou au printemps pour alimenter les jeunes bourgeons quand l'appel d'eau exercé par leur prolifération est restreint. Mais le plus souvent, c'est la **transpiration** qui est le principal moteur de la montée de la sève.
Cet appel d'eau des parties aériennes de l'arbre consécutive à l'évaporation, se retransmet le long de la tige et du tronc grâce à la cohésion des filets d'eau comme le montre l'expérience de Dixon (1895) schématisée fig. 4 .
Cette cohésion est la conséquence directe du caractère polaire de la molécule $\mathbf{H_2O}$ comme expliqué précédemment. La continuité des filets d'eau dans les troncs se démontre à l'aide de l'iode radioactif.

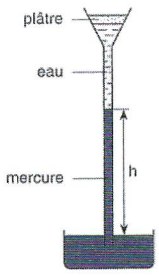


Fig. 4

Un entonnoir fermé d'une plaque de plâtre poreux est relié par un tube vertical à une cuve à mercure ; l'évaporation provoque un appel d'eau qui entraîne une élévation de la colonne de mercure de plus de 1 m.
Les forces de gravité freinent l'ascension. Elles peuvent être importantes s'il s'agit de grands arbres : dans un séquoia de 100 mètres de hauteur, une colonne d'eau exerce à sa base une pression de 10 bar (1 MPa), mais, même dans ce cas, ce facteur est négligeable devant l'aspiration exercée par la transpiration, qui peut atteindre plusieurs dizaines ou centaines de MPa.

Références bibliographiques : Biochimie HARPER 25ème édition
Physiologie végétale HELLER, ESNAULT et LANCE 6ème édition



Un chantier médiéval en Bourgogne : le château de Guédelon

Par Jocelyne ALLÉE
Ancien Inspecteur Pédagogique régional.

Entrons sur le chantier du Château de Guédelon dans l'Yonne, et nous voilà aussitôt plongés au coeur du Moyen Âge, dans un espace en pleine activité, loin des bruits habituels de notre civilisation.

Le 25 mars 2006, un petit groupe d'adhérents de l'ADASTA s'est joint au voyage des Jeunes Pousses et a partagé pendant quelques heures la vie d'un chantier médiéval.

LE PROJET

C'est Michel Guyot, propriétaire du Château de Saint-Fargeau, qui est à l'origine du projet. Féru d'archéologie, il effectue des recherches sur le passé de son château et conçoit l'idée audacieuse de bâtir un château fort avec les méthodes et les moyens, les matériaux et les outils du Moyen-Âge : une véritable aventure.
Un comité scientifique est constitué, composé d'architectes, archéologues et historiens. L'élaboration des plans est confiée à Jacques Moulin, architecte en chef des Monuments Historiques. Celui-ci définit l'emplacement des principaux ouvrages et prévoit une voûte d'ogives dans la tour de la chapelle. Comme il existe peu de documents traitant de la construction au XIII^{ème} siècle, un groupe de constructeurs part en mission, un peu partout dans les régions de France, pour étudier de plus près l'architecture d'autres châteaux de la même époque et en ramener de nombreux relevés. Tous les plans et décisions sont soumis au comité scientifique pour être validés.
Peu à peu le projet s'infléchit, le but n'étant plus de voir la réalisation d'un château, mais plutôt de vivre les étapes de sa construction et d'offrir cette possibilité au public. La première pierre sera posée en 1997.

LE SITE



Le site

Il a été soigneusement choisi selon les critères d'autrefois : la configuration propice à un ouvrage défensif, dans un environnement où se trouvent les matériaux nécessaires à sa construction. C'est une ancienne carrière dans une forêt de chênes, entre Saint-Amand-en-Puisaye et Saint-Sauveur-en-Puisaye dans l'Yonne.
On trouve également sur place le grès, le bois, le sable, l'argile, utiles à la construction, mais aussi au chauffage et à la fabrication de la vaisselle. En revanche la chaux, dont les procédés anciens de fabrication étaient dangereux, et le fer destiné à forger les outils, viennent d'ailleurs. Le chantier doit être un village autonome et réserver un espace pour les animaux : les chevaux qui tirent les charrettes, les poules, les chèvres et les porcs qui servent à nourrir à les ouvriers.

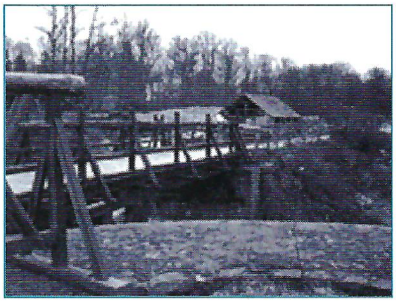
LE DEBUT DES TRAVAUX

Selon les plans adoptés le futur château doit être construit suivant un dessin rectangulaire et comporter quatre tours d'angle, un chemin de ronde et un corps de logis, l'accès se faisant par un pont dormant.



Base de la construction

Les travaux commencent dès 1997 par le défrichement et l'ameublissement du terrain. Puis les bâtisseurs entreprennent la construction de différentes parties : fondations, élévation des murs, premières pierres du corps de logis, de la tour de la chapelle, construction du pont dormant, de la poterne.



Pont dormant

OUVRIERS ET TECHNIQUES

Depuis le début des travaux, une cinquantaine d'ouvriers sont présents sur le site à la belle saison de mars à novembre. Ce sont les essarteurs qui les premiers sont intervenus sur le chantier afin de défricher et aménager un espace pour les bâtiments et une partie du terrain destinée à la culture.



Le carrier

Les scieurs de long débitent les troncs de chênes, frênes ou hêtres en poutres et en planches destinées aux charpentiers. Les bois de moins haute qualité et les fagots sont employés au chauffage et à l'alimentation des fours. Les carriers extraient les pierres de la carrière, les tailleurs de pierre donnent à celles-ci la forme convenable. Le

mortier à base de sable et de chaux éteinte est préparé dans un four par le chaufournier et utilisé par les maçons qui élèvent les murs. Les charpentiers transforment le bois en



Le charpentier

échafaudages, charpentes, chariots et portes. Mais il y a aussi une potière pour réaliser pots, écuelles, tout le nécessaire en argile cuite, une cordière qui tresse le chanvre, un vannier pour fabriquer les paniers, et un forgeron dont la tâche est de remettre en état les outils des autres corps de métier et de réaliser la ferronnerie du château.



La potière

Chacun dispose d'un petit bâtiment provisoire adapté à son travail.

On n'utilise strictement que les outils du XIII[ème] siècle, sauf peut-être les lunettes de protection portées par les ouvriers qui travaillent la pierre, petite concession aux lois de notre



La cage d'écureuil

époque. Le temps n'est pas un problème et peu importe si le tailleur de pierre passe sa journée à façonner celle-ci.

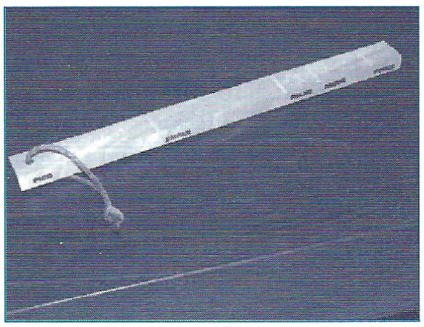
Les sources d'énergie se limitent quasiment à l'énergie animale : celle des chevaux, et aussi celle des hommes qui actionnent les cages d'écureuil et deviennent capables de soulever de lourdes charges.

Pour construire avec précision les éléments architecturaux, on dispose d'instruments de géométrie, tels que le compas et l'équerre. La corde à



La corde à 13 nœuds

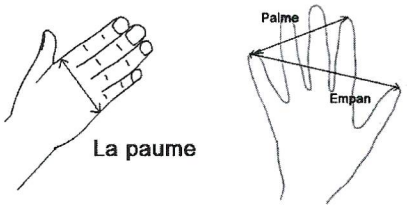
noeuds permet de résoudre bien des problèmes. Il s'agit d'une corde comportant 13 noeuds, et par conséquent 12 intervalles de même longueur : 1 coudée (environ 52,5 cm). Avec cet instrument on peut tracer le carré de côté 3, le triangle équilatéral de côté 4, le triangle isocèle



La mesure des longueurs

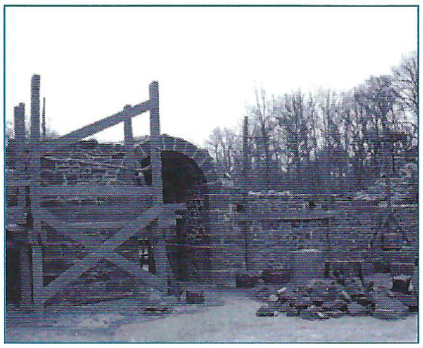
5,5,2, le triangle rectangle 3,4,5...

Il faut aussi savoir mesurer les longueurs dont les unités, au Moyen-Âge étaient empruntées à différentes parties du corps humain : pouce, paume, palme, empan, pied par exemple. Il s'ensuivait un certain flou dans les mesures quand on passait d'un lieu à un autre. Pour mettre d'accord l'ensemble du chantier, le maître d'oeuvre donnait à tous une réglette portant ses propres mesures.



GUEDELON EN 2006

Les courtines et les tours sont sorties de terre, et l'on peut déjà apprécier le dessin des voûtes en ogive. Le chantier devrait durer environ 25 ans, ce qui nous amène aux environs de 2022. L'entreprise a



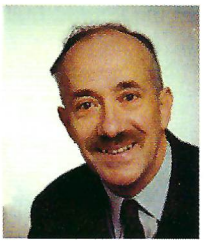
Porche

bénéficié d'aides de l'Etat au début de sa mise en oeuvre mais désormais ce sont les visites (245000 visiteurs en 2005) qui subviennent à son financement et notamment à la rémunération des ouvriers. Le visiteur reste frappé par la foi et la détermination qui animent tous les protagonistes, du bâtisseur à l'archéologue, et nul doute que le succès auprès du public ne se démentira pas dans les années à venir.



Tour

Chantier médiéval de Guédelon
D 955 - 89520 Treigny
Tél. 03 86 45 66 66
http://www.guedelon.com



Le laser mégajoule

Par Michel MASSAUX
Ancien maître de conférence de physique à l'Université Blaise Pascal, Clermont-Ferrand.

AVANT-PROPOS

L'article qui suit est le compte-rendu d'une visite effectuée le 19 octobre 2005 au CENTRE D'ETUDES SCIENTIFIQUES ET TECHNIQUES D'AQUITAINE (C.E.S.T.A.). *Il s'agit d'un site de recherche du Commissariat à l'Energie Atomique (C.E.A.), sur la commune du Barp (Gironde, entre Bordeaux et Arcachon. Organisée conjointement par les groupes AQUITAINE et AUVERGNE de la Société française d'Energie nucléaire (S.F.E.N.), cette visite a permis aux participants d'apprécier l'importance d'un vaste projet consacré au développement et aux applications des Lasers. Initié par les responsables de l'évolution des armes nucléaires de dissuasion, il propose de s'ouvrir largement à la recherche civile.*

INTRODUCTION

La fusion thermonucléaire offre des perspectives pour la production énergétique du futur, pleinement compatibles avec l'exigence de développement durable.
En effet, lors de l'union de deux noyaux atomiques légers pour former un noyau plus lourd, il apparaît une perte de masse qui entraîne un dégagement d'énergie considérable.
Pour que la fusion ait lieu, il faut surmonter la répulsion coulombienne entre les deux noyaux chargés positivement. Ce n'est possible que si ils sont animés de vitesses importantes, tout en restant confinés dans un volume restreint où leur densité est grande. Ces conditions exigent une température et une pression aussi élevées que possible. Le milieu réactif, appelé PLASMA, doit alors dégager par fusion une énergie supérieure à celle qui a été dépensée initialement pour le former.

Le LASER MÉGAJOULE a pour but de créer ponctuellement les conditions de la fusion de 2 isotopes de l'hydrogène, le deutérium et le tritium. A son achèvement en 2010, il permettra de réaliser des expériences de fusion contrôlée, consacrées pour partie à la connaissance du fonctionnement des armes thermonucléaires, mais aussi en vue d'une exploitation industrielle de réacteurs générateurs d'énergie, envisageable à l'échéance 2100.

LA NAISSANCE DU PROJET L.M.J. ET SON ÉVOLUTION

Le 6 avril 1998, la France a ratifié le Traité d'interdiction complète des essais nucléaires (T.I.C.E.), après avoir mené une dernière campagne de tests réels entre septembre 1995 et janvier 1996. Pour garantir la fiabilité et la sécurité des têtes nucléaires en service et pour en concevoir de nouvelles versions, la Direction des Applications Militaires (D.A.M.), intégrée au C.E.A. à la création de ce dernier le 8 octobre 1945, a mis au point un processus de SIMULATION, entrepris dès 1996.

Ce travail doit se faire sans essais nouveaux, mais en exploitant au mieux les résultats acquis précédemment. La démarche adoptée comporte 3 étapes : une **modélisation** du système d'arme, une **simulation numérique** de son évolution et une **validation expérimentale**, par parties, de son fonctionnement.

Pour y parvenir, de nouveaux et puissants outils de recherche sont indispensables : avant tout, des moyens informatiques très performants, mais aussi des instruments d'observation et d'expérimentation capables d'effectuer des mesures physiques précises, dans des conditions extrêmes de contraintes thermomécaniques, sur des matériaux subissant des modifications très rapides.

Laissons de côté le volet informatique, par nature évolutif.

Pour **l'observation** des étapes initiales du fonctionnement d'une arme, la D.A.M. a conçu une installation de radiographie X « éclair » à hautes performances, baptisée AIRIX (**A**ccélérateur à **I**nduction de **R**adiographie pour l'**I**magerie **X**). Sa vocation est de produire au coup par coup une photographie instantanée de l'état de matériaux simulant une charge nucléaire avant la réaction dégageant l'énergie explosive.

Cette procédure permet de valider les logiciels qui décrivent la phase préliminaire du comportement de l'arme ; elle exige de l'appareil des qualifications exceptionnelles (durée de prise de vue : 6 x 10-8 seconde ; précision dimensionnelle : 0,5 mm).

Insistons sur le fait qu'**AIRIX n'étudie pas de matières nucléaires** : celles-ci sont remplacées par des substances inertes de comportements mécanique et thermique identiques. Sa construction, entreprise dès 1997 sur un ancien camp militaire, devenu site propre du C.E.A., à Moronvilliers, à une vingtaine de kilomètres à l'Est de Reims, a été achevée en décembre 1999.
(Il existe aux Etats Unis une installation tout-à-fait comparable au sein du « Department of Energy » (D.O.E.), équivalent du C.E.A. ; baptisée D.A.R.H.T., elle se trouve au Centre de Recherche de Los Alamos, au Nouveau-Mexique).
Afin d'étudier en laboratoire les phénomènes physiques qui régissent l'étape finale du fonctionnement d'une tête nucléaire (mal appréciés au cours des essais réels), la D.A.M. a imaginé un dispositif capable de provoquer la fusion, sous contrôle, d'une très petite quantité de noyaux d'isotopes de l'hydrogène, le DEUTERIUM et le TRITIUM. Cette opération exige de porter le mélange à une température d'au moins 100 millions de degrés en un temps très court. Pour y parvenir, on fait converger des faisceaux Laser de haute intensité sur une cible sphérique creuse de très petit rayon contenant les réactifs. ***(Figure 1)***.

Nous reviendrons plus en détails dans le prochain paragraphe sur les exigences techniques de cette opération, qui reproduit, à échelle réduite, le processus thermonucléaire appelé **Fusion par confinement inertiel.**

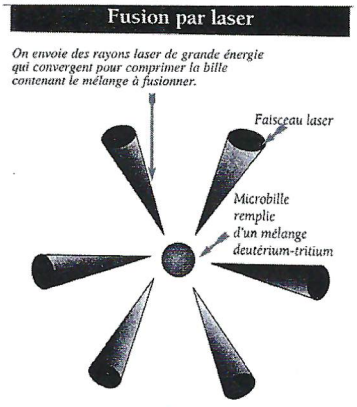


Fig.1
Le principe de la fusion par laser

A partir des résultats partiels obtenus dans différents Centres de Recherche du C.E.A. : Vaujours, Limeil-Valenton, (tous deux aujourd'hui fermés), Bruyères-le-Châtel, Saclay en Ile-de-France, Valduc, en Bourgogne, Le Ripault, en Indre-et-Loire et le C.E.S.T.A., en Aquitaine, un avant-projet très ambitieux fut établi dès 1995.

Il faisait suite à un accord, passé en 1994, entre des chercheurs de Limeil et leurs homologues américains du Laboratoire Lawrence de Livemore, près de San-Francisco (Californie). Etalée sur 10 ans, cette entente codifiait une coopération étroite dans l'étude, la conception et la réalisation des composants optiques de la chaîne de transfert de l'énergie, depuis la source de rayonnement jusqu'à la cible.

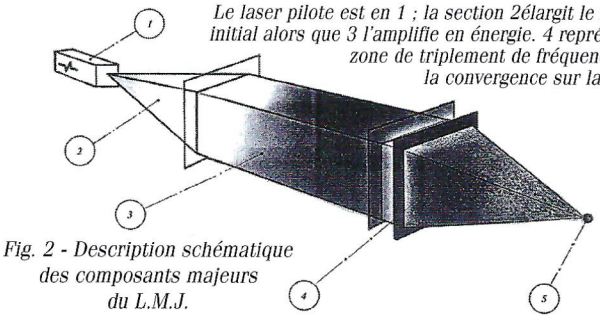
Un schéma concret fut établi de chaque côté de l'Atlantique.

Appelé **L**aser **M**éga-**J**oule (L.M.J.) en France, il fut dénommé « National Ignition Facility » (N.I.F.) aux U.S.A. Il se posa alors la question du lieu d'implantation du L.M.J. dans notre pays. Compte-tenu des attributions dévolues aux Centres de Recherche du C.E.A. et de leurs infrastructures existantes, deux possibilités s'offraient : Bruyères-le-Châtel, près d'Arpajon, au sud de Paris, où un établissement très discret se consacrait depuis longtemps aux études les plus confidentielles de la D.A.M., et le C.E.S.T.A., créé en 1964 pour développer les recherches théoriques et appliquées liées à la militarisation des engins de la force de frappe voulue par le Général de Gaulle (les lanceurs étaient testés non loin de là, au Centre d'Essais des Landes, à Biscarosse). Les avantages déterminants du second site : sismicité minimale, disponibilité de vastes étendues de sol plat, de faible valeur foncière, permettant une extension facile, firent pencher la balance en sa faveur. Peut-être l'influence d'Alain Juppé ne fut pas totalement étrangère à ce choix, entériné le 21 avril 1995...

La communauté scientifique régionale n'avait pas attendu cette date pour tisser des liens forts avec le C.E.S.T.A., malgré les contraintes sévères imposées par la confidentialité de ses activités. L'Université Bordeaux I avait depuis longtemps orienté certains thèmes de recherche vers des sujets touchant la physique des rayonnements et des plasmas, avec l'appui du C.N.R.S. ; de son côté, le **L**aboratoire d'**U**tilisation des **L**asers **I**ntenses, baptisé LULI, créé par l'Ecole polytechnique, trouvait là un champ d'application idéal à ses objectifs.

Ces convergences favorables, jointes aux exigences impératives de la Défense nationale, firent progresser rapidement le programme de construction du Laser Mégajoule, dont le plan définitif fut arrêté en 1996 ; il s'agit de diriger sur la cible – quasi ponctuelle – l'énergie apportée par 240 faisceaux lasers identiques dont le rayonnement, initialement infrarouge, est converti en ultraviolet après amplification (l'énergie nécessaire est de l'ordre de 2 Mégajoules, la puissance de crête atteint 300 Terawatts, TW). La ***Figure 2*** en présente le principe.

Pour valider ce schéma, comportant de nombreuses innovations et utilisant des matériaux n'ayant jamais été employés à une telle échelle, les concepteurs décidèrent de réaliser au préalable un prototype à 4 puis 8 faisceaux, appelé **L**igne d'**I**ntégration **L**aser (L.I.L.). Installé dans un bâtiment de 8500 m2, achevé en 1998, ce dispositif d'essai a commencé à fonctionner fin 2003.



Le laser pilote est en 1 ; la section 2élargit le faisceau initial alors que 3 l'amplifie en énergie. 4 représente la zone de triplement de fréquence avant la convergence sur la cible 3.

Fig. 2 - Description schématique des composants majeurs du L.M.J.

Depuis cette date, il subit de nombreux tests de qualification portant avant tout sur ses performances, sa fiabilité, mais aussi sur l'optimisation des opérations de maintenance.

Remarquons que les U.S.A. ont adopté une démarche analogue en construisant la maquette « Beamlet » avant de mettre en chantier le gros ensemble N.I.F..

Les conditions draconiennes imposées aux composants optiques ont nécessité une coopération étroite entre les responsables, de chaque côté de l'Atlantique, et les fournisseurs industriels compétents, souvent peu nombreux dans le Monde compte-tenu des certifications exigées.

Il a parfois fallu mettre à contribution des spécialistes en Sciences des Matériaux du C.E.A. pour imaginer et tester des techniques de préparation inhabituelles ; ce fut le cas avec la réalisation de monocristaux sans défauts de taille exceptionnelle. Par ailleurs, pour diminuer les coûts, le C.E.A. et son homologue américain le D.O.E. ont partagé les frais d'élaboration de certains composants.

En fin 2005, les bâtiments devant abriter le L.M.J. sortaient de terre, tandis que de grosses pièces de l'installation, comme la sphère en alliage léger de 10 mètres de diamètre, représentant la chambre d'expérience, étaient en cours d'usinage ou d'assemblage ***(Figure 3)***.

Les maîtres d'oeuvre du génie civil doivent garantir à ces composants majeurs une stabilité exceptionnelle. On voit là tout l'intérêt d'avoir choisi un emplacement exempt de manifestations sismiques significatives ! Pour les dalles supportant les chaînes LASER, de dimensions colossales (125 m x 30 m), les déplacements tolérés au cours d'une expérience ne devront pas excéder 3 µm !

Cela suppose une modélisation très fine de la dilatation des matériaux et de leur évolution dans le temps.

A lui seul, le local consacré à L.M.J. couvre 40 000 m² ; il exigera de couler au total 160 000 m³ de béton, car la stabilité des fondations est évidemment essentielle. Remarquons que c'est deux fois plus que ce qu'il a fallu pour construire le viaduc de Millau !

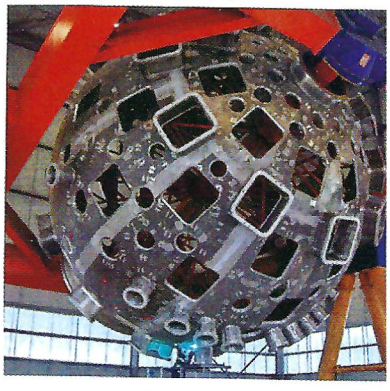


Fig. 3 - La sphère d'expérience du L.M.J. en cours d'usinage dans un hall annexe (mi-octobre 2005)

Tout autour, d'autres bâtiments, réservés aux principaux fournisseurs sous-traitants, sont en cours de finition. A l'horizon 2010, cet ensemble unique constituera un Centre de recherche disposant d'atouts majeurs, rassemblant harmonieusement des théoriciens et des expérimentateurs dans un large éventail de disciplines de pointe.

Consacré au thème de la fusion inertielle, qui intéresse à la fois la Défense nationale et de futurs fournisseurs d'énergie, ce pôle scientifique tourné résolument vers l'avenir offre déjà des perspectives attrayantes aux jeunes diplômés ; des métiers nouveaux apparaissent, toute une dynamique se développe sous nos yeux.

LES EXIGENCES DU CAHIER DES CHARGES

Quelle que soit la technique employée, la fusion nucléaire impose de vaincre la répulsion coulombienne entre les noyaux à associer, afin qu'ils puissent mettre en commun leurs nucléons (protons + neutrons) et donner naissance à un élément plus lourd.

La réaction de fusion la plus accessible unit un noyau de deutérium, D, contenant un proton et un neutron, et un noyau de tritium, T, formé d'un proton et de deux neutrons. Il apparaît un noyau d'hélium He 4 (2 protons et 2 neutrons), encore appelé « particule α », très stable, tandis que le neutron excédentaire est éjecté à grande vitesse : **la fusion dégage une grande quantité d'énergie.**

La difficulté majeure de l'opération réside dans la phase d'amorçage : les noyaux doivent être violemment projetés l'un vers l'autre sous l'effet de l'agitation thermique correspondant à une température θ de l'ordre de 100 millions de degrés. A ce stade, les atomes D et T sont évidemment dépouillés de leur électron ; le mélange des deux gaz ionisés forme un **plasma chaud** qui ne peut être conservé que durant un très court instant.

On estime à 30 % la proportion des noyaux susceptibles de fusionner, à condition que l'énergie dégagée soit supérieure à celle qu'exige la mise en température θ du plasma. Outre la valeur de cette température, il faut prendre en compte deux autres paramètres ; le nombre N de noyaux par unité de volume, qui exprime la « densité » du plasma, et le temps τ pendant lequel θ et N sont maintenus suffisamment par apport d'énergie extérieure. Le critère de Lawson fixe un **minimum** – en dessous duquel la fusion ne peut avoir lieu – au produit $N\tau$: 1020 s.m^{-3}.

En l'absence d'effets gravitationnels intenses comme dans les étoiles, deux procédures de confinement du plasma D.T. ont été envisagées pour satisfaire en Laboratoire à la condition de Lawson $N\tau > 10^{20}$ s.m^{-3} : l'une est **MAGNÉTIQUE**, l'autre **MÉCANIQUE**. L'article de M.. CHATELIER et Ph. MAGAUD, publié dans un numéro précédent d'AUVERGNE-SCIENCES, décrit la première, appliquée à Cadarache dans Tore Supra, et bientôt à plus grande échelle avec ITER. Elle repose sur une valeur de τ de l'ordre de la seconde, ce qui autorise des densités relativement modestes pour le plasma.

L'autre voie se place dans un contexte radicalement différent : le plasma est très fortement comprimé, jusqu'à contenir 10^{32} noyaux par m^3, (la masse volumique du plasma atteint alors 300 g.cm^{-3}, soit 300 tonnes par m^3, 300 fois celle de l'eau dans les conditions normales !), mais ce n'est possible que dans un laps de temps très bref (moins de dix nanosecondes), car la fusion entraîne une détente explosive du plasma.

La compression initiale de celui-ci repose sur un effet mécanique d'implosion résultant de la **conservation de la quantité de mouvement**, telle qu'on l'observe dans la propulsion des fusées, d'où son nom de **confinement inertiel**.

Sous l'effet d'un rayonnement incident très intense, la matière de la partie externe de la paroi d'une enceinte contenant les réactifs est brutalement éjectée vers l'extérieur (phase d'ablation) ; par réaction, une poussée vers l'intérieur s'exerce sur l'enceinte, comprimant très fortement son contenu. Il est clair que ce phénomène d'implosion est optimisé si l'enceinte est **sphérique et si son irradiation respecte cette symétrie** : c'est dans la partie centrale que se produiront les premières réactions de fusion (« breakeven ») ; l'énergie dégagée entraînera de proche en proche la fusion des noyaux des couches concentriques entourant ce point chaud (ignition).

La théorie montre l'intérêt de faire croître la densité de ces couches depuis le centre vers l'extérieur du milieu confiné. On y parvient par cryogénie : le mélange, solidifié à très basse température sur la paroi interne de l'enceinte, doit rester gazeux au centre de celle-ci.

L'irradiation du petit ballon, appelé **cible**, a nécessité des études de physique fondamentale très poussées portant principalement sur la nature du rayonnement incident et sur la façon de le concentrer le plus efficacement possible dans un très petit volume.

Sur le premier point, elles ont fait apparaître l'intérêt des courtes longueurs d'onde, si possible dans le domaine X.

Pour le second, deux pistes se présentent : une irradiation **directe** de la cible par des faisceaux multidirectionnels, ou l'attaque **indirecte** de celle-ci, placée à l'intérieur d'une sorte de « four », jouant le rôle de corps noir piégeant le rayonnement et le concentrant sur l'échantillon, tout en homogénéisant l'éclairement ***(Figure 4)***.

C'est la deuxième solution qui a été retenue, car elle offre l'avantage majeur de réaliser en même temps la conversion du rayonnement primaire, obtenu par effet laser, en rayonnement X, acteur optimal du confinement inertiel. La modélisation du phénomène a conduit à proposer comme « four » une cavité métallique cylindrique au centre de laquelle se trouve la cible ; le rayonnement incident (de préférence ultraviolet) y pénètre par deux ouvertures axiales et produit les radiations X voulues par impact des photons sur la paroi interne du cylindre (rayonnement de freinage connu sous le nom de **Bremsstrahlung**).

L'expérience comporte toutefois un certain nombre d'écueils.

Lorsque le rayonnement électromagnétique est fortement confiné dans un très petit volume, il peut se produire des couplages entre ondes incidentes et ondes induites dans le plasma. Il en résulte des phénomènes d'instabilité brisant la symétrie sphérique idéale de la distribution d'énergie à l'intérieur de l'enceinte. La régularité de la propagation de la réaction de fusion dans celles-ci est perturbée, ce qui met en cause les chances de succès de l'opération.

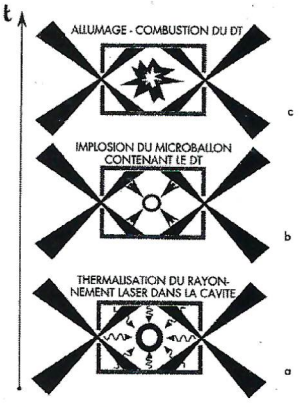


Fig 4 - Les 3 étapes de l'attaque indirecte (de bas en haut) :
a) le rayonnement UV incident génère des photons X dans la cavité du "four".
b) l'irridiation X provoque l'ablation et l'implosion du micro-ballon.
c) l'ignition du mélange D.T. conduit à la fusion des noyaux.

Il peut arriver aussi qu'une oscillation résonnante collective des électrons prenne naissance dans le plasma sous l'effet du rayonnement incident. Dans ce cas, ce dernier est réfléchi au lieu d'être absorbé et la fusion est impossible.

Une fois bien délimités les risques de disfonctionnement dus à ces phénomènes parasites, nous devons proposer des valeurs réalistes aux grandeurs physiques qui fixent les conditions expérimentales. Dans ces choix, nous devons garder en mémoire l'objectif de l'opération : **il ne s'agit pas de produire de l'énergie à grande échelle**, mais de faire des mesures, de vérifier des hypothèses et d'établir des diagnostics, en toute sécurité pour le personnel et le matériel.

La quantité de matière soumise à la fusion sera strictement limitée à 0,5 mg de mélange équimoléculaire D.T. La masse d'une mole de deutérium est 4 g, celle du tritium 6 g. Une mole de mélange représente donc 5 g, et 0,5 mg de celui-ci correspond à 0,1 millimole.

On sait que la fusion complète (théorique !) de cette quantité dégage 170 Mégajoules. Le rendement net de la réaction est de l'ordre de 30 %. Si les conditions d'ignition sont correctement remplies, on peut donc faire apparaître 50 Mégajoules environ au cours de l'expérience.

A partir de simulations numériques, on a pu estimer l'énergie totale nécessitée par la compression du mélange et par la formation du « point chaud » qui déclenche la fusion (environ 60 kJ). Comme on passe par l'ablation de la paroi externe du petit ballon contenant les réactifs, il faut tenir compte du rendement énergétique de cette opération. Il est faible, de l'ordre de 5 %. Il faut donc 20 x 60 = 1200 kJ (soit 1,2 MJ) dans l'irradiation de la cible. Enfin, la conversion du rayonnement ultraviolet en photon X à l'intérieur du cylindre où s'effectue l'attaque indirecte engendre des pertes énergétiques. Finalement, l'énergie utile à l'entrée de la chambre d'expérience a été fixée à **W = 1,8 Mégajoule**.

Remarquons au passage que cette quantité est très modeste. Si l'on convertit en joules (seule unité légale !) l'unité pratique d'énergie domestique, le kilowatt.heure (kWh), on trouve 3,6 Mégajoules. W représente donc un demi-kilowatt.heure ! On peut se demander pourquoi on construit une installation aussi complexe pour un résultat dérisoire, équivalent à une demi-heure de cuisson sur une plaque chauffante électrique de 1 kW....

L'exploit réside d'abord dans la **puissance** mise en jeu. Pour fixer les idées, supposons que l'irradiation dure 10 nanosecondes (10^{-8}s.). La puissance s'exprime par $P = 1,8 \times 10^{6} \times 10^{8} = 1,8 \times 10^{14}$ Watts, soit **180 Terawatts**. En associant des centrales nucléaires de 900 MW, il en faudrait 200 000 ! (Ne perdons pas de vue que P est une puissance instantanée, alors que les centrales travaillent en régime continu !)

Ce qui est plus exceptionnel encore est la **densité surfacique de puissance** σ déposée sur la cible. Supposons que celle-ci soit une sphère de 1 mm de rayon, sa surface a pour aire S = 12,56 mm², soit $1,256 \times 10^{-5}$ m². Si elle est « éclairée » de façon uniforme, σ s'écrit

$$\frac{P}{S} = \frac{1,8 \times 10^{14}}{1,256 \times 10^{-5}} = 1,4 \times 10^{19} \text{ W.m}^{-2}.$$

Le gigantisme de ce résultat apparaît clairement si on le compare au flux solaire intercepté par la Terre, 1,365 kW.m^{-2} : le rapport atteint 10^{16} !

Toujours grâce à des modélisations numérisées, on a pu établir la loi optimale de variation de pression dans le plasma ; un palier initial à 8 Mégabars, pendant 4 nanosecondes, précède l'impulsion principale, au cours de laquelle la pression atteint, ou même dépasse, 100 Mégabars. La vitesse d'implosion de la cible dans ces conditions est estimée à 400 km par seconde : elle ne s'exerce que sur un très faible parcours, mais, transposée à un moyen de transport terrestre, elle mettrait Clermont à une seconde de Paris !

Revenons maintenant sur le schéma de la chaîne LASER, qui fourmille de solutions originales. L'expérience acquise au cours d'essais entrepris dès la fin des années 60 a montré que, seul, le laser utilisant du verre dopé au néodyme (élément de numéro atomique Z = 60, de symbole chimique Nd, appartenant au groupe des « terres rares ») avait les qualités d'efficacité et de fiabilité requises pour satisfaire pleinement et durablement aux exigences résumées plus haut. L'avant-projet résultant de la coopération franco-américaine l'affirmait clairement. A ce jour, aucune découverte d'importance n'est venue modifier ce point de vue.

Malheureusement, la longueur d'onde émise par ce type de laser se situe dans l'infrarouge (1,053 µm). Les photons correspondants portent chacun trop peu d'énergie pour générer les rayons X concentrés sur la cible.

Pour contourner cette difficulté, on a retenu une solution révolutionnaire : **le triplement de la fréquence primaire** par le biais de l'optique non-linéaire (voir encadré A, ci-dessous), ce qui revient à diviser par 3 la longueur d'onde initiale. On arrive ainsi à $\lambda = 351$ nm, ce qui nous place dans l'**ultraviolet** proche. La conversion n'est pas sans perte ; on estime son rendement à 50 %. On doit fixer à 3,6 Mégajoules l'énergie nécessaire avant conversion. Il est totalement irréaliste d'espérer l'obtenir avec un seul faisceau : il a fallu concevoir une architecture complexe pour associer efficacement un grand nombre de lignes de lumière.

Compte-tenu des performances des sources disponibles, on a retenu 240 faisceaux agissant simultanément, soit 15 kJ par ligne. Cette valeur n'est pas accessible d'un coup : il faut **amplifier** l'impulsion initiale. Les amplificateurs utilisés sont des plaques de verre dopé au néodyme, éclairées par des lampes « flash ». C'est une application du « pompage optique », découvert et développé par le physicien Alfred Kastler, prix Nobel de physique en 1966. La source primaire n'est qu'un déclencheur d'impulsion commandant quasi-instantanément le retour des ions néodyme d'un état excité par l'énergie délivrée par les « flash » à leur état électronique fondamental.

Au lieu de faire passer une seule fois le faisceau à travers des plaques amplificatrices juxtaposées, les concepteurs de la chaîne optique ont choisi un trajet comportant 2 allers/retours, soit 4 traversées de chaque plaque. Cette technique de multi-passage est utilisée est utilisée pour la première fois dans un laser de grande puissance : c'est un moyen idéalement simple, mais d'application délicate, pour améliorer son rendement.

Le problème majeur – très difficile à surmonter – est le risque d'endommagement irrémédiable des surfaces optiques traversées par le faisceau. On a défini avec précision les densités surfaciques d'énergie à ne pas dépasser dans chaque composant de la chaîne. La seule solution pour augmenter l'énergie transmise sans transgresser cette limite est d'agrandir la section du faisceau porteur ; mais, en même temps, on accroît le risque de défauts – sur la surface ou dans le volume des matériaux – ce qui impose des conditions exceptionnelles de pureté et d'homogénéité de ceux-ci, jointes à une qualité rarement atteinte des trai-

tements de surface indispensables. C'est sans doute là que coopération franco-américaine a apporté ses meilleurs effets. Après avoir établi un cahier des charges unique, le D.O.E. et le C.E.A. ont lancé des appels d'offre communs auprès des fournisseurs potentiels ; ceux qui ont été retenus ont reçu commande au titre des deux organismes, afin de limiter les frais d'investissement à engager.

L'OPTIQUE NON-LINÉAIRE

Ce terme désigne l'ensemble des phénomènes qui accompagnent le passage d'une lumière de grande intensité à travers un milieu isolant appelé **diélectrique**, car formé de l'assemblage, globalement neutre, de charges positives (noyaux, cations) et de charges négatives (électrons, anions). Par exemple, lorsqu'un rayonnement infrarouge (de longueur d'onde voisine de 1 µm) traverse un cristal de quartz (SiO_2), on constate, à la sortie du faisceau, une composante transmise appartenant au domaine visible, de longueur d'onde **moitié** (environ 0,5 µm, couleur verte), donc de fréquence **double**.

L'interprétation de ces phénomènes repose sur l'application de la théorie électromagnétique de la lumière, établie par J.C. Maxwell en 1864. Dans le diélectrique, le champ électrique alternatif $\vec{E}$ de l'onde incidente provoque des variations périodiques locales de la polarisation $\vec{P}$ par déformation des nuages électroniques, déplacement des charges ioniques... Il apparaît des dipôles oscillants générant une onde électromagnétique qui se propage dans le matériau.

La polarisation $\vec{P}$ dépend du champ électrique $\vec{E}$. Cette relation peut être exprimé par un développement de la forme

$$\|P\| = \varepsilon_0 (\chi_1 E + \chi_2 E^2 + \chi_3 E^3 + \ldots)$$

où ε_0 est la permittivité du vide ($\varepsilon_0 = 8{,}85 \times 10^{-12}$ S.I.).

Les χ_n, coefficients sans dimension, sont appelés **susceptibilités diélectriques d'ordre n**. Ils diminuent fortement quand n augmente.

Si le champ $\vec{E}$ est faible, comparé aux champs électriques locaux créés par les charges des constituants de la matière, les termes en E^2, E^3, ..., du développement ci-dessous sont négligeables. A un champ électrique alternatif incident $E(t) = E_m \cos \omega t$ correspond une polarisation P de même pulsation ω. L'onde incidente et l'onde transmise sont de même fréquence, il n'y a donc pas de changement de longueur d'onde (" couleur "). C'est ce que l'on constate avec une source lumineuse ordinaire, comme une lampe à incandescence. L'optique correspondante est dite **linéaire**.

En revanche, si l'intensité est beaucoup plus élevée, comme avec un laser, les termes en E^2, E^3,, prennent des valeurs non négligeables, bien que décroissantes quand l'exposant n augmente. Il apparaît alors des phénomènes **non linéaires**.

En se limitant à l'ordre 2, avec $E(t) = E_m \cos \omega t$, on a $E^2 = E_m^2 \cos^2 \omega t = 1/2\ E_m^2 (1 + \cos 2\omega t)$. La polarisation $\vec{P}$ comporte, à côté du terme linéaire, de pulsation ω, un terme non linéaire de pulsation 2ω, ce qui justifie l'apparition de la fréquence double.

En photonique, où l'on suppose l'énergie rayonnante quantifiée selon la relation de Planck $W = h\upsilon$ (h : constante de Planck, υ fréquence du rayonnement), on l'interprète par un processus de **fusion de photons** : si la fréquence incidente est υ_i, on trouve dans le faisceau transmis **deux sortes de photons** : ceux d'énergie $W_1 = h\upsilon_i$ et, en quantité moindre, ceux d'énergie $W_2 = 2\ h\upsilon_i$, qui correspondent à un rayonnement de fréquence **double**.

LA RÉALISATION DE LA LIGNE D'INTEGRATION LASER (L.I.L.)

Avec 8 faisceaux groupés en 2 quadruplés, la L.I.L. est la concrétisation, à l'échelle 1, de l'une des 30 chaînes LASER du futur L.M.J.. Elle occupe un bâtiment de 150 m de long, dont la majeure partie est une salle propre, où température et humidité sont contrôlées, et où les opérateurs habilités portent des tenues spéciales.

Elle a été mise en service pour la 1ère fois, avec un seul faisceau, en mars 2002 ; en novembre, la partie infrarouge satisfaisait aux exigences du cahier des charges ; en avril 2003, le niveau d'énergie requis dans l'ultraviolet était dépassé, avec 9,5 kJ. Fin 2003, on a pu assembler 4 faisceaux, et courant 2004, les premiers tirs sur cibles tests ont été effectués. Très prochainement, on disposera de 2 tels quadruplets fonctionnant en parallèle.

Le schéma de principe de la L.I.L. est présenté sur la ***Figure 5*** *(page suivante)*. Il comporte 3 parties distinctes : le pilote, la zone d'amplification, l'espace de conversion de fréquence et de focalisation du faisceau utile. Examinons sommairement chacune d'elles.

A) Le pilote

C'est une source laser autonome chargée de fournir l'impulsion initiale et de mettre en forme le faisceau infrarouge élémentaire qu'elle émet. C'est à ce niveau que l'on fixe tous les paramètres physiques qui vont concrétiser le faisceau final, en particulier son **profil temporel** (distribution de l'énergie en fonction du temps) et la **répartition spatiale** de la puissance sur la section du faisceau. Le pilote participe notamment au lissage optique qui assure l'homogénéité du dépôt d'énergie sur la paroi externe de la cible. Il conditionne également l'état de polarisation de l'onde lumineuse.

Sa réalisation a été confiée à Thales LASER.

La source proprement dite est un oscillateur intégré dans une fibre optique dont le coeur mesure seulement 7 µm de diamètre ; le pompage optique est assuré par des diodes luminescentes. En sortie, la puissance est 10 milliwatts, l'énergie d'une impulsion n'est que de 1 nanojoule. Il faut l'amplifier tout en augmentant la section utile du faisceau : c'est le rôle de l'étage préamplificateur formé d'un barreau de verre au phosphate, dopé à 2 % d'ions néodyme Nd^{3+} ; l'énergie de sortie atteint 20 millijoules, répartis sur un carré de 10 mm de côté.

B) La zone d'amplification

La configuration retenue comprend 2 amplificateurs en tandem, agissant sur 4 passages successifs. Ils contiennent chacun 9 plaques laser constituées du même verre que ci-dessus, élaboré par coulée continue chez deux fournisseurs renommés, Hoya et Schott (épaisseur finale : 40 mm). L'énergie pompée provient de lampes « flash » au xénon, dont le spectre d'émission est largement étalé entre 0,45 et 1,20 µm. Les électrodes doivent supporter au moins dix mille décharges produites par des batteries de condensateurs stockant 450 MJ électriques, soit 125 kWh.

Le faisceau sortant du pilote est d'abord étendu à une section voisine de 40 x 40 cm², puis il fait 2 allers et retours en traversant les plaques laser à l'incidence de Brewster (56,5°), afin de minimiser les pertes par réflexion, selon les résultats établis par Fresnel. Le contrôle de l'état de polarisation de l'onde en cours de trajet est capital : il est géré par

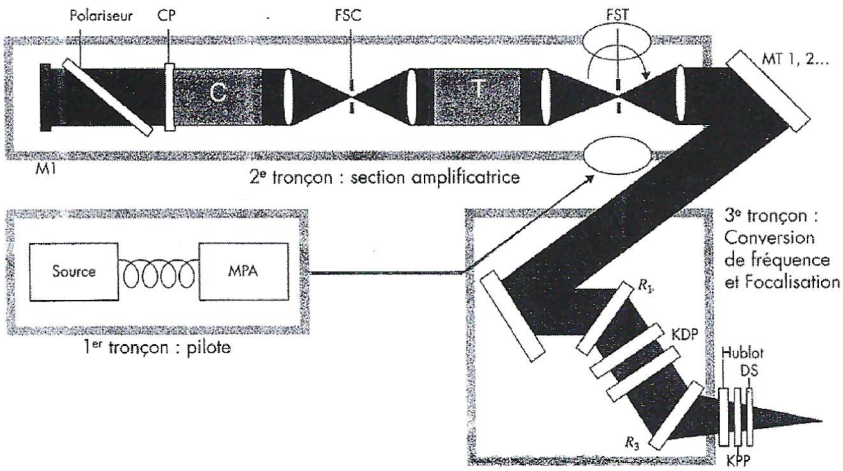


Fig. 5
Schéma fonctionnel de la L.I.L. montrant les 3 parties principales : "le pilote", la zone d'amplification et le convertisseur de fréquence. Dans le premier tronçon, MPA est le module pré-amplificateur ; dans le second, on trouve, de gauche à droite : M1 miroir déformable en fond de cavité ; CP cellule de Pockels, FSC filtre spatial de cavité ; FST filtre spatial de transfert ; MT 1,2... miroirs de transfert. Le 3e secteur comporte 2 réseaux : R_1 qui sélectionne la fréquence primaire, et R_3 qui isole la fréquence triple. Entre eux, les lames KDP sont les cristaux convertisseurs de fréquence. Le faisceau convergent de sortie traverse une lame de phase, KDP, et une lame anti-éclats DS face à la cible.

une cellule électro-optique de Pockels (C.P.) placée à proximité du miroir de fond de cavité M1. Ce miroir ne se contente pas de réfléchir le faisceau : légèrement déformable, il rétablit à chaque passage la qualité de la surface du front de l'onde qu'il reçoit ; c'est un exemple-type d'une technique instrumentale très novatrice, l'**optique adaptive**, travaillant en temps réel. Son rôle est essentiel dans la réalisation du lissage optique déjà évoqué, que l'élargissement du faisceau ne favorise évidemment pas ! Mais on ne peut pas faire autrement, car, à la fin du parcours dans les plaques amplificatrices, on atteint la valeur limite de densité surfacique d'énergie tolérée par les composants optiques.

Entre les 2 « étages » amplificateurs (notés C- pour « cavité » - et T – pour « transfert » -) se trouve un filtre spatial de cavité, FSC ; à la sortie de T, il y a de même un filtre spatial de transfert, FST. Ce sont des systèmes optiques afocaux ; ils se composent de 2 lentilles identiques ayant un foyer commun. Un diaphragme, placé dans le plan de ce foyer, normalement à l'axe optique, supprime les bordures parasites du faisceau et forme, sur le parcours de celui-ci, des images définissant sa section utile.

C) La conversion de fréquence et la focalisation

On dispose, à l'entrée de ce secteur, d'un faisceau infrarouge transportant environ 15 kJ par impulsions durant quelques nanosecondes. La conversion de fréquence est due à des effets d'optique non-linéaire, déjà décrits, dans des lames taillées dans des monocristaux sélectionnés. Le matériau adopté est le di-hydrogéno-phosphate de potassium, PO^4H^2K (en abrégé KDP), très stable dans le temps. La grande section du faisceau exige de réaliser la croissance, par voie humide, d'énormes cristaux artificiels, pesant environ 300 kg, sans défauts ! Ils sont produits en France par Saint-Gobain, division cristaux et détecteurs.

Le rendement de conversion de fréquence d'un cristal actif en optique non-linéaire dépend de la longueur d'onde λ_0 du rayonnement incident et de l'angle d'incidence du faisceau par rapport au cristal. Comme le lissage optique entraîne un élargissement spectral du faisceau, on a intérêt à placer les lames KDP entre 2 réseaux de diffraction qui sélectionnent la longueur d'onde voulue : l'un, R_1, dans l'infrarouge (λ_0), côté source ; l'autre, R_3, dans l'ultraviolet (λ_0 /3), côté utilisation. Deux lames de conversion parviennent à transformer environ 60 % du rayonnement infrarouge incident en lumière ultraviolette de fréquence triple.

La focalisation finale est obtenue, de façon très originale, par R3, doté de motifs diffractants courbés réalisés par holographie. Cette prouesse technologique est à mettre à l'actif d'une entreprise française réputée, la société Jobin-Yvon.

Avec un faisceau, après focalisation, on dispose de 7,5 kJ en 5,6 nanosecondes. Avec 240 faisceaux, on peut donc espérer 1,8 MJ, pour une puissance de l'ordre de 300 Terawatts.

La tache focale produite par un faisceau est circulaire, de diamètre 0,7 mm. Avec le quadruplet de la L.I.L., on obtient une ellipse d'aire de 2,26 mm^2, soit 2,26 x 10^{-6} m^2. Pour une impulsion durant 6 nanosecondes, transportant 4 x 7,5 = 30 kJ, la puissance délivrée est de 5 x 10^{12} watts. La densité de puissance, supposée uniformément répartie sur l'aire de la tache focale produite par le quadruplet, est 2,21 x 10^{18} $W.m^{-2}$: elle satisfait aux exigences du cahier des charges.

LA CIBLE ET LA CHAMBRE D'EXPÉRIENCE

A) La cible et son environnement

Jusqu'à maintenant, nous étions habitués à utiliser des superlatifs pour décrire les caractéristiques de la L.I.L. et – a fortiori – du L.M.J.. Avec la cible, nous entrons au contraire dans le domaine des micro-technologies les plus fines.

Il s'agit en effet d'une minuscule « coquille » sphérique creuse, en matière plastique amorphe, de diamètre intérieur 2,00 mm et d'épaisseur uniforme 0,20 mm. Le volume de la cavité centrale est 4,19 mm^3. Empli de mélange D.T. gazeux dans les conditions normales, elle contient 0,935 µg de réactifs de fusion.

Ce micro-conteneur est placé au centre d'un très petit cylindre (le « four ») dans lequel seront produits les rayons X responsables de l'ablation des couches externes de la cible. On sait que ce sont les métaux lourds qui ont les meilleurs rendements de conversion entre le rayonnement UV incident et les photons X émis : c'est l'or (Au, Z = 79) qui a été retenu.

Le cylindre mesure un peu plus de 10 mm de long et 6,2 mm de diamètre. L'épaisseur du métal n'est que de 50 µm. Les faces latérales sont percées de trous axiaux de 3 mm de diamètre ; c'est par ces ouvertures que doit passer la totalité du faisceau énergétique UV issue des chaînes LASER : on conçoit bien les exigences draconiennes d'alignement et de stabilité de tout le système !

Pour parfaire la répartition de l'énergie à l'intérieur du « four », on a prévu de partager le faisceau incident en 3 nappes distinctes. ***(Figure 6)***.

Il faut en effet que l'éclairement de la cible ne varie pas de plus de 1 % sur toute sa surface pour que la compression

du mélange D.T. puisse aboutir à la fusion. Un mélange d'hydrogène et d'hélium entoure la cible au moment du « tir ». Des feuilles de polyimide de 1µm d'épaisseur ferment les ouvertures latérales du cylindre pour isoler son contenu.

C'est au Centre du C.E.A. installé à Valduc, près de Dijon, que sont réalisées les cibles ; leur élaboration et leur contrôle très minutieux exigent des instruments de grande précision. Valduc a l'avantage de posséder depuis longtemps un atelier de production de tritium qui, contrairement au deutérium, n'existe pas dans la Nature : c'est un gaz radioactif de demi-vie voisine de 12 ans. On l'obtient par bombardement neutronique sur du lithium.

La coquille sphérique représentant la cible est constituée d'un hydrocarbure solide (formule chimique : CH_X) dopé au germanium. En pratique, on dépose cette substance de synthèse, grâce à un plasma froid, sur un mandrin sphérique qui sert de support. Ce dernier est un polymère spécial, appelé PAMS, qu'il est possible de dépolymériser par un traitement thermique approprié : on peut alors extraire les composants par perméation à travers la coquille sans avoir à percer celle-ci. Tout l'art de l'opération consiste à réaliser des surfaces parfaitement lisses – tant à l'intérieur qu'à l'extérieur – sous peine de voir apparaître des phénomènes d'instabilités dommageables pour la réaction de fusion. Il a fallu mettre au point toute une gamme d'instruments d'observation microscopique, jusqu'à l'échelle nanométrique (effet tunnel, force atomique) pour contrôler chaque petite sphère.

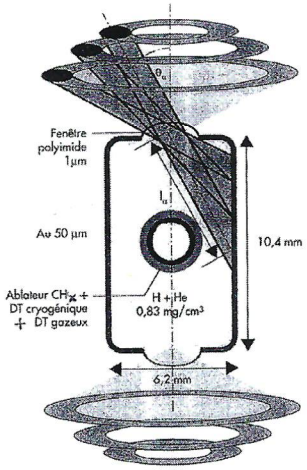


Fig.6 - Partage des 2 faisceaux incidents, symétriques, en 3 nappes pénétrant dans le "four" par les ouvertures latérales.

C'est à ce moment qu'intervient l'étape la plus délicate : le remplissage des micro-ballons. On utilise encore la perméation en phase gazeuse, commencée à pression ambiante, puis, progressivement, jusqu'à 500 bars, ce qui multiplie d'autant la quantité de mélange D.T. introduite, d'à peu près 1 µg, on arrive à 0,5 mg, valeur qui correspond bien aux besoins des études projetées.

On abaisse alors lentement la température jusqu'à 18° K (-255°C), un peu en dessous du point de solidification du mélange D.T. Ce dernier, congelé, se dépose sur la paroi interne du micro-ballon. Mais l'épaisseur de la couche formée n'est pas uniforme. Il faut procéder à une **redistribution**, opération très minutieuse où l'on doit alterner sublimation et recondensation, en profitant de la très petite quantité de chaleur produite par la décomposition radioactive du tritium. Il faut atteindre un équilibre thermodynamique dans l'enceinte, avec une couche solide d'épaisseur constante, voisine de 180 µm. Au centre du micro ballon, il y a un gaz, à la pression de vapeur saturante du mélange D.T. (environ 0,2 bar, soit 2 x 10^4 Pa).

Evidemment, à partir de l'opération de congélation, il faut maintenir la cible à 18° K : une élévation de température conduirait à l'explosion de la coquille, par augmentation de la pression interne. On a dû concevoir un porte-cible cryogénique qui devra rester fonctionnel jusqu'au "tir" final.

L'étape suivante est la mise en place, autour de la cible dans son environnement d'essai, du cylindre de conversion X. Comme il est impossible de centrer correctement le micro-ballon en l'introduisant par les ouvertures latérales, on a prévu un assemblage par demi-cylindres munis d'une fine pellicule de polymère souple qui porte la cible. Cette méthode permet de placer celle-ci exactement au centre du cylindre (les tolérances de position s'expriment en micromètres !). La ***(figure 7)*** montre une modélisation transparente du résultat à atteindre.

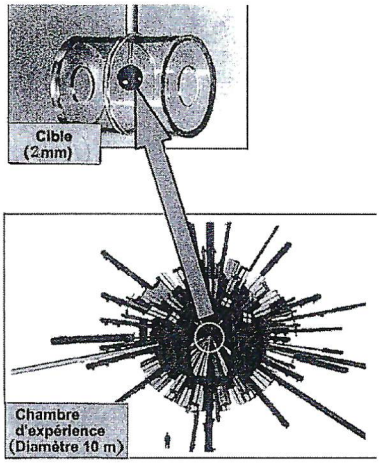


Fig. 7 - Modèle transparent de l'ensemble "four" - cible, et disposition de l'instrumentation tout autour de la sphère d'expérience du L.M.J.

B) La chambre d'expérience

Organe de liaison physique entre la chaîne optique et la cible, la chambre d'expérience a plusieurs fonctions majeures :

a) porter les structures de transmission et de focalisation des faisceaux vecteurs de l'énergie ;

b) assurer la position correcte du "four" contenant la cible ;

c) mettre en place les équipements de mesure et les systèmes de prise de diagnostic chargés de faire le bilan de l'expérience. Pour les besoins des essais, on doit pouvoir faire un vide poussé (jusqu'à 10^{-4} Pa), ou maintenir une athmosphère de composition connue (hydrogène, hélium...) : la chambre doit être parfaitement étanche.

C'est une sphère en alliage léger de forte épaisseur (environ 10 cm), de 3 m de diamètre pour L.I.L. ***(Figure 8)***, 10 m pour L.M.J. ***(Figure 8 bis)***.

Une couche externe de 40 cm de béton neutrophage protège les locaux voisins de l'irradiation par les neutrons rapides émis au cours de la fusion (les α sont arrêtés par le métal !).

On imagine facilement la complexité des trajets des 240 faisceaux du L.M.J. : même groupés par quadruplets, il reste 60 canaux distincts à répartir pour former finalement 2 fois 3 nappes convergeant sur une bille quasi-ponctuelle : un formidable challenge !



Fig. 8 - La structure métallique de la sphère d'expérience utilisée sur la Ligne d'Intégration Laser (L.I.L).



Fig. 8 bis - Finition mécanique de la sphère d'expérience du Laser Mégajoule.

EN PERSPECTIVE, LA ROUTE DES LASERS

Dès 1995, les élus de la Région Aquitaine et les responsables institutionnels préparent un projet d'accompagnement du L.M.J. : il faut profiter de son installation au C.E.S.T.A.

pour développer un pôle d'excellence dans les domaines concernés : l'optique, les sources de rayonnement, les détecteurs, la physique des plasmas...

Un gros effort de fédération des activités de recherche fondamentale et de développement industriel est alors entrepris.

Au sein du C.E.A., on affirme clairement la volonté d'ouvrir les moyens du C.E.S.T.A. à la recherche civile. D'autre part, tous les Etablissements de recherche publique ou privée offrent leurs services pour coopérer étroitement avec le Centre. De leur côté, les industriels, alléchés par l'importance et le caractère novateur du projet, s'engagent sans réserve dans une collaboration fructueuse, avec l'appui de la Chambre de Commerce et d'Industrie (C.C.I.) de Bordeaux.

Des organismes financiers comme la Caisse des Dépôts et Consignations, la Caisse d'Epargne ou le Crédit Agricole, spécialistes de l'investissement, apportent leur concours en facilitant l'implantation de nouveaux partenaires.

En février 2004, une Société d'économie mixte est créée à l'initiative du Conseil général de la Gironde. En mai, un pacte d'actionnaires est signé.

Il permet l'acquisition des terrains destinés à accueillir les industriels intéressés dans des zones d'activités aménagées, équipées d'infrastructures adaptées.

C'est ainsi que naît le site « LASER 1 » destiné aux entreprises intervenant dans la construction de L.M.J. (Cegelec, Sagem, Thales, EADS-Cilas ou Sodern,...). Des extensions sont déjà programmées. On a prévu également l'implantation d'un pôle de recrutement et de formation professionnelle spécifique pour L.M.J., appelé DEFI.

Des sociétés qui ne sont pas directement concernées par L.M.J. n'ont pas tardé à s'installer au voisinage de ce vivier technologique : c'est par exemple le cas de GERAC, qui construit du matériel de pointe dans l'imagerie médicale.

La recherche pure n'a pas été oubliée dans cet élan fédérateur : à l'entrée du site, l'Institut « Lasers et Plasmas » occupera bientôt un vaste ensemble de laboratoires, de bureaux et d'amphithéâtres, actuellement en construction.

Il existe déjà une forte concentration de connaissances, de savoir-faire et de compétences techniques dans le domaine de l'optique, des lasers et des plasmas. Autour du C.E.S.T.A., la Région Aquitaine a fait le pari de créer une structure capable d'attirer un maximum d'acteurs sur le thème du **Photon**. Baptisé « Route des Lasers », le projet est soutenu par les pouvoirs publics dans le cadre de l'aménagement du territoire. Il associe les partenaires industriels, les organismes d'enseignement, de recherche et de formation professionnelle : les besoins vont être importants.

L'Université Bordeaux I, déjà bien pourvue en enseignements théoriques sur la physique quantique, l'optique, les lasers... développe de nouvelles filières dans le cadre de la réforme L.M.D. (licences professionnelles, mastères spécialisés...) ; elle participe activement aux opérations de formation proposées par l'A.F.P.A. et la C.C.I..

Une plate-forme de préparation aux activités en environnement contrôlé, PYLA, fonctionne à plein régime, en symbiose avec la plate-forme de transfert des technologies Laser, PALA.

Industrie, Recherche et Enseignement coopèrent harmonieusement dans cet environnement très dynamique.

Une unité mixte de recherche, le C.E.L.I.A., associant le C.E.A., le C.N.R.S. et l'Université Bordeaux I a été créée en Région Aquitaine pour approfondir la physique des plasmas et des lasers de puissance.

L'objectif affiché est bien de développer un pôle d'excellence, au niveau mondial, dans un domaine clé du XXI[e] siècle, en couvrant les secteurs de l'énergie, des télécommunications, de l'espace, des matériaux, de l'imagerie, de la biophysique, de la médecine, sans oublier le point de départ, la défense.

A l'issue de la visite des fleurons du C.E.S.T.A., L.I.L. et L.M.J. admirablement organisée par des responsables du C.E.A., les participants auvergnats étaient littéralement éblouis par l'importance du projet et le gigantisme du site. Ils ont pu examiner en détail, sous la conduite d'un guide très compétent, les composants optiques tous à fait exceptionnels intégrés dans la L.I.L. ; depuis un poste d'observation vitré, ils ont ensuite bénéficié d'une vue d'ensemble de la ligne prototype. Puis un tour complet du chantier de construction de L.M.J. a été accompagné de commentaires explicatifs très précis ***(Figure 9)***.

Il me semble que la surprise a été à son comble lorsque nous avons pu admirer, dans son hall d'assemblage, l'énorme sphère d'expérience du LASER MEGAJOULE : un spectacle inoubliable ! (Figure 3).

Le succès de ce voyage d'étude a été total : il est largement dû à l'efficacité de son organisatrice, Marie-Hélène SALAT, que nous félicitons et remercions tous très chaleureusement.

CONCLUSION

Par la qualité de son rayonnement et la puissance du faisceau émis, le **LASER** est devenu un instrument indispensable dans tous les domaines de la recherche et de la technologie, de la physique fondamentale à la biologie appliquée.

La réalisation du **LASER MÉGAJOULE** est exemplaire de l'ambition des objectifs affichés et de l'ingéniosité des solutions apportées. Elle assure à l'**AQUITAINE** une position enviable dans un domaine de pointe, largement ouvert sur l'avenir.

REMERCIEMENTS

Les schémas et les photographies illustrant cet article proviennent de la Direction des Applications Militaires (D.A.M.) du C.E.A. dont dépend le C.E.S.T.A.

Les détails techniques résumés dans cet article (en particulier les valeurs numériques) sont extraits de publications du C.E.A. (Clefs. C.E.A., les Défis du C.E.A., Chocs, ...) destinées à l'information du grand public, ou de précisions notées au cours de la visite au C.E.S.T.A..

Que les nombreux auteurs concernés trouvent ici l'expression de toute ma gratitude !

Le C.E.A. a adopté depuis longtemps une politique de diffusion de la culture scientifique tout-à-fait exemplaire, que nous sommes heureux de souligner à cette occasion.

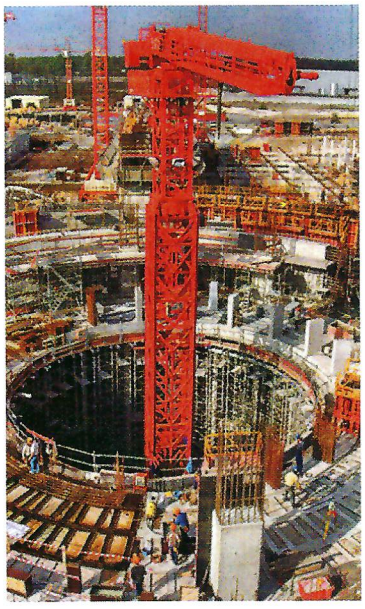
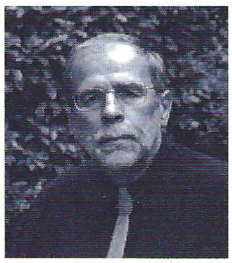


Fig. 9 - Le chantier de construction du cœur de L.M.J. à la mi-octobre 2005.



Divers aspects de l'eau

Par Jean CHANDEZON
Docteur ès Sciences, Professeur Emérite de l'Université Blaise-Pascal
Vice-Président de l'ADASTA.

IL Y A DE L'EAU DANS L'AIR

Avec Aristote les anciens Grecs expliquaient le monde à partir de quatre éléments naturels opposés deux à deux : l'air et la terre d'une part l'eau et le feu d'autre part. Pour eux l'air était un élément simple indispensable à la vie invisible et ténu. En fait à cette époque tous les gaz étaient considérés comme de l'air. Par la suite on s'est rendu compte que l'air n'était pas aussi simple que cela et qu'il y avait deux sortes d'air : l'air vital et l'air non vital. Si l'on place du feu, une bougie par exemple, dans un récipient fermé la bougie consomme l'air vital et par la suite une souris placée dans ce récipient meurt par manque d'air vital. A la fin du XVIIIème siècle Lavoisier a montré que l'air est composé de deux gaz différents l'oxygène qui est l'air vital, et l'azote.

L'air contient également de l'eau, pour s'en convaincre il suffit d'observer la pluie, phénomène où de l'eau tombe du ciel, ce qui montre bien que l'atmosphère contient de l'eau invisible sous une forme gazeuse que l'on appelle vapeur d'eau. La vapeur provient de l'évaporation de l'eau liquide qu'il y a en abondance à la surface de la terre. L'évaporation est un phénomène banal qui intervient, par exemple, lorsque l'on fait sécher du linge humide et que l'humidité disparaît progressivement par évaporation de l'eau dans l'atmosphère. Par évaporation l'eau passe de l'état liquide à l'état gazeux. Tous les liquides sont susceptibles de s'évaporer plus ou moins bien, l'eau est un liquide assez volatil, l'éther est un liquide très volatil et le mercure un liquide très peu volatil.

A une température et une pression données l'air ne peut contenir qu'une quantité donnée de vapeur d'eau, si l'on dépasse cette valeur limite l'eau excédentaire forme un brouillard constitué de fines gouttelettes, c'est ce phénomène qui produit le brouillard la buée et les nuages.

La vapeur d'eau participe à la pression de l'air, la fraction de pression assurée par la vapeur d'eau est appelée tension de vapeur.

La quantité maximum d'eau que peut contenir l'air augmente très rapidement avec la température. On appelle tension de vapeur saturante la quantité maximum de vapeur d'eau que peut contenir l'air, cette quantité dépend très fortement de la température.

IL Y A DE L'AIR DANS L'EAU

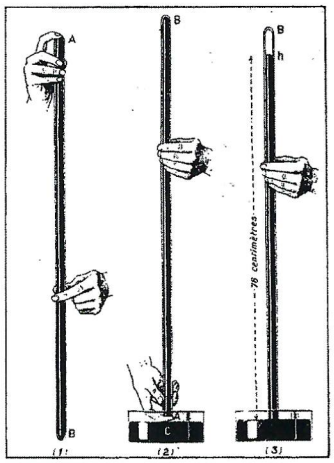
De la même façon qu'il y a de l'eau dans l'air on trouve de l'air dans l'eau, l'air est en partie soluble dans l'eau. C'est l'oxygène de l'air dissous dans l'eau qu'utilisent les poissons pour respirer par l'intermédiaire des branchies.

La quantité maximum d'air qui est soluble dans l'eau diminue lorsque la température augmente c'est pour cela que lorsqu'on chauffe un récipient d'eau on voit, un peu avant l'ébullition, apparaître de petites bulles d'air sur les parois du récipient. Les mers les plus riches en oxygène, donc les plus poissonneuses, sont les mers froides comme les océans arctique et antarctique.

La quantité d'air qui est soluble dans l'eau augmente fortement avec la pression, c'est pour cette raison que, si il y a une prise d'air sur les canalisation d'eau potable, l'eau du robinet prend parfois une apparence laiteuse due à de petite bulles d'air qui sont la conséquence du dégazage de l'eau due à la baisse de pression à la sortie du robinet.

Comment mesurer la pression de vapeur saturante ?

Au niveau de la mer la pression atmosphérique moyenne due au poids de l'air correspond à la hauteur d'une colonne de mercure de 76 cm ou à une colonne d'eau de 10 m. Actuellement on mesure cette pression en Pascals Pa ou plutôt en hecto-Pascal hPa (1hPa=100 Pa). La pression au niveau de la mer est de 1013 hPa. Comme l'a montré Pascal, cette pression varie avec l'altitude. A basse altitude la variation de pression est à peu près de 1 hPa tout les 8,5 m. C'est cette valeur que l'on utilise pour régler les baromètres et les altimètres. Le Pascal est une unité très petite puisque à une variation de pression de 1 Pa correspond un changement d'altitude de 8,5 cm ! Les baromètres sont en général réglés de telle manière qu'ils indiquent la pression ramenée au niveau de la mer c'est à dire la pression qui régnerait au même point à

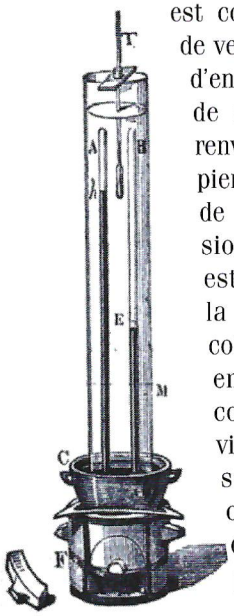


EXPÉRIENCE DE TORRICELLI.

1° Le tube AB est rempli de mercure et bouché avec le doigt ; — 2° Le tube AB est retourné au-dessus d'une cuve contenant du mercure ; — 3° L'extrémité du tube étant sous le mercure de la cuve et le doigt étant levé, le mercure reste soulevé sur une hauteur de 76 centimètres.

l'altitude 0. A Clermont situé à 400 m d'altitude cette correction est d'environ 47 hPa, la pression moyenne à Clermont est donc de 966 hPa soit 72,5 cm de mercure.

Pour mesurer la pression atmosphérique on peut utiliser un baromètre à mercure de Torricelli qui est constitué d'un tube de verre d'une longueur d'environ 90 cm rempli de mercure que l'on renverse dans un récipient lui même rempli de mercure. La pression atmosphérique est mesurée par la hauteur de la colonne de mercure, en haut de la colonne il y a du vide. 1 atmosphère soit 1013h Pa correspond à 76 cm de mercure, c'est la pression normale au niveau de la mer. Les baromètres comportent en général une graduation en cm de mercure. Sous nos latitudes la pression atmosphérique, qui dépend du temps qu'il fait, est en général comprise entre 74,5 cm de mercure par grand vent et 77,5 cm de mercure par très beau temps. Au cours de la tempête de décembre 1999 la pression atmosphérique était descendue à Clermont en dessous de 73 cm de mercure.



Le baromètre de Torricelli peut très facilement servir à mesurer la pression de vapeur saturante. Pour cela on place une petite quantité d'eau dans le haut d'un tube B rempli de mercure, une partie de cette eau s'évapore en créant une pression supplémentaire égale à la pression de vapeur saturante. La hauteur de mercure est donc plus faible dans le tube B qui contient de l'eau. La différence de hauteur entre le tube B et un tube A qui ne contient pas d'eau, est égale à la pression exercée par la vapeur saturante de l'eau. En faisant varier la température par chauffage on peut mesurer la pression de vapeur saturante en fonction de la température. C'est avec un tel dispositif que l'on a pu mesurer dès le XVIII^{ème} siècle la pression de vapeur saturante de l'eau et d'autres liquides.

MESURER L'HUMIDITE DE L'AIR AVEC UN CHEVEU.

Plutôt que de mesurer la quantité absolue d'eau contenue dans l'air on préfère en général mesurer l'état hygrométrique ou humidité relative de l'air c'est à dire la quantité d'eau présente dans l'air rapportée à la quantité maximum possible ou vapeur saturante. L'humidité relative est une grandeur sans dimension qui s'exprime en pourcentage.

Pour mesurer l'hygrométrie l'instrument le plus simple est l'hygromètre à cheveu qui utilise la propriété qu'ont les cheveux de s'allonger très sensiblement lorsque l'humidité augmente. Pour cela on utilise un cheveu suffisamment long parfaitement dégraissé par un passage dans une solution détergente dont on mesure la variation de longueur en fonction de l'humidité (Fig 143). Pour étalonner l'appareil on le place sous une cloche hermétique avec successivement un dessicant pour obtenir le zéro avec une atmosphère totalement sèche à 0% d'humidité puis avec un récipient plein d'eau pour obtenir l'humidité maximum de 100%. On divise ensuite l'intervalle en 100 graduations. On trouve encore parfois à acheter dans le commerce de tels hygromètres à cheveu.

Dans nos régions tempérées l'humidité relative est le plus souvent comprise entre 35% et 75%, elle n'atteint jamais 100%. On peut trouver sur les sites météo Internet comme Yahoo l'humidité relative dans les principales villes du monde. Le lundi 10 avril 2005 était un jour de pluie continue sur Clermont à 18h ; il faisait 4°C avec une humidité de 87%. Par contre, à la même heure, dans le désert du Sahara, à Tombouctou il faisait 40° et l'humidité n'était que de 3%.

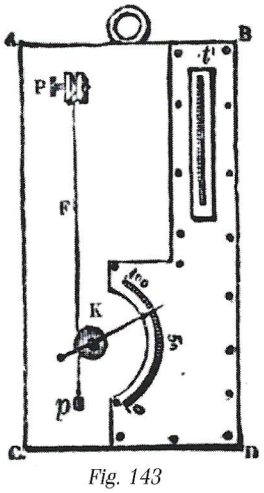


Fig. 143

LA ROSEE ET LA GELEE BLANCHE.

Lorsque la température de l'air diminue son humidité relative augmente jusqu'au moment où l'on atteint la vapeur saturante, il y a alors condensation de l'eau. Cette température est appelée point de rosée, on peut la calculer à partir de la connaissance de la température de l'air et de son état hygrométrique. Pour les principales villes du monde on trouve le point de rosée du jour sur les serveurs météo comme Yahoo.

Si pour une raison ou une autre la température s'abaisse localement en dessous du point de rosée il y a apparition de rosée.

La nuit en l'absence de soleil la température de l'atmosphère diminue. Ce phénomène est particulièrement net par temps clair lorsque la chaleur emmagasinée par le sol s'échappe par rayonnement sans être piégée par les nuages. Si, durant la nuit, la température s'abaisse en dessous du point de rosée la vapeur d'eau en excès dans l'atmosphère se dépose sur les objets les plus froids comme l'herbe et forme de petites gouttelettes, c'est ce que l'on appelle la rosée.

Exemple :

Le vendredi 9 juin 2006 à 17h avec un temps très ensoleillé il faisait 29°C à Clermont avec 27% d'humidité, le point de rosée étant de 8°C et la température minimale prévue pour la nuit étant de 12°C il y aura peu de rosée.

Par contre le même jour à Briançon avec 22°C de température et 43% d'humidité le point de rosée étant de 9°C la température minimale prévue pour la nuit étant de 6°C il y aura beaucoup de rosée.

Lorsque les objets sur lesquels se forme la rosée sont à une température inférieure à 0°C ce qui est parfois le cas par temps clair au début printemps, la rosée en se condensant gèle et forme ce que l'on appelle de la gelée blanche.

Jusqu'au début du XX^{ème} siècle pour la



"gouttes de rosée sur une toile d'araignée"

rosée du soir on utilisait le terme de serein, appellation qui a disparu de nos jours.
La buée qui apparaît sur les objet froids : les vitres, les bouteilles... correspond au même phénomène que la rosée.
La buée qui apparaît lorsque l'on respire par temps froid correspond à la condensation de la vapeur d'eau présente dans l'haleine saturée en humidité lorsqu'elle se refroidit dans l'air ambiant en dessous du point de rosée.

POURQUOI, EN HIVER L'AIR EST-IL TRES SEC DANS LES MAISONS ?

En hiver la température à l'intérieur d'une maison est plus élevée qu'à l'extérieur. Si l'on fait entrer de l'air extérieur dans la maison il s'échauffe et, par suite, son humidité relative diminue. Prenons comme exemple une température extérieure de 0°C avec une humidité relative de 50% cet air porté à 20°C voit son humidité relative baisser :
à 0°C la quantité de vapeur d'eau saturante n'est que de 4.8g/m^3 alors qu'à 20°C elle est de 17.3 g/m^3. De l'air à 0°C et 50% d'humidité relative contient 2.4g/m^3 d'eau, pour cet air porté à 20°C cela correspond à une humidité relative de :

$$2.4/17.3 = 0.139 = 14\%$$

Cet air est alors très sec. C'est pour cette raison qu'il est conseillé de placer en hiver dans les maisons des évaporateurs ou des plantes vertes afin de maintenir une humidité relative confortable.
C'est en raison du phénomène opposé que les caves sont très humides en été. Si l'on fait rentrer dans une cave de l'air extérieur à 35°C et 50% d'humidité cet air porté à 15°C est complètement saturé en humidité, il y a condensation de l'eau atmosphérique sur les parois froides.

POURQUOI, PLEUT-IL PLUS EN MONTAGNE QU'EN PLAINE?

On peut constater qu'il pleut plus en montagne qu'en plaine et que ce phénomène est très net. On peut donner comme exemple des mesures de pluviométrie faites par l'observatoire de physique du globe de Clermont au début du XX^{ème} siècle : sur une année on a mesuré 650 mm à la station de Clermont-Rabanesse, 993 mm à Ceyssat et 1713 mm au sommet du Puy de dôme.

1- La pression atmosphérique diminue avec l'altitude

Quand l'altitude augmente la quantité d'air qu'il y a au dessus de ce point responsable de la pression atmosphérique, diminue. Cette diminution n'est pas constante cependant, pour étalonner les baromètres par exemple, on considère que cette diminution est de 1 hPa tout les 8,5 m jusqu'à 3500 m, au delà on prend 1 hPa tous les 17 m. A 850 m la pression atmosphérique moyenne est donc de 913 hPa et de 813 hPa à 1700 m.
La température d'ébullition de l'eau diminue avec la pression et donc avec l'altitude, cette température est de 100°C au niveau de la mer et elle n'est plus que de 97°C à 850 m, de 94°C à 1700 m et de 86°C à 3400 m.

2- La température de l'air diminue avec l'altitude.

Lorsqu'un gaz est comprimé il se réchauffe : c'est le phénomène que l'on peut observer lorsqu'on gonfle une roue de vélo et que la pompe s'échauffe. Réciproquement lorsqu'un gaz se détend sa température diminue phénomène que l'on peut observer lorsqu'on dégonfle une chambre à air et que la valve se refroidie.
C'est cette baisse de pression avec l'altitude qui est responsable de la diminution de la température de l'atmosphère Cette diminution de température est en moyenne de 6° C tous les 1000 m. Comme la pression et la température diminuent avec l'altitude l'humidité relative de l'atmosphère augmente avec l'altitude, lorsque la saturation est atteinte, les nuages apparaissent.

3 – La pluviosité augmente avec l'altitude.

L'humidité atmosphérique provient pour la plus grande partie de l'évaporation des mers et océans, car la majorité de l'eau terrestre s'infiltre ou retourne à la mer avec les rivières et les fleuves et ne suffit pas à alimenter l'humidité de l'atmosphère. Les montagnes obligent l'air humide transporté par le vent, qui provient de l'océan à prendre de l'altitude ce qui a pour conséquence d'augmenter son humidité relative en raison de la baisse de la température et de la baisse de pression. L'humidité de l'air augmentant avec l'altitude les précipitations sont donc plus importantes en altitude qu'en plaine.

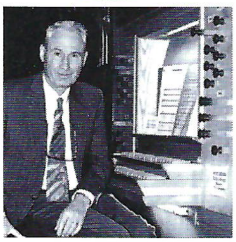
POURQUOI, PLEUT-IL PLUS A L'OUEST DES MONTAGNES QU'A L'EST ?

On peut constater qu'il pleut beaucoup plus sur la façade ouest de la chaîne des Mont-Dore que sur le flan est et que ce phénomène est très marqué. On peut donner comme exemple des mesures de pluviométrie faites par l'observatoire de physique du globe de Clermont au début du XXème siècle : sur une année on a mesuré 1629 mm au Mont-Dore à 1000 m d'altitude alors qu'il n'est tombé que 1160 mm à Besse situé à 1055 m et 828 mm à Saulzet-le-Froid situé à 1020 m. Ce phénomène porte le nom d'effet de foehn.
En Auvergne la plaine de Limagne est à environ 400 m d'altitude, elle est protégée des vents d'ouest par les chaînes des Puys et des Mont-Dore qui sont orientées nord-sud et qui culminent à 1880 m au Sancy. Pour atteindre la plaine de Limagne le vent d'ouest chargé d'humidité provenant de l'atlantique est obligé de franchir la barrière formée par les chaînes des Monts Dore et des Puys. Pour franchir les montagnes l'air, en prenant de l'altitude, se refroidit, entraînant la vapeur d'eau à se condenser et tomber sous forme de pluie sur le versant ouest. En redescendant sur le versant est cet air devenu plus sec se réchauffe en perdant de l'altitude, le vent devient un vent chaud et sec: le Foehn. Le mot Foehn vient de l'allemand, il trouve son origine dans les Alpes où l'effet de foehn est très marqué. En Limagne cet effet est assez visible sans être aussi spectaculaire que dans les Alpes. Il est assez courant qu'il pleuve toute la journée à La Bourboule alors que la Limagne bénéficie d'un beau soleil avec une barre de nuage très marquée vers l'ouest.



Barre de nuages à l'ouest d'Olloix le 2 mars à midi

Dossier



Sons musicaux continus de basses fréquences

Par Henri BOUFFARD

Ingénieur, Organiste et Facteur d'Orgues

Ce type de sons est caractérisé par des fréquences débutant à **16 Hz** et allant à **100 Hz**.

Ils sont émis par quelques instruments de musique comme la contrebasse à cordes qui peut émettre des sons de 32Hz soit une octave en dessous d'un violoncelle, le piano dont certains modèles peuvent émettre des sons de 16Hz, la timbale et la guitare basse mais en percussion, donc discontinus.

En fait les seuls sons musicaux **continus** de basses fréquences sont émis par l'orgue.

Dans cet instrument les sons de basse fréquence sont émis par des tuyaux qui font partie des « jeux » dits de **32 pieds**.

Ils sont placés en général au pédalier qui comporte 30 à 32 notes. Les jeux de 32' sur un clavier manuel sont très rares : 1 seul exemplaire actuel en France à l'église Sainte-Croix de Bordeaux.

Ils sont de 2 catégories : jeux à **bouche** ou à embouchure de flûte ou jeu à **anche** le plus souvent à anche battante.

Les jeux à bouche sont constitués de tuyaux soit fermés soit ouverts.

Le plus grand tuyau d'un jeu à bouche de 32 pieds (32') **fermé**, s'appelle **Contre-Soubasse 32'** et mesure 5,5 m de haut ; sa section interne est environ de 0,15 m².

Le plus grand tuyau d'un jeu à bouche de 32' ouvert s'appelle **Principal** ou **Flûte 32'** et mesure 11 m de haut ; sa section est d'environ 0,2 m² pour la Flûte et 0,12 m² pour le Principal.

De tels jeux sont très rares en France. Les orgues qui possèdent des jeux de 32' à bouche ouverts ou fermés sont en faible nombre, moins de 10, localisés surtout dans les très grandes orgues de Paris et sa région comme Notre-Dame, Saint-Sulpice, Saint-Eustache, Saint-Denis... Peu d'orgues en province possèdent des jeux à bouche de 32'.

Les jeux de la seconde catégorie sont constitués de tuyaux à **anche « battante »** où les résonateurs les plus longs sont soit de longueur presque identique aux tuyaux à bouche, de **5,5m** ou **11m**, soit des résonateurs de longueur réduite, fraction de la longueur « normale » et nommés Régales.

Les appellations les plus courantes pour les jeux ayant des résonateurs de longueur « normale » sont la **Contre-Bombarde de 32'** avec des tuyaux coniques et le **Contre- Basson 32'** avec des tuyaux coniques ou cylindriques.

La longueur du résonateur le plus long est de 11m. et le diamètre à l'extrémité libre peut atteindre 400 mm.

Les appellations concernant les jeux à anche à tuyaux résonateurs raccourcis sont le Sourdun 32', la Trompette régale 32' et autres ; la longueur du résonateur le plus grand est alors inférieure à 1m. La section du résonateur est de l'ordre de 100 cm².

Les intensités, amplitudes et timbres des sons émis sont différents d'un type de jeu à l'autre.

Le **Quintaton** de 32' est constitué de tuyaux bouchés de faible section; l'intensité est réduite, de faible ampleur et le timbre est particulier par suite de la présence permanente d'une quinte 32/3' qui est émise en même temps que le son fondamental. On trouve un tel jeu sur le Cavaillé-Coll de la cathédrale de Perpignan.

La **Contre-Soubasse de 32'**, avec ses larges tuyaux bouchés émet des sons amples et doux dont le timbre est indéfinissable, car constitué par un fondamental presque unique, sans harmoniques perceptibles.

La Flûte de 32' avec des larges tuyaux ouverts, émet des sons très amples et plus intenses que la Contre-Soubasse 32'. Là encore le fondamental est si prépondérant par l'ampleur de la section interne des tuyaux que le timbre est, lui aussi, peu émergent par la faible présence d'harmoniques.

Le Principal de 32' avec des tuyaux ouverts de section moyenne, inférieure aux jeux précédents, donne un son intense et timbré par suite de la présence d'harmoniques pairs.

Pour les jeux à anche battante, la **Contre-Bombarde de 32'** avec ses tuyaux coniques s'évasant vers le haut, donne un son puissant et timbré mais entendu seul, on perçoit des sons proches de ceux d'un marteau piqueur ! Un tel jeu doit impérativement être associé avec des jeux à anche donnant les harmoniques pairs comme la Bombarde de 16' et la Trompette de 8'. Avec ces 3 jeux, l'intensité est considérable et le timbre est celui d'un son fondamental très intense chargé d'harmoniques eux aussi intenses. L'ensemble constitue la plus forte intensité émise par un instrument de musique. On dépasse les 105 dB A.

Le **Contrebasson de 32'**, s'il est constitué de tuyaux résonateurs cylindriques donne une intensité plus faible que la Contre-Bombarde et un timbre différent puisque le fondamental est plus faible et que les harmoniques impairs sont plus intenses. Ce jeu est utilisé avec ses congénères comme le Basson de 16' et le Hautbois de 8'.

La **Sourdun de 32'** ou les **Régales de 32'** à corps raccourci de forme imprécise, donnent des sons faibles, étroits, maigres car la longueur du résonateur ne participe pas aux vibrations de l'anche ; le résonateur est inerte.

Fondamental faible mais harmoniques impairs prépondérants donnant un timbre particulier. Là encore un tel jeu ne s'emploie jamais seul car inaudible et peu intéressant musicalement.

Effets des sons musicaux continus de basse fréquence

a) sur le local

De tels sons dits « inouïs », in-entendus, provoquent si leur amplitude est suffisante pour le local qui les reçoit, des ébranlements considérables proches d'un tremblement de terre surtout en dessous de 25 Hz. Les

fréquences propres de vibration des fenêtres, portes, meubles, panneaux etc...peuvent entrer en résonance avec des amplit des amplifiées, surprenantes voire dangereuses. On a constaté des ruptures dues à des augmentations d'intensité pour certaines fréquences qui peuvent devenir préoccupantes d'autant que les sons de base émis paraissent doux.

La mesure de l'intensité de tels sons est délicate voire impossible car très vite les aiguilles des appareils de mesure vont en butée. On a la sensation d'être un **apprenti sorcier** mettant en oeuvre des énergies et des effets pas toujours contrôlés. La fragilité de certaines structures est mise en évidence!

b) sur les personnes

La première fois que l'on entend ou perçoit des sons de 20 Hz, par exe ple, émis par des tuyaux à bouche comme la Contre-Soubasse de 32' ou la Flûte de 32', la sensation est part culière et originale.

L'impression générale est une immense ampleur l'ensemble de l'air dans le local se mettant à vibrer; le corps humain participe à cette vibration soit par l'oreille mais surtout par les parois du corps comme l'abdomen et la boîte crânienne. C'est inattendu, surprenant mais plutôt agréable.

Ces sons très doux ne saturent ni n'agressent l'oreille et pourtant on perçoit une énergie mise en jeu qui est immense comme un son tellurique sortant de terre et qui dépasse les repères habituels habitudes de nos oreilles. Peut-être est-ce pour cela que ces sons provoquent une inquiétude, une peur, une angoisse pour certaines personnes.

Les battements du coeur augmentent et peuvent provoquer du stress. Certains sons de 32' sont déconseillés aux personnes ayant des problèmes cardiaques !

Par contre, de tels sons pour d'autres personnes, sécrètent de la dopamine, hormone du plaisir, et dans bien des cas ils sont recherchés car cette ampleur douce, insinuante, nouvelle, profonde entre toute, procure un sentiment de satisfaction inconnu et inédit : un son issu des entrailles de la terre.

Quand on enlève le jeu doux de Contre-Soubasse de 32' par exemple, en conservant seulement les sons de fréquence double comme la Soubasse de 16' et, le Bourdon de 8', les sons paraissent alors étriqués, maigres, peu amples : il y a un manque !

On retrouve ce phénomène dans certains morceaux de musique joués par exemple avec une Contrebasse à cordes : dès que la Contrebasse s'arrête de jouer, on ressent une absence. Pourtant, à écouter une Contrebasse seule, les sons émis sont faibles et ténus, très doux.

Il semble que les sons de basses fréquences ont des potentialités qui sont amplifiées par les harmoniques pairs ou impairs des autres sons que l'on associe.

Réalisation de jeux de 32' pour le pédalier

La réalisation la plus intéressante, la plus logique et la plus utilisée concerne le jeu de Contre-Soubasse de 32'. Elle sert de base. Son utilisation normale est au pédalier.

L'intervalle des fréquences d'un jeu de 32' au pédalier va de 16Hz (DO1) à 95 Hz (FA3).

Il y a donc 30 fréquences séparées par 1,059 qui est l'intervalle du demi-ton tempéré.

Les octaves sont définies par 1,059 puissance 12 soit 2.

Si la fréquence du DO1 est de 16Hz, la fréquence du D0 3 est donc égale à 16x 2 x 2 = 64 Hz.

Pour émettre des sons de 16 à 95 Hz, il y a 2 moyens connus et réalisables :

- jeu complet de 30 tuyaux, avec 2 variantes
- des sons numériques

1- Tuyaux

Un jeu de complet de 30 tuyaux de Contre-Soubasse de 32' allant donc du DO1 au FA3 est délicat à dessiner, réaliser, poser, harmoniser, accorder. C'est une tâche longue, incertaine quant au résultat acoustique, coûteuse et nécessitant des compétences nombreuses et diverses.

Examinons ces points :

Encombrement :

Les 30 tuyaux d'un jeu de Contre-Soubasse de 32' mis l'un à côté de l'autre avec 2 cm entre chaque tuyau occupent une longueur de 6,5 m env ron. La hauteur varie de 5,5m pour le DO1 à 1m pour le FA3.

Pour une Flûte de 32', la longueur est de 7m et la hauteur varie de 11 m à 2 m !

Poids :

Les 30 tuyaux pèsent 1500 kg environ

Coût :

Compter plus de 25000 € avec le sommier et la charpente support

Alimentation en « vent » :

Le DO1, le plus gros tuyau, consomme 1000 litres /minute d'air à une pression d'environ 900 Pascals. Il faut prévoir un ventilateur supplémentaire si le débit du ventilateur existant est insuffisant.

Réalisation :

Les tuyaux sont réalisés en bois et ils sont de section rectangulaire. L'épaisseur est de 24 mm minimum pour les plus gros tuyaux et décroît vers les plus petits pour atteindre 16 mm.

Il faut trouver des planches de contre-plaqué ou de bois de pin de 5,5 m de long sur 0,4 m de largeur, sans noeud, planes, poncées; il faut ensuite coller 3 planches en équerre puis fermer le caisson obtenu par une quatrième planche en essayant d'obtenir une parfaite étanchéité des collages.

Un tuyau de 5 m de long, qui sera bouché par un tampon doit être absolument étanche pour parler correctement. Or le collage sur de grandes longueurs introduit une incertitude quant à l'étanchéité. Une fuite est difficile à détecter et à colmater surtout de l'intérieur du tuyau et un tuyau non étanche est à rejeter.

Une autre difficulté est la réalisation du tampon mobile, pour l'accord placé dans le tuyau à son extrémité libre ; il est garni de feutre et de peau de mouton. Là encore le tampon doit être parfaitement étanche y compris dans les coins internes ce qui n'est pas simple à assurer.

Par contre il est aisé de corriger un tampon défectueux ou de le regarnir.

Pose :

Poser un tuyau de 5,5 m de long de 0,4 / 0,5 m de côté et pesant 120/130 kg sur un orifice conique en chêne d'environ 5 cm de diamètre n'est pas facile; après la pose il faut ensuite le fixer sur une robuste charpente support prévue à l'avance, par la face arrière.

Harmonisation - Accord :

Chaque tuyau étant alimenté en « vent », il faut maintenant qu'il émette le son correspondant à sa fréquence. Or pour les grands tuyaux fermés de multiples obstacles sont à résoudre :

- s'assurer que la lame d'air sortant par la « lumière » vient bien frapper la lèvre supérieure
- stabiliser la lame d'air en la faisant passer d'un régime **laminaire** instable à un régime **turbulent** plus facilement rendu stable
- modifier l'intensité en créant une perte de charge au niveau de l'alimentation en vent
- faire parler le tuyau avec le moins de souffle parasite possible ce qui est difficile car les sons de basse fréquence sont des souffles, proches des souffles parasites dus à une mauvaise géométrie du tuyau.

Un tuyau de grandes dimensions ne se laisse pas manipuler aisément et les actions correctives sont longues et délicates.

L'accord s'effectue une fois l'intensité, l'attaque et la netteté obtenues.

Pour un tuyau fermé, il a 2 moyens d'accorder le son émis par le tuyau à la fréquence désirée :

- agir sur la position du tampon, sachant qu'en enfonçant le tampon dans le corps du tuyau on tend à le raccourcir et la fréquence émise augmente et inversement (effet fort)
- soit utiliser frein de bouche qui se place devant la bouche et ralentit la lame d'air ce qui tend à baisser la fréquence ; de même on place des « oreilles » en étain de chaque côté de la bouche et en écartant les oreilles la fréquence augmente et inversement (effet faible)

2. - Résultats, avantages, inconvénients :

Dans l'ensemble, les sons émis ont une ampleur magnifique, extraordinaire, et un morceau de musique joué à la pédale avec le 32' et ses octaves de 16' et de 8' acquiert une profondeur rarement ressentie. Il y a une sensation viscérale très agréable à percevoir de tels sons.

Malgré les efforts de l'harmoniste, il y a des retards dans l'attaque des basses dus au délai normal de mise en vibration des ondes stationnaires de la colonne d'air à l'intérieur du tuyau quand il mesure plusieurs mètres soit plus d'une seconde. Les sons de 16' et de 8' associés tendent à entraîner ceux du 32' et réduire ce retard. C'est pourquoi il faut impérativement associer des jeux plus aigus au jeu de 32', en particulier les octaves de 16' et de 8'.

Le coût, l'encombrement, le poids, la difficulté de réalisation complète et le long délai de mise en fonctionnement correct sont de très sérieux obstacles. Le nombre de facteurs d'orgues, en France, capables de réaliser et de mettre en fonctionnement un jeu de 30 tuyaux de Contre-Soubasse de 32' est limité. On peut craindre, malgré ses aspects très séduisants, que ce jeu reste rare sur nos orgues. Pourtant J.S. Bach préconisait ce jeu.

2 variantes à tuyaux pour obtenir un jeu de Contre-Soubasse de 32'

1- par extension d'une octave inférieure sur une Soubasse 16'

Il suffit dans ce cas de figure d'ajouter les 12 tuyaux de la première octave d'une Contre-Soubasse de 32'. Ceci nécessite une commande électrique de tous les tuyaux et d'un répartiteur électrique bien connu.

Le coût, l'encombrement et le poids sont considérablement diminués.

En utilisant les tuyaux à 2 ou 3 sons (système Bouffard), la première octave comprend 4 tuyaux au lieu de 12 et la longueur d'encombrement de ces 4 tuyaux est d'environ 1,5 m.

2- par utilisation d'une Soubasse 16' et d'un jeu de grosse Quinte 32/3 '

Cette variante utilise un principe physique appelé sons différentiels.

On peut obtenir un son de fréquence 16 Hz à partir d'un son de **32Hz** et d'une quinte donnant

une fréquence de 32x1, 5 = **48Hz**, car on a : 48-32 = **16 Hz**.

La réalisation est simple: on utilise un jeu de Soubasse 16' bien connu et aisé de réalisation et on adjoint un jeu de Quinte 32/3' dont le tuyau le plus grave mesure environ 2m.

Deux sons seront émis ensemble pour chaque note, le son de la Soubasse 16' et le son de la quinte 32/3'.

Il faut que les tuyaux de la Quinte soient très doux en intensité et bien accordés en supprimant tout battement indiquant un écart dans l'accord.

Le coût, l'encombrement et la complexité sont réduits, mais les résultats acoustiques et musicaux sont très en-dessous du jeu normal de 32'. Les sons sont si ténus que la perception de la merveilleuse sensation du 32' n'apparaît que très faiblement, voire à peine perceptible.

Si l'idée de base est astucieuse, séduisante et originale, les effets obtenus sont peu convaincants.

Avec des sons numérisés

Il existe dans le commerce spécialisé des sons de Contre-Soubasse 32' soit qui ont été enregistrés soit à partir de tuyaux de 32', soit élaborés à partir de sons de Soubasse 16' traités sur ordinateur pour descendre d'une octave. De tels sons sont appelés « **source** » et sont disponibles dans le commerce sous le vocable « **expandeur** ».

A partir du pédalier d'un orgue à tuyaux, si l'on désire utiliser les sons de l'expandeur, il faut :

- un contact électrique sur chaque touche du pédalier
- relier les contacts par multiplexage à une carte MIDI
- relier cette carte MIDI, par cordon MIDI, à une entrée de l'expandeur
- relier l'expandeur à un filtre qui va éliminer les fréquences trop élevées et ramener la bande passante entre 16 et 95Hz
- relier le filtre à un amplificateur lui-même relié aux haut-parleurs d'une enceinte acoustique

Jusque là, les composants existent et leurs performances sont connues sauf en ce qui concerne les fréquences réellement données par les HP (haut-parleurs)

Deux difficultés dans cette « chaîne » :

- les HP qui émettent réellement des sons de 20 Hz avec une amplitude suffisante sont rares et chers
- il faut un diamètre important : 46 cm de diamètre est normal car pour obtenir des basses fréquences avec de l'amplitude, il faut déplacer beaucoup d'air
- les HP doivent de préférence avoir une membrane très souple pour répondre rapidement et limiter la puissance de l'ampli. On conçoit qu'une membrane rigide est certes robuste mais a besoin de plus de puissance pour la mettre en mouvement qu'une membrane souple
- il est préférable de placer 2 HP de diamètre D/ 1,414 qu'un seul de diamètre D

Exemple, 2 HP de diamètre de 32 cm à la place d'un seul HP de 46 cm.

La réalisation d'une enceinte capable d'émettre des sons de 20Hz avec une intensité largement perceptible est délicate. En fait les fréquences réellement émises se situent autour de 25Hz avec impossibilité de descendre plus bas.

On se trouve dans un domaine scientifique et technique sans références réelles où les réalisations les plus intéressantes concernent des activités liées à l'armement donc loin du domaine public, comme les immensesanons à infra sons.

Résultats, avantages, inconvénients

L'encombrement est particulièrement réduit, l'ordre de 1m³ tout compris.

Poids de 100 kg et coût total de 6000 euros ne prenant pas en compte les capacités limitées en fréquence des enceintes. Pour atteindre 16 ou 20 Hz, il faudrait des moyens beaucoup plus importants donc beaucoup plus coûteux.

Les résultats acoustiques sont en fréquence inférieurs à ceux obtenus avec des tuyaux mais les attaques sont parfaites, les fréquences stables, les ampleurs proches voire identiques aux tuyaux.

Le principal inconvénient réside dans l'impossibilité d'obtenir actuellement des fréquences inférieures à 25Hz. Il semble, d'après plusieurs spécialistes, que l'on se trouve près d'une asymptote technologique pour émettre numériquement des sons de l'ordre de 16 Hz d'amplitude suffisante pour saturer un local de 5000 m³.

(Réalisation intéressante sur l'orgue de Chamalières avec une Contre-Soubasse numérique de 32' donnant des effets sensibles mais incomplets en fréquence).

"Lumière et luminescence"

Le 14 juin dernier M. Bernard VALEUR, Professeur au Conservatoire National des Arts et Métiers (CNAM) à Paris a bien voulu nous faire l'honneur de donner une conférence en nos locaux de Chamalières. Ci-après le résumé de cette conférence.

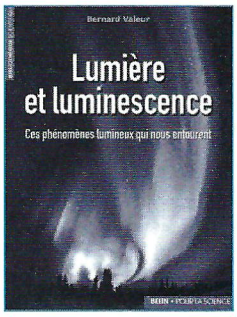
« Qu'est-ce que la lumière ? Vaste question qui figure parmi les plus difficiles de la physique. Si la lumière a livré une grande partie de ses secrets aux physiciens du XX^{e} siècle, le voile n'est pas complètement levé, et nous sommes loin d'avoir exploité toutes ses potentialités en termes d'applications.

Comment la lumière est-elle produite ? Il est essentiel de distinguer l'**incandescence**, lumière émise par les corps portés à haute température (lumière dite chaude), et la **luminescence** qui n'est pas d'origine thermique (lumière dite froide). L'émission par incandescence obéit à des lois qui ne dépendent pas de la nature du corps émetteur. La lampe à incandescence en est un exemple bien connu. En revanche, la luminescence qui résulte de la désexcitation d'atomes ou de molécules dépend de la nature de ces espèces : les feux d'artifices en sont l'éclatante démonstration. Les divers types de luminescence se distinguent par le mode d'excitation des atomes ou des molécules : absorption de lumière, champ électrique, réaction chimique ou biochimique, rayonnement radioactif, etc.

Après une introduction épistémologique sur la nature de la lumière, une brève description de l'incandescence et son application à l'éclairage sera présentée, puis l'extraordinaire diversité de la luminescence sera illustrée par des exemples relevant des principaux types de luminescence : fluorescence, phosphorescence, électroluminescence, chimiluminescence, bioluminescence, thermoluminescence. Ces phénomènes donnent lieu à une multitude d'applications : lampes et tubes fluorescents, azurants optiques, diagnostics médicaux fondés sur la fluorescence (angiographie, puces à ADN), visualisation du vivant, lampes à décharge (sodium, mercure, halogénures métalliques), écrans à plasma, diodes électroluminescentes (LED et OLED), datation archéologique par thermoluminescence, etc. »

Si vous souhaitez en savoir plus sur ce sujet passionnant vous pouvez trouver toutes les réponses à vos questions dans son livre.

Ouvrage édité par :
BELIN . POUR LA SCIENCE
8 rue Férou
75278 PARIS CEDEX 06
www.editions-belin.com
www.pourlascience.com





"Nanosciences et nanotechnologies"

Le 25 octobre, M. Frédéric CHANDEZON, Docteur es sciences (spécialité Physique), ingénieur C.E.A. a bien voulu nous faire l'honneur de donner une conférence en nos locaux de Chamalières dont le sujet était « **Nanosciences et nanotechnologies : des objets à quelques exemples d'application** ».

M. Frédéric Chandezon nous fera parvenir un texte à ce sujet qui paraîtra dans le prochain numéro d'Auvergne-Sciences.

Vous trouverez ci-dessous pour première information résumé de sa conférence.

Les nanosciences traitent d'objets dont au moins une des dimensions est inférieure à 100 nm, soit encore 0,1 µm ou bien 1/10 000^{e} de mm. Dans ce domaine de tailles, les lois de la physique quantique deviennent prépondérantes donnant lieu à des propriétés nouvelles. De ce fait, les nanosciences connaissent un fort engouement depuis quelques années avec des budgets de recherche alloués en augmentation dans de nombreux pays et des initiatives nationales ou internationales pour coordonner les efforts de recherche dans le domaine. L'inauguration récente du pôle d'Innovation en Micro et nanotechnologies MINATEC à Grenoble en est un exemple. Il faut dire que les perspectives (et promesses) d'applications sont nombreuses tirant avantage de la miniaturisation des objets et des lois physiques particulières qui régissent le nanomonde. Le mode de travail des scientifiques est également modifié par le caractère pluridisciplinaire intrinsèque des nanosciences, imposant un dialogue permanent entre physiciens, chimistes, biologistes et ingénieurs.

Le but de cette conférence est de présenter de manière non exhaustive quelques aspects des nanosciences depuis les objets jusqu'aux applications. Seront abordés en particulier les points suivants :

- Les objets : quels sont ils ? Quelles sont leurs propriétés et leurs particularités ? Comment les fabrique-t-on ?
- Sont-ils totalement nouveaux ? Je démontrerai ainsi à partir de quelques exemples d'objets que les artisans des siècles passés étaient des nanotechnologues (sans forcément le savoir).
- Quelles sont les nouvelles perspectives d'application des nanosciences ?

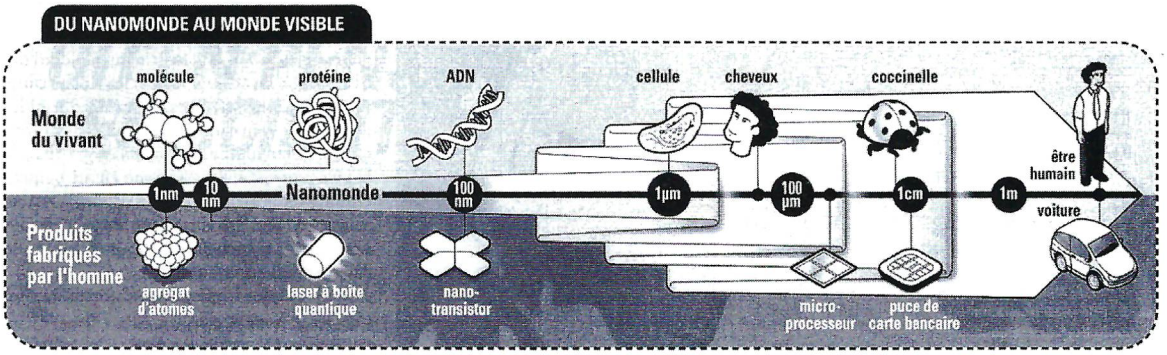


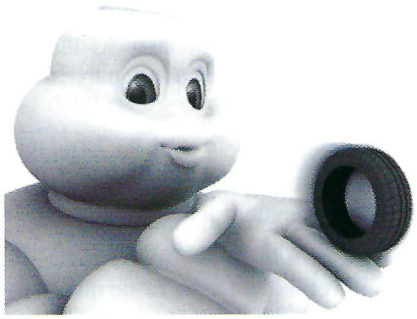
Photo extraite du N° 189 du Journal du CNRS

Visite par l'Adasta le 21/09/2006 du site des pistes d'essais de la Manufacture Française des Pneumatiques MICHELIN, à Ladoux.

Nous remercions vivement les accompagnateurs Michelin et le personnel ayant réalisé les démonstrations.



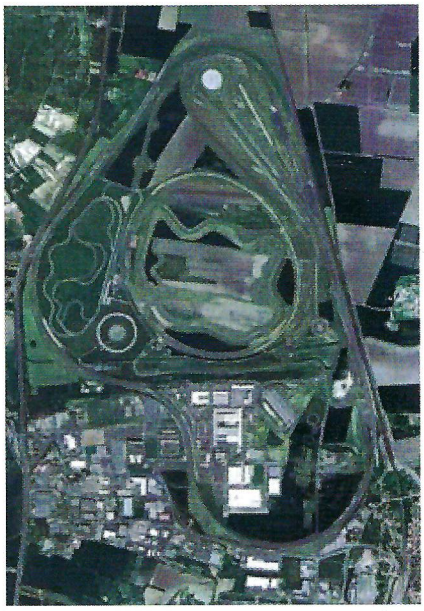
Michelin abaisse la résistance au roulement

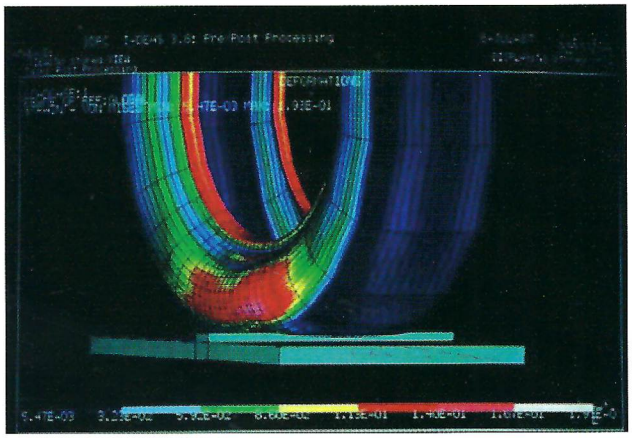


Depuis ses origines, Michelin s'est donné pour mission d'assurer aux biens et aux personnes une meilleure mobilité et la problématique énergétique est une de ses préoccupations fondamentales. C'est ce que nous avons pu constater au cours de la démonstration durant laquelle un véhicule équipé de pneus à très basse *résistance au roulement** a largement dépassé le véhicule équipé de pneus de la génération précédente, prouvant l'avancée technologique permanente remise en question par Michelin.

** Résistance au roulement : A chaque tour de roue, et sous l'effet de la charge, le pneu se déforme pour épouser la route. Lors de cette déformation, les matériaux constitutifs du pneu (notamment la gomme) dissipent de l'énergie. Cette dissipation à l'origine du phénomène d'échauffement des pneumatiques, constitue la résistance au roulement. Or, l'énergie qui permet de faire avancer les véhicules provient du carburant.*
Réduire la résistance au roulement des pneumatiques permet donc de réduire la consommation de carburant des véhicules.

Nous avons pu constater également toute l'importance de la monte de pneus neufs à l'arrière du véhicule pour plus de sécurité en cas de situations imprévues et difficiles (freinage d'urgence, virage serré...) surtout sur sol mouillé. La monte de pneumatiques neufs ou les moins usés à l'arrière offre une meilleure adhérence en courbe, une bonne stabilité au freinage ainsi qu'une sécurité renforcée.





Dossier

Des nouvelles des "Jeunes Pousses"

Par Pierrette TOURREIX

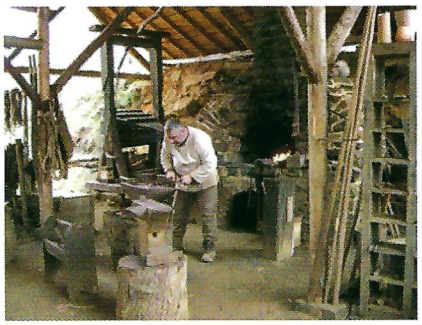
Programme prévisionnel session 2006/2007

Des séances supplémentaires sont ajoutées en cas de manifestations, telles que expositions dans la ville de Clermont de nature à intéresser les « Jeunes Pousses »

27/09	Accueil des Jeunes Pousses – expériences sur l'eau en vue de donner une pratique des manipulations pour la Fête de la Science.
11/10 ***Fête de la Science***	Etant donné le thème porteur sur l'eau, priorité académique, les enfants ont effectué
15/10 ***Forum des Associations***	en public des expériences sur le sujet lors des deux manifestations.
15/11	Mesure de la pression atmosphérique au Puy de Dôme.
6/12	Utilisation du microscope et observation.
10/01/07	On tire les rois, Jeux sur le réchauffement de la température.
7/02	Chimie : le nylon etc…
7/03	Observation des produits de la mare (algues, …).
18/04	Le magnétisme, les aimants, fabrication d'une boussole, électro-aimant.
23/05	Vent, orage, éclair et tonnerre.
6/06	Eventuellement la lumière – analyse et synthèse – diffraction ou réseau avec le pointeur.

Un voyage culturel est prévu comme chaque année. La date et le lieu sont encore en cours d'étude.

Le **25 mars 2006**, les « Jeunes Pousses » de l'ADASTA sont allés au château de Guédelon près de Saint Fargeau dans l'Yonne où ils ont pu s'intéresser à l'activité des divers métiers tel le forgeron et « expérimenter » le genre de supplice infligé aux disons « contrevenants » de l'époque.



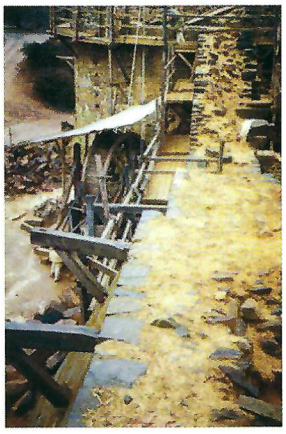
Guédelon c'est un château fort en cours de construction selon les techniques du Moyen-Age. Le chantier a démarré en 1997 et va durer 25 ans. 50 personnes travaillent en permanence de mars à novembre.

Le site de Guédelon a été choisi pour deux raisons principales : il est au milieu d'une forêt qui fournit le bois pour les échafaudages, les portes, le pont ; il est situé sur une carrière de grès d'où l'on peut extraire des pierres très solides.



Le château a une forme carrée avec quatre grands murs reliés par quatre tours d'angle : il peut loger le seigneur et sa famille et une dizaine de serviteurs et soldats.

C'est le maître d'oeuvre qui dirige le chantier, il a tracé sur le sol le plan du château avec des piquets et des cordes. Chaque jour il organise le travail des ouvriers et surveille que le chantier avance bien. Les deux principaux outils utilisés sont la pige et la corde à 13 noeuds. (illustrées dans l'article "un chantier médiéval en Bourgogne : le Château de Guédelon").



Une partie du chantier

La pige c'est un bâton comportant 6 unités de mesure. La pige de Guédelon mesure une coudée, environ 50 centimètres. La corde à 13 nœuds permet de mesurer des grandes longueurs et de faire des figures géométriques.

L'enceinte fortifiée, la poterne, le pont dormant, la salle de tir, la cave en voûte d'arêtes ont déjà été réalisés. Fin 2006, neuf ans après la pose de la première pierre, les ouvriers attaquent le 2e niveau de la tour maîtresse, future chambre seigneuriale. Ils montent la façade des logis et posent le plancher couvrant le cellier et la cuisine.

Les « Jeunes Pousses » ont pu découvrir et observer le travail des divers artisans. Tout d'abord au coeur de la forêt à l'écart du chantier les tuiliers, vanniers, cordiers, bûcherons qui travaillent comme au Moyen-Age. Les charretiers et leurs chevaux assurent transports et débardages.

Les matériaux sont élevés avec la cage à écureuil qui est actionnée par un homme. Les carriers, tailleurs de pierre extraient, taillent et posent les blocs de grès sortis de la carrière. Le forgeron façonne, trempe les outils et les pièces en métal du château.

Les charpentiers reçoivent les chênes abattus par les bûcherons pour les équarrir, les tailler, les assembler en échafaudages, coffrages et charpentes.

Les animaux de la ferme médiévale ont beaucoup intéressé les enfants, surtout les porcelets à la robe noire et blanche qu'ils ont coursé dans la forêt.

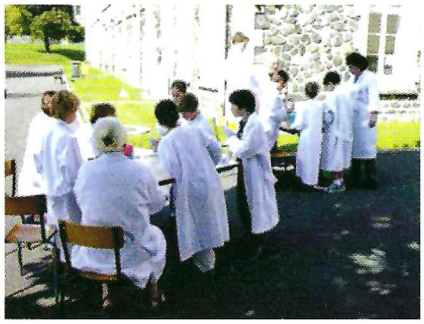
Il pleuvait à Guédelon, aussi je vous laisse imaginer l'état de propreté des « Jeunes Pousses » qui ont couru dans le chantier, ont glissé sur la terre meuble et très souvent sont tombés. Nous avons eu beaucoup de mal pour leur enlever la boue avant qu'ils entrent dans le car – mais ils ont passé une journée merveilleuse et se sont familiarisés aux techniques du XIV[e]siècle.

Rendez-vous dans quelques années pour voir l'évolution du chantier.

Quelques photos de la séance de rentrée session 2006/2007







Informations

L'ADASTA A PARTICIPÉ :

A la Fête de la science (9 au 15 octobre)

Lundi 9 : conférence de Michel Naranjo : deux systèmes de vision : naturelle et artificielle
Mardi 10 après-midi et vendredi 13 matin : Jean Chandezon : la stéréophoto numérique
Mercredi 11 après-midi au Centre Jaude : les Jeunes Pousses ont présenté des expériences en public en 2 séances de 14 h à 19h
Jeudi 12 : conférence de Louis Avan à l'Ecole de Commerce : de Copernic à Galilée – l'intuition entre le dogme et la raison
Jeudi 12 : intervention de Suzanne Gély au Lycée Marie Curie : les travaux de Pasteur à Clermont-Ferrand
Vendredi 13 : intervention de Suzanne Gély au Collège Albert Camus

Au Forum des Associations les 14 et 15 octobre

L'ADASTA a accueilli à partir de l'après-midi du 14/10 les visiteurs intéressés, a présenté ses activités. Attraction importante notre planétarium ; 2 séances le samedi après-midi. Le 15/10 même programme de présentation des activités avec une séance planétarium le matin et une l'après-midi. Les "Jeunes Pousses" ont présenté leurs expériences le dimanche après-midi.

Journée Académique UdPPC le 22 juin à Monistrol-sur-Loire

L'ADASTA était présente en la personne de Suzanne Gély.

L'ADASTA A EU L'AUTORISATION d'effectuer une visite le 21 septembre des Pistes d'essai de Ladoux de la Manufacture Française des Pneumatiques Michelin.

L'ADASTA sera présente à Expo-sciences en mai 2007 à Polydôme où elle présentera entre autres le planétarium.

Adhésions et Abonnements

Adhésions à titre individuel.....30€ Adhésions à titre collectif.....80€

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

Permanences - elles sont assurées par les bénévoles :
du Lundi au Jeudi de 8h à 12h et de 14h à 17h et le Vendredi de 8h à 12h *(juillet et août inclus)*
En cas d'absence laisser message sur répondeur ou envoyer fax ou E-mail.

Adresser le courrier : **ADASTA, Centre Riche-Lieu - 13, rue Richelieu - 63400 Chamalières**
Siège social - 10, rue de Bien-Assis - 63000 Clermont-Ferrand
Tél. 04 73 92 12 24 - Fax 04 73 92 11 04 - E-mail : adasta@wanadoo.fr - Site internet : http://perso.wanadoo.fr/adasta

Dépôt légal Décembre 2006 - N° ISSN - 1166-5904