

AUVERGNE

N° 75 - DÉCEMBRE 2010

Sciences



LE PRINCIPE DE PRÉCAUTION
ET LES POLLUTIONS DUES
À L'ACTIVITÉ HUMAINE

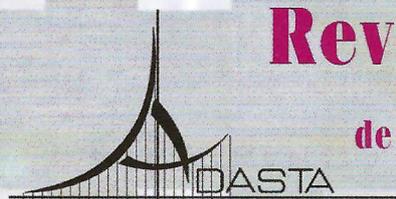
LE FOUR À
MICRO-ONDES

LE TEMPS SOLAIRE

DE LA BOUSSOLE
AU GPS,
MILLE ANS
DE NAVIGATION

LE NUCLÉAIRE
DU FUTUR
LES RÉACTEURS
DE QUATRIÈME
GÉNÉRATION
(1^{ÈRE} PARTIE)

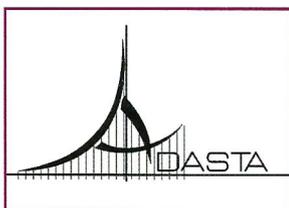
LES JEUNES
POUSSES :
PROGRAMME 2010-2011



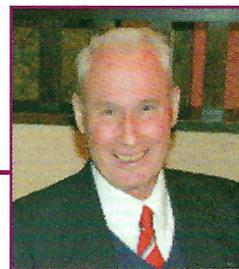
Revue de l'ADASTA

Association pour le Développement
de l'Animation Scientifique et Technique en Auvergne
avec la participation du

Conseil Scientifique SERTILLANGES



EDITORIAL



L'ADASTA termine l'année 2010 avec des satisfactions mais aussi des préoccupations.

Les conférences 2010 ont été particulièrement bien suivies et intéressantes. Le Rectorat a même demandé à l'Adasta qu'une conférence particulière ait lieu dans la salle de l'Adasta rue de Bien-Assis sur « le Grand Saut », sujet original sur un projet de saut en parachute depuis 40 000 mètres d'altitude avec calcul des différentes vitesses atteintes pendant la chute.

J'ai eu aussi l'occasion de faire une conférence à l'IFMA sur les aspects scientifiques de l'orgue devant une centaine de personnes surtout des étudiants.

Le cycle des conférences 2011 est déjà bouclé comme vous le constaterez dans la présente revue.

Les 4 conférences-débat sur l'énergie vont avoir lieu avec la première le 16 février à 17h30 à l'amphithéâtre de l'IFMA. Animateur M. Moncomble spécialiste mondial de l'énergie qui est invité par l'EDF et qui parlera de la consommation énergétique et de son évolution.

Les 3 autres conférences-débat suivront à des dates à définir.

Les adhérents de l'Adasta seront bien entendu invités à ces conférences-débat qui s'ajoutent aux conférences ADASTA prévues.

Vos nombreuses réponses concernant les horaires des conférences sont en cours de dépouillement et le Conseil d'administration décidera de l'horaire à adopter.

En ce qui concerne les sorties et les visites, là aussi les prévisions de 2011 sont définies sauf pour une sortie qui est à décider entre plusieurs possibilités : Pic du Midi avec visite de l'Observatoire à 2800 m d'altitude, soufflerie de Modane, tunnel de Balbigny sur l'autoroute de Roanne-Lyon, visite de l'usine Pechiney (fabrication d'aluminium à St Jean de Maurienne), visite du tunnel du Fréjus à Modane.

Vous serez là encore informés de la décision.

Les visites organisées et effectuées en 2010 ont été passionnantes de l'avis des visiteurs qui pourraient être encore plus nombreux que 25 ou 30. N'hésitez pas à nous faire part de vos souhaits et de vos remarques.

L'ADASTA a profité de la démission attendue de 2 animatrices des « Jeunes Pousses » pour d'une part élargir le recrutement sur l'ensemble de l'agglomération soit 15 structures scolaires et non scolaires comme les Comités d'Entreprise ce qui amènera environ 60 jeunes de 7 à 14 ans, et d'autre part relever le niveau scientifique en proposant de nouvelles animations scientifiques.

Celles de 2011 sont définies ; et depuis septembre 2010 ont été successivement présentées : le four à micro-ondes, l'orientation avec carte, boussole et GPS, l'initiation à l'astronomie visuelle et la découverte des cadrans solaires, la découverte de l'orgue à tuyaux de Chamalières. Pour 2011 vous les trouverez dans cette revue (page « Jeunes-Pousses »).

Plusieurs activités astronomie sont prévues dès 2011 en particulier sur 800 élèves du Lycée de Cusset à partir du 17 janvier.

En ce qui concerne l'équilibre de nos finances, plusieurs pistes sont envisagées : parution de la revue 2 fois par an avec au moins 50 pages par revue et une subvention de 3000 € par la ville de Clermont pour les conférences-débat que nous organisons.

Dans tous ces points positifs pour l'Adasta, nous déplorons toutefois un motif d'insatisfaction qui est la diminution progressive, depuis plusieurs années, du nombre de nos adhérents.

Merci de votre présence, de votre confiance de votre intérêt pour l'ADASTA.

Toute l'équipe de l'ADASTA vous présente ses meilleurs vœux de bonne et heureuse année. Que l'année 2011 soit une année faste pour l'Adasta, pour un développement scientifique en Auvergne avec le concours de toutes les bonnes volontés qui y concourent.

Le Président,
Henri Bouffard

SOMMAIRE

MERCI À NOS SPONSORS



Comité de rédaction de la Revue Auvergne-Sciences

Rédacteur en chef: Philippe Choisel

Membres : Jocelyne Allée, Georges Anton, Gérard Baillet, Vincent Barra, Henri Bouffard, Jean-Claude Capelani, Jean Chandezon, Luc Dettwiller, Roland Fustier, Paul-Louis Hennequin.

| | |
|---|----|
| Le principe de précaution et les pollutions dues à l'activité humaine | 1 |
| Le four à micro-ondes | 7 |
| Le temps solaire | 12 |
| De la boussole au GPS, mille ans de navigation | 16 |
| Le nucléaire du futur | |
| Les réacteurs de quatrième génération (1 ^{ère} partie) | 19 |
| Les jeunes pousses : programme 2010-2011 | 25 |

Les articles publiés sont de la responsabilité exclusive de leurs auteurs



Conseil Scientifique Sertillanges

Ensemble scolaire JB de la Salle représenté par Louis Avan
Couverture : Photo et calcul du cadran : Gérard Baillet
Réalisation école de Saint Benoît (département de la Vienne)
avec Mme Rivano Mosaïste
Remerciements également à nos auteurs pour les photos communiquées
Réalisation et conception :
Design'Création - 04 71 02 80 57



LE PRINCIPE DE PRECAUTION ET LES POLLUTIONS DUES A L'ACTIVITE HUMAINE

Pr. G. LEDOIGT,

Professeur, université Blaise-Pascal Clermont-Ferrand II,

ERTAC-PIAF UMR 547 INRA-Université Blaise-Pascal, Clermont-Ferrand

INTRODUCTION

L'objectif du principe de précaution est la prévention des risques, lorsque la science et les connaissances techniques ne sont pas à même de fournir des certitudes, principalement dans le domaine de l'environnement et de la santé. La différence entre la précaution et la prévention tient au fait que la **prévention** s'intéresse aux risques avérés alors que la **précaution** se préoccupe des risques potentiels. La précaution est caractérisée par des dispositions préventives afin d'éviter un mal ou d'en réduire les effets, avant qu'il ne soit trop tard. En 1992, la Déclaration de Rio (principe n°15) a entériné ce principe, à l'issue de la deuxième Conférence des Nations Unies sur l'environnement et le développement.

En France, la loi n° 95-101 du 2 février 1995 (dite loi Barnier) relative au renforcement de la protection de l'environnement énonce ainsi le principe de précaution : "L'absence de certitudes, compte tenu des connaissances scientifiques et techniques du moment, ne doit pas retarder l'adoption de mesures effectives et proportionnées visant à prévenir un risque de dommages graves et irréversibles à l'environnement à un coût économiquement acceptable". Ce principe est inscrit dans la Constitution Française avec la Charte de l'Environnement de 2005.

Le principe de précaution représente donc une prise de décision en situation d'incertitude.

UTILISATION DU PRINCIPE DE PRECAUTION

A l'origine, le principe de précaution s'appliquait à la gestion de l'environnement et non à la gestion de crise liée à la défense d'un système précis de valeurs, comme la santé ou la biodiversité. Les débats portent maintenant sur des valeurs de priorité, comme, par exemple récemment, dans le cas de la vaccination grippale ou des OGM.

La précaution se traduit par un processus de délibération permettant d'opter pour la solution la mieux adaptée. Par définition, ce processus définit une incertitude qui aboutit, le plus souvent, à la suspension de toute action et le développement d'un moratoire. Cependant lorsque le raisonnement définit une surévaluation du risque, il déclenche une déception et une crise de confiance vis-à-vis des structures. Une sous-évaluation du risque entraîne un danger à plus ou moins long terme. Il faut donc bien connaître les risques pour mieux les appréhender et les maîtriser.

L'ENVIRONNEMENT

Il caractérise le voisinage d'un être vivant ou d'un groupe d'origine humaine, animale ou végétale, susceptible d'interagir avec lui directement ou indirectement. Depuis les années 1970, il représente le contexte écologique global, l'ensemble des conditions physiques, chimiques, biologiques climatiques, géographiques et culturelles. L'environnement inclut donc l'air, la terre, l'eau, les ressources naturelles, la flore, la faune, les hommes et leurs interactions sociales.

Il faut noter que l'écologie est la science de l'environnement qui s'est développée en même temps que la biologie dans le cadre des sciences naturelles. Cette étude de l'environnement n'a été prise en compte par la société, dans les années 70, qu'à partir du moment où les hommes ont pris conscience de l'interaction de l'environnement avec la santé.

La charte de l'environnement de 2004 définit plusieurs directives contraignantes pour les sociétés dont les principaux points sont :

Article 1^{er} Chacun a le droit de vivre dans un environnement équilibré et respectueux de la santé

Article 2 Toute personne a le devoir de prendre part à la préservation et à l'amélioration de l'environnement.

Article 3 Toute personne doit, dans les conditions définies par la loi, prévenir les atteintes qu'elle est susceptible de porter à l'environnement ou, à défaut, en limiter les conséquences.

Article 7 Toute personne a le droit, dans les conditions et les limites définies par la loi, d'accéder aux informations relatives à l'environnement détenues par les autorités publiques et de participer à l'élaboration des décisions publiques ayant une incidence sur l'environnement.

Article 9 La recherche et l'innovation doivent apporter leur concours à la préservation et à la mise en valeur de l'environnement.

LES SOLS

L'environnement est particulièrement caractérisé par les interactions entre les êtres vivants et les supports non vivants essentiellement constitués par les sols, les milieux aqueux et par les systèmes aériens. Parmi ces supports, les sols représentent un environnement fondamental pour les activités humaines.

Les sols sont naturellement des réservoirs de matières organiques et minérales, des supports pour les êtres vivants, des régulateurs des échanges et des flux dans les écosystèmes, des sites de transformation de la matière organique, des systèmes épurateurs de substances toxiques. En relation avec les activités humaines, les sols sont des lieux de productions agricoles et forestières, des sites de stockage des matières premières et de déchets, des éléments constitutifs du paysage.

Les menaces sur les sols sont représentées par des altérations physiques, telles l'érosion, la compaction, la perte de matière organique, les scellements et excavations, ou des altérations chimiques, comme l'acidification, la salinisation, les contaminations (organiques ou minérales).

Les conséquences de ces atteintes se manifestent par des fonctions altérées des sols, des risques pour la sécurité alimentaire (eaux, aliments), des pertes irréversibles. Le sol doit être considéré comme une ressource non ou difficilement renouvelable.

La nature des polluants dans les sols est liée à différents types d'activités humaines comme les activités agricoles (pesticides, engrais, ...), les activités urbaines et industrielles (polluants organiques, hydrocarbures pétroliers, HAP (hydrocarbures aromatiques polycycliques), BTEX (composés organiques mono-aromatiques volatiles : Benzène, Toluène, Ethyl-benzène et Xylènes), PCB (polychlorobiphényles), les solvants halogénés, les éléments en traces comme des métaux ou des métalloïdes et des radionucléides.

La qualité des sols n'est qu'une préoccupation récente : « la pollution des sols pourrait bien être, après celle de l'air et de l'eau, l'un des grands enjeux environnementaux des générations futures » a dit Margot Walström, commissaire

européenne chargée de l'environnement, le 19 avril 2002.

Les différentes échelles de pollution sont représentées entre autres par la proximité, dans les grandes villes et zones fortement peuplées, car les polluants atmosphériques ont des effets sur la santé humaine, les écosystèmes et les monuments. Ces différentes échelles sont aussi celles de la pollution à longue distance; les polluants émis par les activités humaines retombent en partie à proximité des sources, mais aussi à des centaines, voire des milliers de kilomètres de leur sources émettrices. Parmi les principaux problèmes de pollution à longue distance se trouvent les émissions physico-chimiques, dont les pollutions photochimiques et électromagnétiques, et biologiques.

Les effets des polluants peuvent concerner la santé (corps humain, au niveau de la peau, muqueuses, alvéoles pulmonaires, sang ou dans les liquides superficiels, organes) avec des possibilités d'accumulation; ces effets peuvent être immédiats (accidents), à brève échéance, ou à long terme (exposition chronique, à des concentrations qui peuvent être très faibles). Ils peuvent concerner les matériaux (patrimoine culturel, restauration des monuments), les écosystèmes terrestres (forêts), les écosystèmes d'eau douce et maritimes. Par exemple, l'acidification des lacs et des cours d'eau entraîne une destruction parfois irréversible d'une certaine vie aquatique; la baisse du pH provoque la mise en solution de métaux contenus naturellement dans le sol, comme l'aluminium toxique à l'état dissous pour presque la totalité des organismes vivants.

LES POLLUTIONS MOLECULAIRES OU CHIMIQUES

Tous les polluants ne présentent pas les mêmes risques pour les écosystèmes. Certains notamment sont biodégradables. Un écosystème est naturellement capable de transformer et d'éliminer, en partie ou en totalité, les substances biodégradables qu'il reçoit et d'assurer ainsi le maintien de son équilibre et de la qualité de son environnement. Le seuil critique est celui de sa capacité d'autoépuration, car l'accumulation d'éléments amène une rupture progressive de l'équilibre dynamique naturel du milieu pour atteindre une toxicité, ce qui est la caractéristique d'une pollution. Certains plastiques, métaux et pesticides, ne sont que peu ou pas biodégradables; le processus d'autoépuration est alors inopérant et ces substances s'accumulent dans l'écosystème, intoxiquant les espèces vivantes qui les ingèrent.

Certaines de ces substances, de surcroît, comme les métaux lourds ou les pesticides, s'accumulent dans les organismes, se concentrant dans certains tissus ou organes à des doses parfois bien supérieures à celles mesurées dans le milieu extérieur, selon un phénomène appelé "bioaccumulation". Cette accumulation, qui s'amplifie à chacun des maillons de la chaîne alimentaire, peut prendre parfois une ampleur inquiétante. Un seul exemple: au plus fort de la pollution de *Clear Lake*, en Californie, alors que les taux de résidus de DDT (dichlorodiphényltrichloroéthane, un des premiers pesticides utilisés) atteignaient 0,8 microgramme par litre dans l'eau, il en était trouvé 5 microgrammes par litre dans les algues et le plancton, 100 microgrammes par kilogramme dans les poissons, 5 350 microgrammes par kilogramme dans les muscles des pélicans et des cormorans, et jusqu'à 161 000 microgrammes dans leur graisse. Le rejet de mercure industriel dans une baie de Japon a été suivi du même processus de bioaccumulation, avec des villageois comme ultime maillon de la chaîne alimentaire; des maladies neurologiques et des anomalies congénitales ont ainsi été observées en grand nombre chez ces pêcheurs qui ont été corrélées à l'accumulation de ce métal dans leurs tissus (maladie de Minamata).

Les polluants métalliques peuvent donc s'accumuler dans les êtres vivants en suivant la chaîne alimentaire (figure 1).

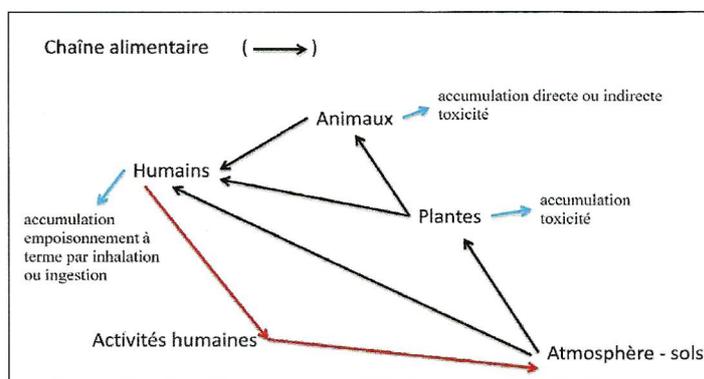


Figure 1: La chaîne alimentaire dans la pollution d'éléments traces métalliques. Les flèches noires indiquent le sens de bioaccumulation des polluants dans la chaîne alimentaire; les flèches rouges montrent l'origine de ces polluants et les flèches bleues indiquent les effets de ces polluants sur les différents maillons de la chaîne alimentaire.

Plus de 20 000 sites suspectés contaminés ont été recensés en France (ADEME, 2005), avec des concentrations importantes de résidus métalliques, métalloïdes et résidus organiques (tableau 1).

| Polluants | Concentrations dans le sol en % |
|---|---------------------------------|
| cadmium | 6,1 |
| nickel | 9,6 |
| zinc | 10,4 |
| arsenic | 12 |
| cuiivre | 14,2 |
| chrome | 15,1 |
| plomb | 17,5 |
| solvants halogénés | 14,4 |
| hydrocarbures aromatiques polycycliques | 17,4 |
| hydrocarbures | 40 |

Tableau 1: Exemple de principaux polluants trouvés dans un sol industriel, seuls ou en mélange (source Basol, juin 2006, AFSSET)

Il existe aussi des pollutions d'origine naturelle, non associées aux activités humaines, mais qui peuvent accroître les effets de ces dernières. Il peut s'agir de l'héritage de la roche mère, de cycle bio-géochimique, de transferts pédologiques verticaux ou latéraux, de poussières ou aérosols, d'apports agricoles qui peuvent être diffus et d'origine lointaine, d'apports massifs d'origine proche, de transferts latéraux de particules par ruissellement de surface.

GENOTOXICITE ET ALTERATIONS CHROMOSOMIQUES

Les métaux lourds peuvent avoir des effets génotoxiques pouvant se traduire, entre autre, par des perturbations de l'organisation nucléaire facilement observables dans les cellules. Pour déterminer une toxicité systémique générale, la génotoxicité potentielle d'une substance doit être évaluée à l'aide d'une gamme de tests adéquats *in vitro* et, si nécessaire, *in vivo*. Pour déterminer de manière détaillée la génotoxicité potentielle d'une substance, il est nécessaire de disposer d'informations relatives à la capacité d'induire des mutations génétiques, des anomalies de la structure chromosomique et une aneuploïdie. Un petit nombre d'essais *in vitro* est généralement choisi pour couvrir différents indicateurs d'effets génétiques.

Un test de mutation génétique sur bactéries et un ou deux tests sur cellules mammaliennes visant à détecter les points de mutations ou les mutations chromosomiques (clastogénicité/aneugénicité) sont les tests les plus fréquemment utilisés.

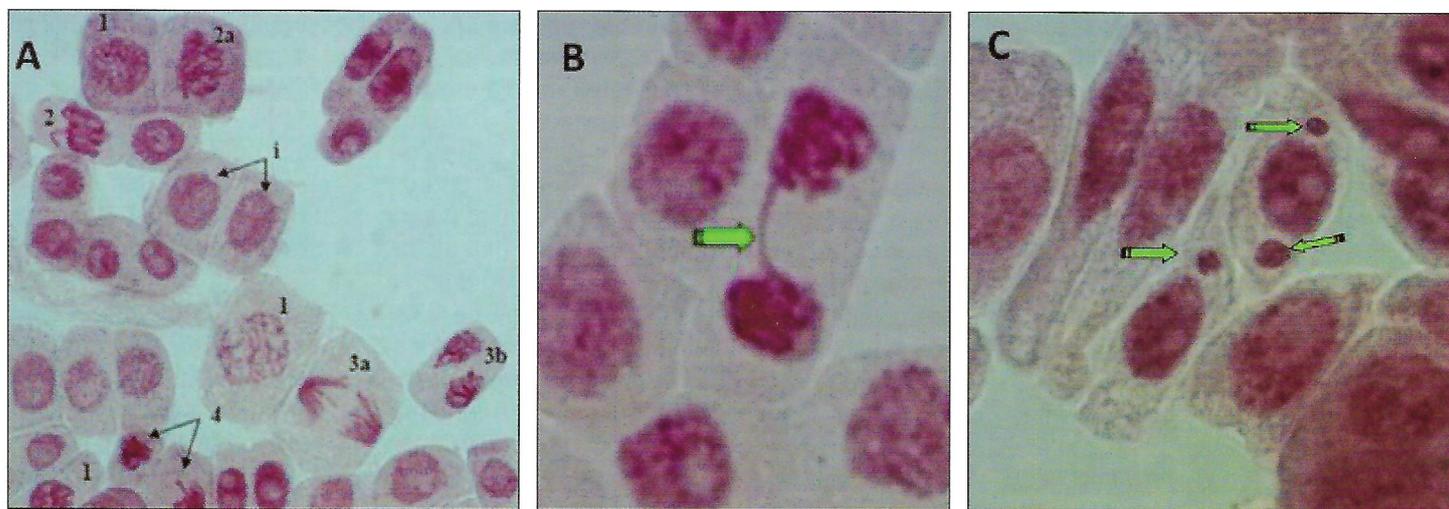


Figure 2 : Observation de cellules méristématiques de racines de fèves (*Vicia faba*).

A. Différents stades de division cellulaire; i : interphase, 1 : prophase, 2a : début de métaphase, 2 : métaphase, 3a : anaphase, 3b : fin d'anaphase, 4 : télophase.

B. Induction d'un pont anaphasique (flèche) après 48 h d'exposition à des concentrations de 50µM de chlorure de cadmium.

C. Formation de micronoyaux (flèches) traitées par 50 µM de chlorure de cadmium pendant 24 heures. (Souguir, 2009)

Un test souvent utilisé en écotoxicologie est le « test des micronoyaux », développé sur le modèle *Vicia faba*, la fève. Il consiste à dénombrer le nombre de cellules contenant de petits noyaux surnuméraires dans leur cytoplasme ; ces micronoyaux proviennent d'une séparation de chromosomes au cours d'une division cellulaire (mitose) anormale. Ces mitoses sont observées dans des tissus en division appelés méristèmes (figure 2A).

Nous avons montré (Souguir et al, 2009) qu'une exposition aux sels de nombreux éléments métalliques, comme le cadmium ou le cuivre, induisait l'apparition de micronoyaux et de divers type d'aberrations nucléaires.

La fève est une plante modèle du fait de sa sensibilité aux polluants du sol. Il est ainsi possible d'observer, en culture hydroponique, en laboratoire, la présence d'altérations des figures de divisions cellulaires dans les méristèmes des extrémités racinaires de fèves traitées par du chlorure de cadmium, comme, par exemple, des ponts chromosomiques entre les masses chromosomiques séparées (figure 2B), ou des chromosomes isolés qui seront à l'origine de micronoyaux.

Ainsi, à la suite du traitement des plantes, il est possible d'observer, dans des cellules en non division, la présence de petits globules cellulaires contenant du matériel génétique, appelés micronoyaux (figure 2C). Ils correspondent à la formation de structures nucléaires autour de chromosomes, ou de fragments, isolés provenant de mitoses anormales (Souguir et al, 2009).

Il est ainsi mis en évidence, sur des plantules de fèves traitées par le cadmium, des phénomènes de clastogénicité (aberrations chromosomiques), d'aneugénicité (chromosome isolé), de micronoyaux (petits noyaux surnuméraires), de SCE (« sister chromatid exchange », échanges de fragments chromosomiques) et de mutations.

Il faut noter que pour un même traitement par des sels de métaux lourds, le nombre d'anomalies chromosomiques observées varie selon l'espèce végétale. Ainsi le pois (*Pisum sativum*) présente de 5 à 30 fois moins de micronoyaux que la fève (*Vicia faba*), pour un même traitement, alors que ces deux plantes appartiennent à la même famille des Fabacées. L'observation d'une génotoxicité et d'altérations

chromosomiques est le signe précurseur d'anomalies d'expression de gènes dans les cellules touchées. Cependant, la présence d'événements de génotoxicité sur des plantes n'est qu'un indicateur qualitatif des caractéristiques de toxicité d'un polluant ; il ne permet pas une extrapolation sur les effets induits chez un être vivant d'une autre espèce. Ainsi pour une extrapolation sur la santé humaine, il faut tester ces effets sur des cellules en culture, en même temps que des observations cliniques de personnes qui ont été en contact prolongé avec ces éléments.

Afin de déterminer si un composant est génotoxique ou ne l'est pas, les données disponibles doivent être évaluées globalement. Des résultats entièrement négatifs obtenus par une batterie de tests *in vitro* suffisent normalement pour conclure qu'une substance est dénuée d'un potentiel génotoxique, sauf s'il faut tenir compte de circonstances particulières préoccupantes (niveau d'exposition humaine élevé ou soutenu, considérations structurelles, par exemple). Réciproquement, un ou plusieurs tests *in vitro* positifs nécessitent habituellement un suivi à l'aide d'un essai de génotoxicité *in vivo*. Les résultats des essais de génotoxicité peuvent être alors rapprochés des résultats expérimentaux tirés des essais de carcinogénicité chez les rongeurs. Des études de génotoxicité positive renseignent bien sur le mécanisme d'action des substances carcinogènes et influent sur l'approche utilisée lors de la caractérisation ultérieure des risques.

Ces polluants métalliques, présents dans les sols, sont des facteurs de stress pour les plantes qui vont ainsi réduire leur croissance et produire des molécules de défense, comme par exemple des polyphénols.

La toxicité métallique induit une modification de l'activité ou de la synthèse de nombreuses protéines impliquées dans des fonctions physiologiques vitales ou dans le contrôle de l'homéostasie cellulaire. De grands groupes de protéines impliquées dans la réponse au stress sont connus (HSP, enzymes de système antioxydatif ...). Un stress métallique en provoquant une surexpression ou/et une sous-expression de polypeptides particuliers, peut conduire à des profils polypeptidiques spécifiques et la caractérisation de biomarqueurs de contaminations ; cependant peu de marqueurs spécifiques ont été actuellement déterminés.

Les éléments métalliques sont reconnus par des récepteurs des membranes cellulaires végétales (figure 3) ; ce sont souvent des récepteurs communs à d'autres éléments dont l'absorption est essentielle pour la plante. A la suite de cette reconnaissance cellulaire, des modifications quantitatives et qualitatives, notamment de lipides et d'enzymes membranaires, sont observées. Il y a production d'espèces actives d'oxygène (ROS) qui participent aussi à ces modifications. Cela déclenche une cascade d'événements qui aboutissent à des modifications métaboliques cellulaires et conduisent à l'expression de gènes spécifiques, en particulier, des réactions de défense.

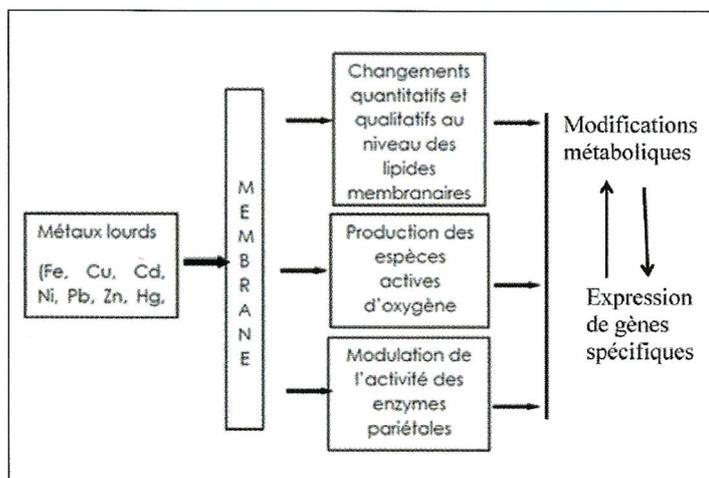


Figure 3: Mécanismes cellulaires de réponses des plantes aux métaux lourds.

Les altérations biologiques entraînent un effet sur la croissance et le développement avec une possible répercussion sur le succès reproducteur des êtres vivants. Des perturbations graves du matériel génétique cellulaire amènent des conséquences cancérigènes. Pour l'extrapolation aux animaux et aux humains, il faut aussi tenir compte de la nécessité de procéder à des tests de toxicité aiguë. Certaines substances (certains métaux, mycotoxines, résidus de médicaments vétérinaires, résidus de pesticides, par exemple) peuvent provoquer une intoxication aiguë après de courtes périodes d'ingestion chez les humains. Lors des évaluations il faut inclure une évaluation des effets aigus sur des individus sensibles.

LA PHYTORESTAURATION OU PHYTOREHABILITATION DES SOLS

Il y a un danger pour l'homme de contamination directe, ou indirecte à partir de sols pollués (eaux de ruissellement par exemple), et cette pollution peut empêcher le développement de la végétation. La phytorestauration est la dépollution des sols par les plantes, afin de réduire, de dégrader, d'enlever ou d'immobiliser un élément toxique dans le sol. Cela inclut l'utilisation de la microflore associée, des amendements et des techniques agricoles. Elle comprend des processus de phytoextraction, phytostabilisation, phytodégradation et phytoremédiation.

Dès l'antiquité chez les Grecs et les Romains, et en Chine depuis plusieurs siècles, l'utilisation des plantes pour traiter la pollution apparaît de façon concomitante avec les premières villes. En 1871, après les premières études scientifiques sur la dégradation des polluants des eaux usées par les cultures agricoles, la ville de Paris met en service un

hectare de "jardin modèle" ouvert au public pour convaincre les cultivateurs de la plaine de Gennevilliers des vertus fertilisantes de ces eaux d'égouts. Petit à petit, la Ville de Paris y consacre 5 100 ha. En 1875, un système d'épandage est mis en œuvre à Moscou et autour de Berlin sur plus de 25000 ha. Au début du 20^{ème} siècle, la ville de San Antonio (Texas) construit une lagune de 200 ha, marquant ainsi les débuts de la technique des "zones humides construites" (« constructed wetlands »). Peu après, la ville de Munich réalise une lagune de 233 ha. En 1912, la première zone humide pour l'épuration de l'eau usée naît près de Concord River à Lexington (Massachusetts). Au 20^{ème} siècle, la technique se perfectionne en Amérique du Nord et en Allemagne. Depuis les années 90, la phytoremédiation pour le traitement de l'eau par le biais de zones humides est en plein développement à travers le monde.

Le procédé de phytoremédiation utilise certaines plantes possédant la capacité de fixer, dans leurs cellules, les métaux lourds par la production d'enzymes qui les dégradent en produits moins toxiques ou dépourvus de toxicité.

Il y a plusieurs possibilités de réhabiliter des sols par les plantes (figure 4) :

- La phytoextraction des polluants du sol, qui peut être suivie par une accumulation dans des tissus spécifiques (phytoaccumulation) ou par une émission dans l'atmosphère (phytovolatilisation) ; dans ce dernier cas, la pollution n'est que déplacée, même s'il peut en résulter une dilution plus grande du polluant.
- La phytodégradation des polluants dans les tissus de la plante par un métabolisme spécifique, ou bien à l'extérieur des racines, avec, éventuellement, l'aide de microorganismes du sol présents dans la sphère racinaire (rhizodégradation).
- La phytostabilisation du polluant dans les sols par le couvert végétal, en relation avec la texture du sol ; l'élément contaminant devient peu ou pas disponible pour une dissémination dans l'environnement, mais reste présent dans le sol (séquestration).
- La phytoaccumulation n'a d'intérêt que si le tissu de stockage peut être récolté et utilisé par l'industrie pour le recyclage de l'élément polluant, notamment dans le cas d'éléments minéraux (métaux ou métalloïdes), ou si le contaminant est métabolisé par la plante pour donner un produit dérivé peu ou pas toxique pour l'environnement (changements de forme chimique pour les métaux et métalloïdes, biodégradation des pesticides).

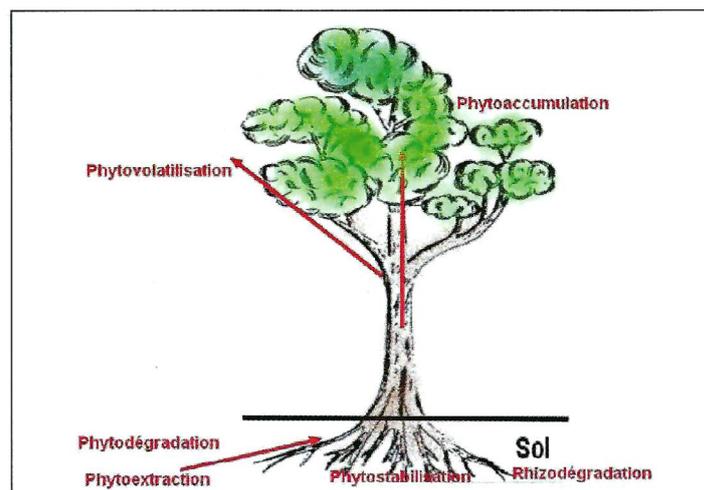


Figure 4 : Les différents processus de phytoremédiation des sols.

Les espèces végétales vont présenter différentes cinétiques d'absorption des polluants métalliques en fonction de leur concentration dans le sol (figure 5) :

- L'hyperaccumulation montre une absorption rapide de l'élément ; c'est retrouvé dans le tabouret calaminaire (*Thlaspi caerulescens*, pour le cadmium), et l'alysson (*Alyssum bertolonii*, pour le nickel). Par exemple, l'arbre *Sebertia acuminata*, de Nouvelle Calédonie, peut accumuler jusqu'à 25% de nickel dans sa sève à latex bleu.

- Les plantes qui accumulent modérément un polluant ; il s'agit, par exemple, du ray-grass (*Lolium perenne*) et du maïs (*Zea mays*).

- Les plantes indicatrices qui absorbent l'élément polluant proportionnellement à sa concentration, permettant ainsi une évaluation de la concentration dans le sol ; c'est le cas du datura trompette ou herbe à sitarane (*Datura innoxia*). Il faut noter que les catégories précédentes peuvent aussi être indicatrices dans une certaine gamme de concentration du polluant.

- L'exclusion qui correspond à des plantes qui excluent l'absorption de l'élément considéré et ne l'accumulent qu'à partir d'une concentration donnée ; ce sont, notamment, le silène enflé (*Silene vulgaris*) et la biscutelle (*Biscutella laevigata*).

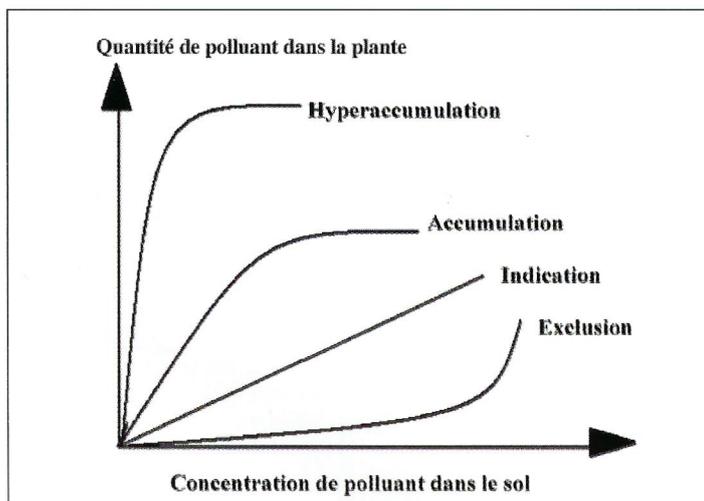


Figure 5: Les différents processus d'absorption des polluants, notamment des éléments traces métalliques, par les espèces végétales.

Les plantes sont sélectionnées en fonction du polluant à transformer. Les plantes dites hyperaccumulatrices, stockent le polluant dans leur tige et leurs feuilles. Les plantes sont ensuite arrachées et incinérées, permettant la récupération du métal en vue de sa réutilisation (recyclage). C'est une méthode de dépollution peu destructrice car elle fait intervenir des végétaux et conserve l'état naturel de l'environnement. Les plantes hyper-accumulatrices peuvent être utilisées pour valoriser économiquement les métaux extraits, ce qui peut être le fondement d'une activité minière (tableau 2). Les lignes grisées correspondent à des extractions rentables. L'avantage majeur de cette méthode est son innocuité environnementale, comparativement à l'extraction minière traditionnelle. Cette méthode permet la réutilisation du sol pour l'agriculture. En effet, les sols riches en métaux sont toxiques pour la plupart des plantes. L'extraction de ces métaux permet la colonisation du sol après la fin du fonctionnement des « phytomines ». Cet avantage environnemental permet d'envisager l'utilisation de cette technique dans des zones où il n'est pas envisageable de creuser une galerie ou une mine à ciel ouvert. Elle peut également permettre l'implantation de nouvelles zones d'extraction, voire la poursuite de l'activité minière quand elle était devenue impossible à cause d'une pollution excessive.

Le deuxième grand avantage de la "phytomine" est dû au principe même de l'extraction : les racines des plantes hyperaccumulatrices prospectent un très grand volume de sol. Elles sont en outre aptes à mobiliser des métaux présents en très faibles concentrations (peu exploitables par les méthodes traditionnelles).

LES BIOINDICATEURS

Les végétaux supérieurs peuvent être des bioindicateurs d'impact qui sont montrés dans des études phytosociologiques. L'analyse phytosociologique des crassiers métallurgiques montre que la présence de métaux lourds ne limite pas la colonisation et la dynamique végétale. Cependant, bien que les espèces rencontrées soient en général assez communes, leurs associations sont inhabituelles. Les sols étudiés ont donc un impact visible sur la structure des communautés végétales.

| Élément | Plante utilisée | Concentration (g/g Matière sèche) | Rendement (TMatière sèche/Ha) |
|-----------|---------------------------------|-----------------------------------|-------------------------------|
| Thallium | <i>Iberis intermedia</i> | $3,07 \cdot 10^{-3}$ | 8 |
| Manganèse | <i>Macadamia neurophylla</i> | $55 \cdot 10^{-3}$ | 30 |
| Cobalt | <i>Haumaniastrum robertii</i> | $10,2 \cdot 10^{-3}$ | 4 |
| Nickel | <i>Berkheya coddii</i> | $17 \cdot 10^{-3}$ | 18 |
| Nickel | <i>Alyssum bertolonii</i> | $13,4 \cdot 10^{-3}$ | 9 |
| Cuivre | <i>Haumaniastrum katangense</i> | $8,356 \cdot 10^{-3}$ | 5 |
| Zinc | <i>Thlaspi calaminare</i> | $10 \cdot 10^{-3}$ | 4 |
| Cadmium | <i>Thlaspi caerulescens</i> | $3 \cdot 10^{-3}$ | 4 |
| Uranium | <i>Atriplex confertifolia</i> | $0,1 \cdot 10^{-3}$ | 10 |
| Plomb | <i>Thlaspi rotundifolium</i> | $8,2 \cdot 10^{-3}$ | 4 |
| Sélénium | <i>Astragalus pattersoni</i> | | |

Tableau 2 : Utilisation des plantes hyper-accumulatrices pour valoriser économiquement les métaux extraits est le fondement d'une activité minière. Les lignes grisées correspondent à des extractions rentables (<http://taste.versailles.inra.fr/inapg/phytoremed/index.htm>)

CONCLUSION

Des solutions peuvent être apportées aux pollutions apportées par des éléments chimiques. Cependant des problèmes ponctuels peuvent apparaître du fait d'une large dissémination des polluants (utilisation du mercure pour la recherche de l'or ou les plombs de chasse, par exemple) ; l'élimination de certaines pollutions peut en engendrer d'autres, comme par exemple le traitement de pollutions d'hydrocarbures dans les mers par des agents dispersants.

Enfin, il existe d'autres pollutions que chimiques. Elles peuvent être biologiques par la dissémination d'agents pathogènes. Elles sont aussi physiques par l'extension de l'utilisation de radiofréquences et la création de champs électromagnétiques multiples dans notre environnement immédiat.

La recherche et l'innovation doivent apporter leur concours à la préservation et à la mise en valeur de l'environnement, encore faut-il qu'il y ait une réelle volonté de la part de la société de connaître les problèmes et d'informer sur les risques potentiels, afin d'élaborer des règles de vie et de trouver des solutions acceptables par tous.

REFERENCES

- *ADEME, Agence gouvernementale de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie (<http://www.ademe.fr>)
- *MATE Ministère de l'aménagement du territoire et de l'Environnement (<http://www.ecologie.gouv.fr>)
- *CITEPA Centre interprofessionnel technique des études de la pollution atmosphérique (<http://www.citepa.org/pollution/sources.htm>)
- *BASIAS Base de données des anciens sites industriels et activités de service (<http://www.basias.brgm.fr>)
- *BASOL Base de données sur les sols et sites pollués (<http://www.basol.environnement.gouv.fr>)
- *Brooks R., Chambers M., Nicks L. and Robinson B. H. Phytomining, *Trends in plant science*, 3, 9 (1998) 359-362.
- *Ledoigt G., Griffaut B., Debiton E., Vian C., Mustel A., Evray G., Maurizis J.C., Madelmont J.C. Analysis of secreted protease inhibitors after water stress in potato tubers. *International Journal of Biological Macromolecules* 38 (2006) 268-271
- *Souguir D., Ferjani E., Ledoigt G., Goupil P. Exposure of *Vicia faba* and *Pisum sativum* to copper-induced genotoxicity. *Protoplasma* (2008) 233:203-207.
- *Wiszniewski J., Ter Halle A., Richard C., Hitmi A., Ledoigt G. Physiological response of Maize (*Zea mays*) and White mustard (*Sinapis alba*) to sulcotriene and its main photoproduct. *Chemosphere* 74,9 (2008) 1224-1230.
- *Roux D., Faure C., Bonnet P., Girard S., Ledoigt G., Davies E., Gendraud M., Paladian F., Vian A. A possible role for extra-cellular ATP in plant responses to high frequency, low amplitude EMF. *Plant Signaling and Behavior* 3, 6 (2008) 383-385.
- *Roux D., Vian A., Girard S., Bonnet P., Paladian F., Davies E., Ledoigt G. High frequency (900 MHz) low amplitude (5 V m⁻¹) electromagnetic field: a genuine environmental stimulus that affects transcription, translation, calcium and energy charge in tomato. *Planta*, 227, 4 (2008) 883-891. Faculty of 1000 Biology : evaluations for Roux D. et al *Planta* 227, 4 (2008) 883-91. <http://www.f1000biology.com/article/id/1099195/evaluation>
- *Ter Halle A., Wiszniewski J., Hitmi A., Ledoigt G., Bonnemoy F., Bonnet J.L., Bohatier J., Richard C. Photolysis of the herbicide sulcotriene: formation of a major photoproduct and its toxicity evaluation. *Pest Management Sciences* 65 (2009) 14-18.
- *Vernay P., Gauthier-Moussard C., Jean L., Bordas F., Faure O., Ledoigt G., Hitmi A. Effect of chromium species on phytochemical and physiological parameters in *Datura innoxia*. *Chemosphere* 72 (2008) 763-771
- *Duquesnoy I., Goupil P., Nadaud I., Branlard G., Piquet-Pissaloux A., Ledoigt G. Identification of *Agrostis tenuis* leaf proteins in response to As(V) and As(III) induced stress using a proteomics approach. *Plant Science* 176 (2009) 206-213.
- *Souguir D., Ferjani E., Ledoigt G., Goupil P. Exposure of *Vicia faba* and *Pisum sativum* to copper induced genotoxicity. *Protoplasma* 233 (2008) 203-207
- *Goupil P., Souguir D., Ferjani E., Faure O., Hitmi A., Ledoigt G. Expression of stress-related genes in tomato plants exposed to arsenic and chromium in nutrient solution. *Journal of Plant Physiology* 166, 13 (2009), 1446-1452.
- *Ledoigt G., Chevalier K., Debiton E., Griffaut B. Secretion of Specific Cytotoxic Products by Plant Storage Organs after Wound-Desiccation Stress. *Plant Stress* 3, 1 (2009) 26-32.
- *Souguir D., Goupil P., Ferjani E., Ledoigt G. Effets génotoxiques du Cuivre chez *Vicia faba* et *Pisum sativum*. *EGS, Étude et Gestion des Sols*, 16, 3/4, (2009) 339-347.
- *Eyheraguibel B., Richard C., Ledoigt G., Ter Halle A. **Photoprotection by plant extracts: a new ecological means to reduce pesticide photodegradation.** *Journal of Agricultural and Food Chemistry* (2010) 58 (17) 9692-9696.
- *Duquesnoy I., Champeau G.M., Evray G., Ledoigt G., Piquet-Pissaloux A. Enzymatic adaptations to arsenic-induced oxidative stress in *Zea mays* and genotoxic effect of arsenic in root tips of *Vicia faba* and *Zea mays*. *C. R. Biologies* (2010), doi:10.1016/j.crvi.2010.07.004 (sous presse).

*BREVETS :

- « Formulation phytosanitaire » PCT/IB2008/001007; « Phytosanitary formulations containing plant extracts as photoprotectants for pesticides » PCT Int. Appl 2008 WO 2008090476 (inventeurs A. Ter Halle, C. Richard, G. Ledoigt), CNRS-université Blaise-Pascal.
- « Utilisation d'un extrait naturel de marc de raisin pour stimuler les défenses naturelles des plantes ». Demande de brevet française n° 10 55397 déposée le 2 juillet 2010 au nom du CNRS, de l'université Blaise-Pascal et de l'INRA (inventeurs C. Richard, A. Ter Halle, P. Goupil, G. Ledoigt, B. Eyheraguibel, D. Thiery).
- *Souguir Dalila. "Modulation de l'expression des gènes de *Vicia faba* cultivées en présence de cadmium, et corrélation entre la génotoxicité et le stress oxydatif induits par ce polluant". Doctorats de l'université Blaise-Pascal, Clermont-Fd et de l'université du 7 novembre-Carthage (Tunisie), 26 juin 2009.
- *Duquesnoy Isabelle. "Etude agrophysiologique, biochimique, protéomique de l'impact de l'arsenic inorganique pentoxyde et trioxyde chez 4 espèces végétales". Doctorat de l'université Blaise-Pascal, Clermont-Fd. 10 novembre 2009
- *Roux David. "Événements moléculaires chez *Lycopersicon esculentum* après exposition à des rayonnements électromagnétiques non ionisant". Doctorat de l'université Blaise-Pascal, Clermont-Fd. 11 avril 2008

LE FOUR A MICRO-ONDES



JEAN CHANDEZON,
docteur es sciences,
professeur émérite de
l'Université Blaise Pascal,
vice-président de l'Adasta



ROLAND FUSTIER,
professeur retraité
de sciences physiques,
ancien formateur Iufm
et président académique de l'UdPPC

et la collaboration de Philippe Choisel

INTRODUCTION

Actuellement, dans pratiquement tous les foyers, on trouve un four à micro-ondes. Alors qu'il est toujours accompagné d'un joli livre de recettes il est très peu utilisé pour cuire mais presque uniquement pour réchauffer et parfois pour décongeler. Cela est dû au fait que la cuisson au micro-ondes est très différente de la cuisson classique et qu'elle est, par ignorance de quelques principes de base, rarement bien maîtrisée.

Contrairement à un four classique le micro-ondes ne possède pas de réglage de la température et donc pas de thermostat, les seuls réglages existants sont celui de la puissance et du temps de fonctionnement qu'il faut régler en aveugle en fonction de sa propre expérience ou des indications du fabricant. Dans un four classique la cuisson se fait par conduction à partir de la surface, les paramètres sont la température du four et la durée qui dépend assez peu du poids de l'aliment à cuire. La surface de l'aliment est plus chaude que l'intérieur, pour un rôti il y a brunissement, le rôti est cuit lorsque la chaleur a atteint l'intérieur. Dans un four micro-ondes, la cuisson se fait directement en profondeur sans que la conduction ait eu le temps d'agir, le temps de cuisson dépend étroitement du poids de l'aliment, la surface est souvent moins cuite que l'intérieur, un rôti cuit au micro-ondes est de couleur pâle et n'est pas appétissant, c'est pour éviter cela qu'on dispose souvent d'un gril et de plats brunisseurs.

Tous les aliments n'absorbent pas les ondes électromagnétiques de la même façon c'est pourquoi il est déconseillé de faire cuire en même temps différentes sortes d'aliments, certains seront trop cuits d'autres pas assez.

Pour les esprits curieux le micro-ondes en cuisine est une source inépuisable d'expériences captivantes où la science rejoint la vie quotidienne et, pourquoi pas, la gastronomie.

LE FONCTIONNEMENT DU FOUR À MICRO-ONDES

Dans un four à micro-ondes la source de chaleur est une onde électromagnétique centimétrique qui est directement convertie en chaleur dans l'aliment à cuire.

LES ONDES ÉLECTROMAGNÉTIQUES

Les charges électriques au repos créent un champ électrique, c'est le domaine de l'électrostatique. Les charges électriques en mouvement uniforme constituent un courant électrique continu qui donne naissance à un champ magnétique, c'est le domaine de l'électrocinétique. Si les charges sont animées d'un mouvement périodique elles donnent alors naissance à des ondes électromagnétiques, mélange de champ électrique et magnétique.

Les ondes électromagnétiques se propagent dans l'air à la vitesse de 300 000 km/s c'est-à-dire pratiquement un million de fois plus vite que le son qui ne fait que 340 m/s ; pendant que le son parcourt 1 mm la lumière a parcouru 1 km. Si le courant oscille à une fréquence de 300 000 Hz l'onde électromagnétique a parcouru 1 km, c'est ce qui s'appelle la longueur d'onde qui est notée en physique avec la lettre grecque λ . La fréquence, anciennement mesurée en

cycles/seconde, utilise actuellement comme unité le hertz, noté Hz, qui correspond à un cycle par seconde. Selon la fréquence, les ondes électromagnétiques possèdent des propriétés différentes et des utilisations variées. Très schématiquement on peut faire la classification suivante :

- Les grandes ondes, kilométriques : $f = 30$ à 300 kHz ($\lambda = 10$ km à 1 km), utilisées pour la radio diffusion en modulation d'amplitude comme France Inter grandes ondes.

- Les ondes moyennes, hectométriques, $f = 300$ kHz à 3 MHz ($\lambda = 1$ km à 100 m), utilisées pour la radio diffusion en modulation d'amplitude ondes moyennes.

- Les ondes courtes décamétriques, $f = 3$ à 30 MHz ($\lambda = 100$ à 10 m), utilisées pour les liaisons longue distance et par les radioamateurs.

- Les VHF (Very High Frequency), $f = 30$ à 300 MHz ($\lambda = 10$ à 1 m) ondes métriques, utilisées pour la radiodiffusion en modulation de fréquence et la télévision terrestre.

- Les UHF (Ultra High Frequency), $f = 300$ MHz à 3 GHz ($\lambda = 1$ m à 10 cm) ondes décimétriques, utilisées pour la télévision terrestre et la téléphonie mobile.

- Les ondes centimétriques, $f = 3$ à 30 GHz ($\lambda = 10$ à 1 cm), utilisées pour les radars, les fours à micro-ondes, le Wifi...

- On trouve ensuite les ondes millimétriques puis l'infrarouge et le visible qui ont des utilisations très diverses.

Afin d'éviter les problèmes d'interférences, l'utilisation des différentes fréquences est très réglementée, c'est un organisme international, l'UIT (Union International des Télécommunications) qui est chargé de gérer les fréquences.

La fréquence qui a été allouée aux fours à micro-ondes est $f = 2,45$ GHz ce qui correspond à une longueur d'onde $\lambda = 12,2$ cm. Cette fréquence est également utilisée pour les liaisons domestiques wifi entre sa « box » et son ordinateur personnel. C'est pour cette raison que les fours à micro-ondes en fonctionnement peuvent perturber ces liaisons.

LE FOUR À MICRO-ONDES

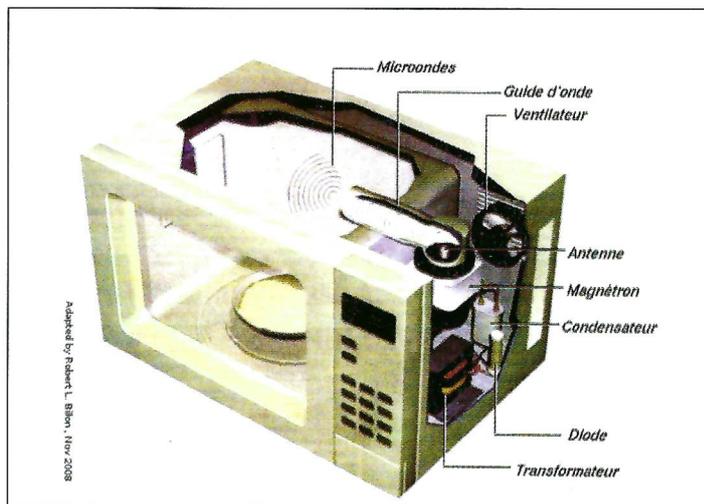


Fig. 1

Les principaux composants d'un four à micro-ondes sont les suivants :

- Le magnétron qui produit les ondes électromagnétiques
- L'alimentation électrique du magnétron fournissant quelques kV, elle est mise en route par l'intermédiaire d'un relais.
- Un système de commande pour régler le temps et la puissance
- Le système de ventilation pour refroidir l'alimentation et le magnétron, plus de la moitié de la puissance consommée est dissipée en chaleur
- Un guide d'ondes couplant la cavité du four avec le magnétron
- La cavité du four où l'on place les aliments à cuire, en général équipée d'un plateau tournant.

LE FONCTIONNEMENT DU MAGNÉTRON

Le magnétron est la pièce maîtresse du four à micro-ondes c'est la source du rayonnement électromagnétique. C'est un tube à vide dans lequel, au lieu de faire osciller des charges dans un fil électrique, on produit directement les ondes en faisant tourner des électrons dans une enceinte vide sur une orbite de quelques centimètres de diamètre. C'est ce mouvement périodique qui produit les ondes centimétriques.

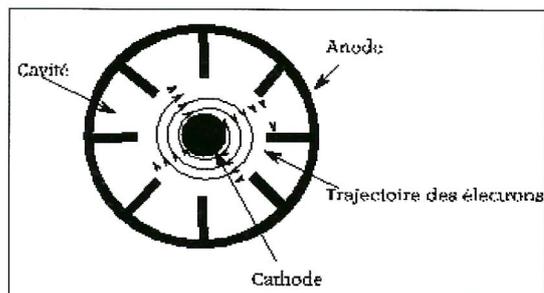


Fig. 2 : coupe du magnétron

Le cœur du magnétron (figures 2 et 3) est une enceinte cylindrique métallique vide d'air servant d'anode avec, au centre, une cathode métallique cylindrique coaxiale à chauffage direct. Entre l'anode et la cathode il y a une tension continue de quelques kV (entre 1000 et 4000 V). Cette tension accélère les électrons produits par la cathode. Pour les faire tourner en spirale on place la cavité entre deux aimants permanents de forme torique qui créent, dans la cavité, un champ magnétique constant parallèle à l'axe. On place des ailettes radiales qui constituent des cavités secondaires permettant l'oscillation du dispositif. Le tout est complété par une antenne qui extrait les micro-ondes qui sont ensuite conduites dans l'enceinte du four par un guide d'ondes, tube métallique à section rectangulaire. Le magnétron est inclus dans un boîtier muni d'ailettes (figure 4) permettant, avec l'aide d'un ventilateur, le refroidissement du dispositif.

Le magnétron a été mis au point un peu avant la seconde guerre mondiale, il fournit assez facilement, avec de fortes puissances, et à peu de frais, des ondes électromagnétiques centimétriques. Il a permis aux alliés de disposer de radars efficaces qui ont joué un rôle important pendant la guerre. La légende dit que les opérateurs radar se sont rendu compte qu'ils pouvaient réchauffer la nourriture en la plaçant dans le faisceau radar ce qui fait que le radar serait l'ancêtre du four à micro-ondes.

LA CAVITÉ DU FOUR

La cavité du four lui-même dans laquelle on place les aliments est une enceinte métallique parallélépipédique de quelques dizaines de centimètres de côté, elle se comporte comme une cavité qui emprisonne les ondes, dans laquelle, en raison du phénomène d'interférences, il y a ce que le physicien appelle des nœuds et des ventres de champ c'est-à-dire des maxima et des minima de puissance disponible. Pour minimiser ce phénomène qui empêche une cuisson uniforme

on place en général les aliments sur un plateau tournant en espérant que tous les points cuiront de la même manière. Les parois du four restent froides car elles réfléchissent seulement les ondes sans les absorber.

LA PORTE DU FOUR

La porte est munie d'un écran métallique percé de trous de petit diamètre de telle manière que cela, par le même phénomène que la cage de Faraday, empêche les ondes de passer tout en permettant de voir à l'intérieur. En effet une onde électromagnétique ne peut pas se propager dans un tuyau plus petit que la demi longueur d'onde, c'est pour cela que les stations radio grandes ondes sont immédiatement bloquées dans un tunnel alors que les radio FM pour lesquelles la longueur d'onde est de l'ordre du mètre sont captées plus profondément et que le portable peut éventuellement capter dans le métro.

Pour rendre le four hermétique on munit la porte d'un joint qui complète l'étanchéité. Malgré tout, il y a toujours un peu d'ondes qui passent à l'extérieur mais avec un très bas niveau ce qui ne présente pas de danger sauf, peut-être, si l'on reste tout le temps le visage collé à la porte du four. A noter que par mesure de sécurité le magnétron s'éteint dès que la porte du four s'ouvre.

LE BRUIT DU MICRO-ONDES

Le bruit que l'on entend lorsque le four fonctionne est celui du ventilateur indispensable pour refroidir le magnétron qui dissipe une quantité de chaleur supérieure à celle disponible pour faire cuire les aliments. Il faut éviter de faire fonctionner le four à vide car c'est alors le magnétron qui dissipe toute l'énergie ce qui peut lui être fatal. A cela s'ajoute, lors de la mise en route du magnétron, le « clap » caractéristique du relais servant à mettre l'alimentation sous tension.

CE QU'IL NE FAUT PAS FAIRE

Sauf ceux conçus à cet effet, il ne faut pas mettre de récipients et objets métalliques dans un four à micro-ondes. Et cela pour deux raisons distinctes : si les aliments sont placés dans une barquette en aluminium, comme le métal réfléchit les micro-ondes, il fait écran, le chauffage se fera très mal voire pas du tout. Mais la principale raison est que les objets métalliques concentrent le champ électrique vers les pointes ce qui donne souvent naissance à de grosses étincelles qui peuvent endommager le four et détruire les décorations en or d'une assiette en porcelaine. Cependant, le constructeur fournit en général avec le four des supports métalliques permettant d'utiliser simultanément un gril et les ondes, mais ces accessoires qui ont été spécialement conçus pour cet usage ne présentent pas ce défaut.

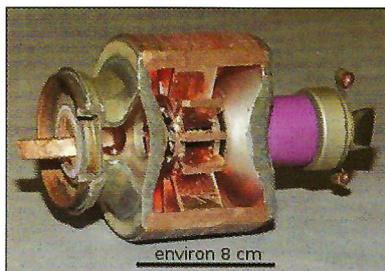
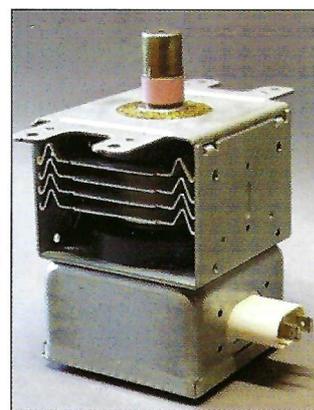


Fig. 3 : vue éclatée du magnétron, on distingue les ailettes et la cathode au centre, les aimants toriques ont été enlevés.

Fig. 4 : le magnétron dans son boîtier, en dessous des ailettes de refroidissement on distingue l'un des aimants toriques.



PETITES EXPÉRIENCES POUR COMPRENDRE LE FONCTIONNEMENT DU FOUR À MICRO-ONDES

Le chauffage traditionnel présente l'inconvénient d'être lent et de n'atteindre que progressivement l'ensemble des produits à chauffer. Des surchauffes se produisent sur les parois du récipient (la nourriture s'attache et se dégrade).

Dans les fours à micro-ondes seuls les contenus des récipients sont chauffés et ceci de façon presque homogène dans tout leur volume. La puissance de chauffe est plus facilement réglable.

Cette démarche d'investigation va nous permettre d'introduire plusieurs concepts

Attention : pour la plupart des expériences proposées la « puissance » du four sera rarement réglée à plus de 300 W afin d'éviter de se brûler et de faire souffrir le matériel (magnétron).

Exp 1 : - placer dans le four un verre et un gobelet plastique - mettre en route pendant 40 secondes sur 300 W - ouvrir la porte, retirer les récipients, constater que l'on ne sent pas la chaleur et que les récipients vides ne s'échauffent pas.

A puissance élevée le verre peut s'échauffer un peu car la silice peut fixer un peu d'eau par liaison hydrogène.

Exp 2 : - un peu d'eau dans un verre - l'eau s'échauffe plus que le récipient et atteint assez rapidement l'ébullition.

Attention : lorsqu'on chauffe le biberon au micro-ondes le lait est plus chaud que le biberon !

Exp 3 : - une biscotte et du pain de mie ou viennois - le pain est chaud contrairement à la biscotte. *Pourquoi ?*

Exp 4 : - une tomate, une pomme et une pomme de terre (à peu près de même taille pour que le volume n'intervienne pas).

- Constater que la tomate est plus chaude que la pomme, elle-même plus chaude que la pomme de terre et **émettre des hypothèses.**

Habituer à faire varier un paramètre à la fois

Influence : de la densité ? de l'état physique ? de la conductivité thermique ? importance de la teneur en eau ?

Exp 5 : - montrer que la température de la pomme augmente lorsqu'on enfonce progressivement la sonde métallique du thermomètre électrique (fig 5).

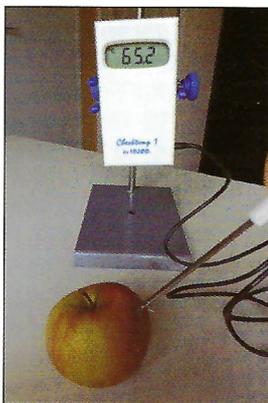


Fig. 5

Exp 6 : - trois récipients en verre identiques contenant la même quantité d'eau, d'huile et de glace (sortie du congélateur ou bien essuyée) [a].

On pourrait prendre d'autres liquides dont les molécules sont polarisées mais les risques ne sont pas négligeables si leur température d'ébullition est trop basse et s'ils sont inflammables.... Une fausse manœuvre mettant en route le gril peut provoquer une explosion !

Le glaçon ne fond pas, l'huile chauffe peu alors que l'eau peut aller jusqu'à bouillir (on peut mesurer la température de l'huile avec le thermomètre électronique à sonde métallique et constater que l'on est loin d'atteindre 100°C).

Exp 7 : - Couper une pomme en deux, une moitié est enveloppée dans un film étirable et l'autre dans du papier aluminium.

Au bout de 2 minutes la première est cuite alors que l'autre est toujours crue.

Exp 8 : - Emballer le poste radio muni d'un écouteur dans le film étirable puis dans feuille aluminium.

Le poste grésille avec l'aluminium et émet peu de son car il reçoit mal les ondes radio.

Les ondes du four se comportent comme la lumière. Elles traversent le film étirable et sont renvoyées par le papier aluminium comme sur un miroir.

On peut montrer par analogie avec la lumière que le faisceau traverse le film étirable et se réfléchit sur le papier aluminium.

Exp 8 bis :

- une règle en plastique frottée est capable de dévier un filet d'eau.

- un aimant tournant au-dessus d'une boussole entraîne la boussole (Fig 6) ;

- la variation du champ magnétique et (ou) du champ électrique met en mouvement la boussole.



Fig. 6

Tentative d'interprétation

Contrairement à celles de l'huile, les molécules d'eau sont polarisées. Les charges électriques ne sont pas réparties uniformément dans les molécules (H_2O) négatives du côté de l'atome d'oxygène et positives du côté des atomes d'hydrogène. [b].

Les ondes (dites électromagnétiques) les soumettent à un champ électrique alternatif qui les retourne dans un sens et dans l'autre. Cette agitation provoque l'augmentation de température.

Remarque : dans un four classique l'agitation des molécules est désordonnée alors que dans le four à micro-ondes les oscillations sont ordonnées.

Certaines réactions chimiques seront plus faciles dans le four à micro-ondes qu'avec d'autres moyens de chauffage, la diminution d'entropie entraînant une diminution de l'énergie d'activation.

N.B. On peut dans l'enseignement utiliser le four à micro-ondes pour le test à la liqueur de Fehling (recherche de sucres) ou la réaction d'estérification pour synthétiser un arôme de banane.

Exp 9 : - Placer dans un verre du polystyrène expansé et dans un autre un bonbon de guimauve (ex : chamallow).

- Le bonbon gonfle mais pas le polystyrène (fig 7a et 7b). L'eau emprisonnée dans le sucre passe à l'état gazeux sous forme de bulles qui se dilatent.



Fig. 7 (avant)



Fig. 7 (après)

Exp 10 : - Chauffage intermittent

- Verre avec eau et verre avec chamallow

Programmer sur décongélation (100 W) nous observons un gonflement [c] et une ébullition par intermittence. Si nous augmentons la puissance le temps de chauffage augmente et à puissance maximale (900W) le chauffage est continu.

En position décongélation (100W) les ondes sont émises environ 7 secondes par minute soit 1/9 du temps de fonctionnement. La puissance est contrôlée en variant le rapport travail/repos assuré par un séquenceur (on parle de modulation par impulsions).

Exp 11 : Zones de chauffage non homogènes.

- Enlever le plateau tournant puis régler sur 200W ou 300W.

- Etaler sur un papier cuisson de la confiture assez liquide ou une guimauve molle (le gruyère râpé peut aussi convenir).

Les zones de cuisson sont bien séparées à intervalles assez réguliers.

Nous avons affaire à des ondes stationnaires. Les ondes émises par le guide d'onde subissent des réflexions sur les parois intérieures du four et interfèrent. Ce phénomène ne peut pas être observé dans les fours munis d'ailettes en face du guide d'onde qui permet d'envoyer les ondes dans toutes les directions, ce dispositif ajouté au plateau tournant permet d'assurer un chauffage plus homogène des aliments.

Pour aller plus loin : on pourrait mesurer la longueur d'onde avec des barres de chocolat ou guimauve (chamallows coupés en deux suivant la longueur et alignés parallèlement au guide d'onde).

La fréquence d'émission étant de 2,45 GHz correspond à une longueur $\lambda = c/f$, c'est à dire 0,127 m. Les zones de chauffage sont d'un peu plus de 6 cm soit une demi-longueur d'onde.

Exp 12 : Allumage d'une lampe à incandescence et d'un tube fluorescent.

Régler à la **puissance minimum** et pour un **temps le plus court possible** :

- le tube incandescent s'allume lorsque les ondes sont émises quand l'eau bout et le chamallow gonfle

- la lampe montée en court-circuit (les 2 bornes de la lampe sont reliées par un fil conducteur) s'allume et grille rapidement (remarque : moins de risque avec un filament épais d'une lampe de grande puissance [d])

- la lampe grillée court-circuitée ou non se rallume à chaque émission de l'onde

Il est recommandé de mettre un récipient rempli d'eau qui absorbera une bonne partie de l'énergie émise et soulagera le magnétron.

Exp 13 : Produire un plasmoïde (source d'ions comme dans la foudre).

Avec une antenne quart d'onde (3 cm) posée sur un disque de 6 cm de diamètre le tout en papier d'aluminium (four réglé presque au maximum) et **toujours avec le verre d'eau** et ne pas prolonger l'expérience). Cela ne marche pas toujours... Mais très facile avec les lampes grillées qui se rallument !!! C'est l'effet de pointe qui apparaît à l'extrémité des supports du filament d'autant plus que leur longueur est proche de 3 ou 6 cm.

Remarque : on comprend pourquoi il ne faut pas laisser d'objets métalliques pointus (fourchette) alors qu'il n'y a pas de risque avec le papier aluminium qui entoure la pomme.

Exp 13 bis : CD posé sur un bocal rempli d'eau.

Nous voyons apparaître des petites décharges électriques et constatons la détérioration de la surface [e] (photo 8).



Fig. 8

Une dernière expérience pour les jeunes : fabrication d'une mousse

5 à 10 bonbons Haribo (ingrédients : sucre, gélatine, acide citrique, colorants, arômes) dans un verre, auxquels on ajoute du jus de citron pour salades, passés au four à micro-ondes jusqu'à dissolution.

Ajouter du bicarbonate de sodium et agiter avec une cuiller... On peut déguster la mousse !

Attention : on trouve sur internet des expériences spectaculaires qui peuvent détériorer le four (exemple la cuisson d'un œuf, d'un gros savon...) : explosion ou décharge électrique et qui n'apportent rien à la compréhension du fonctionnement et à l'introduction de concepts ou modèles de la physique [f].

N.B. on peut se procurer un thermomètre à sonde chez Conrad 59861 LILLE cedex 9 (- 10 à 200 °C) commande possible par internet taper Conrad sur le moteur de recherche.

Pour en savoir plus : la question 39 (pages 60 et 61) de l'ouvrage « La physique au quotidien » publié par le CRDP Auvergne.

NOTES

[a] Les molécules d'eau sont plus liées entre elles dans la glace et seront moins libres de vibrer que dans l'eau liquide.

[b] La fréquence de 2,45 GHz est choisie car elle correspond à une bande d'absorption de l'eau liquide. A une fréquence trop basse l'agitation des molécules n'entraîne pas une élévation de température détectable et une fréquence trop élevée ne laisse pas le temps aux molécules de réagir.

[c] L'eau emprisonnée dans le sucre passe à l'état gazeux et se dilate provoquant le gonflement du chamallow.

[d] Un courant induit très intense apparaît dans le filament torsadé à cause de la très haute fréquence.

[e] Les courants induits dans la couche métallique (alliage d'aluminium et d'argent) vaporisent le métal sous la pellicule d'acrylique anti-UV qui fond. Il se crée de petits îlots qui jouent le rôle d'antennes et sont le siège d'éclairs.

[f] Le pop-corn, les petits pois, les lentilles, l'œuf... ne peuvent pas gonfler comme le chamallow à cause de leur enveloppe rigide et explosent.

ASPECTS CULINAIRES ET MÉTHODES DE CUISSON

Pour pouvoir être consommés de nombreux aliments doivent être cuits. La cuisson se fait par chauffage ce qui transforme leur nature chimique et les rend consommables : par exemple la pomme de terre est complètement immangeable lorsqu'elle est crue.

Pour qu'une pomme de terre soit cuite il faut qu'elle ait été portée dans son ensemble à une température supérieure ou égale à la température d'ébullition de l'eau qui est de 100°C.

A/ LES DIFFÉRENTS MODES DE CUISSON

1/ La cuisson par conduction :

Au four : on place le plat à cuire à l'intérieur de la cavité du four, la température est, en général régulée par un thermostat, la chaleur passe par conduction à l'aliment qui va cuire ; il est cuit lorsqu'il a atteint la bonne température dans son ensemble (plus il est gros plus c'est long). C'est le cas de la cuisson du pain dans le four à bois que le boulanger a fait chauffer au préalable. Si le four est trop chaud les aliments brûlent. Cette cuisson dessèche les aliments qui perdent de l'eau par évaporation.

A l'eau : on fait cuire dans de l'eau bouillante des pommes de terre ou des pâtes par exemple. Plus les aliments à cuire sont gros, plus il faut de temps ; c'est pour cela que, très souvent, on les coupe en morceaux pour faciliter la cuisson.

A la vapeur : l'aliment à cuire est placé dans de la vapeur d'eau.

A la poêle ou à la casserole : les aliments à cuire sont placés dans la poêle avec un liquide qui sert à transmettre la chaleur si c'est de l'eau ou à frire si c'est une graisse.

En friture : on fait cuire dans un bain d'huile qui est à 160°, les aliments sont coupés en morceaux pour que la température de cuisson atteigne rapidement le cœur.

2/ La cuisson par rayonnement : au gril et au barbecue

La source de chaleur, souvent un gril, est portée à haute température : au rouge, elle émet un rayonnement électromagnétique infrarouge qui chauffe en surface l'aliment à cuire ; avec le temps, par conduction, la chaleur se répand à l'intérieur qui finit par cuire en profondeur. La surface est grillée, parfois brûlée, et l'intérieur moins cuit.

3/ La cuisson par micro-ondes

Il n'y a pas de source de chaleur mais une source de rayonnement électromagnétique centimétrique. En pénétrant dans les aliments, par l'intermédiaire de l'eau qu'ils contiennent, les micro-ondes chauffent en profondeur, sur quelques centimètres. A condition que l'aliment à cuire ne soit pas trop gros, étant chauffé dans son ensemble il cuit beaucoup plus rapidement que par les procédés habituels. Pour éviter qu'il y ait des endroits trop cuits et d'autre pas assez, on place en général les aliments sur un plateau tournant. Pendant la cuisson, à l'opposé d'un four traditionnel, le four à micro-ondes reste froid, seul l'aliment à cuire est chauffé. Utiliser de préférence des plats en verre ou en céramique.

B/ QUELQUES MÉTHODES DE CUISSON PAR MICRO-ONDES

La cuisson directe

L'aliment est placé directement dans le four, cela s'applique aux pommes de terre que l'on peut faire cuire dans leur peau comme dans un four classique. Comme les ondes ne pénètrent que sur quelques centimètres, il faut éviter de cuire des pièces trop grosses, on choisira des pommes de terre de tailles voisines, pas très grosses. Le temps de cuisson est à peu près proportionnel à la quantité à cuire, il est souvent préférable de commencer à puissance maximum pendant deux ou trois minutes puis de la réduire. En plus du plateau tournant il est utile de modifier la position des aliments en cours de cuisson afin d'avoir une cuisson homogène.

Ce type de cuisson dessèche les aliments, si on la prolonge à outrance l'aliment va perdre toute son eau puis brûler et ensuite se transformer éventuellement en charbon voire s'enflammer s'il contient de la matière grasse (exemple pâte feuilletée) et si le gril est en action.

La cuisson vapeur

Afin d'éviter que les aliments ne se dessèchent on peut les placer dans un récipient fermé pouvant cependant laisser la vapeur s'échapper afin d'éviter l'explosion. En général il est inutile de rajouter de l'eau, là encore, on a souvent intérêt à commencer à pleine puissance puis après quelques minutes à la réduire. Ce type de cuisson convient particulièrement bien à la compote de pommes, aux légumes verts comme les courgettes. Pour les pommes de terre on peut les faire cuire ainsi, taillées en petit dés, en les enrobant d'un tout petit peu d'huile qui, pouvant monter en température au-delà de la température de l'eau bouillante, va favoriser la cuisson en surface. En expérimentant vous pourrez observer les effets de la matière grasse sur la cuisson.

Pour les filets de poisson qui cuisent à basse température, de l'ordre de 70°, afin d'éviter les surchauffes il est utile, dans un premier temps, de faire chauffer, jusqu'à l'ébullition, un peu de liquide à sa convenance, ce qui va réchauffer le récipient qui servira ensuite à la cuisson. On rajoute ensuite le poisson puis on fait cuire à puissance moyenne en mélangeant une fois ou deux. Avec quelques essais, parfois ratés, on est en général capable de maîtriser parfaitement la cuisson du poisson.

Les rôtis

Par nature le micro-ondes ne peut pas assurer la cuisson classique d'un rôti. Il est cependant possible d'y arriver avec une cuisson mixte. Pour un roastbeef on commence par le faire brunir sur tous ses côtés dans une poêle ou dans une cocotte puis on achève rapidement la cuisson dans le micro-ondes. La

difficulté étant de trouver le bon temps de cuisson. Là encore il est nécessaire de faire quelques expériences en n'oubliant pas que les temps de cuissons sont souvent très courts et qu'il dépend du poids du rôti. Une telle méthode peut s'appliquer pour compléter la cuisson d'un bifteck saignant que l'on préférerait à point.

Les œufs

Mettre un œuf dans un micro-ondes et c'est l'explosion assurée, pour un œuf cassé dans une coupelle c'est le jaune qui va exploser. Il existe cependant dans le commerce des petits récipients en forme d'œuf dans lesquels on casse des œufs qui vont cuire façon coque en 30 secondes, 60 secondes pour deux et ainsi de suite (le temps est proportionnel au poids). Il est utile de laisser reposer après cuisson pour assurer l'homogénéisation.

La cuisson avec plat brunisseur

Pour surchauffer la surface des aliments et dépasser ainsi la température d'ébullition de l'eau les fabricants de fours à micro-ondes ont introduit des plats brunisseurs qui absorbent les ondes électromagnétiques et qui s'échauffent donc facilement. Combiné à l'utilisation du gril ces plats permettent de cuire un peu à la manière des fours classiques. Ils conviennent parfaitement à la cuisson des tartes, des pizzas voire du boudin, des brochettes, des saucisses, des châtaignes... On peut également y faire cuire des pommes de terre, coupées ou non, enrobées d'huile qui, en fin de cuisson, auront l'aspect et le goût des pommes de terre frites. C'est certainement la méthode de cuisson la plus simple et la plus facile à maîtriser.

Les pièges de la cuisson au four à micro-ondes

La difficulté principale est de trouver le bon couple puissance, temps de cuisson qui dépend d'un grand nombre de facteurs dont principalement le poids et la nature des aliments à cuire. Si le four à micro-ondes est parfait pour faire la cuisine jusqu'à trois ou quatre portions il est totalement inadapté à la cuisine pour de nombreux convives ; en effet pour les grandes quantités les temps de cuisson s'allongent et les cuissons sont très hétérogènes, il vaut alors bien mieux utiliser un four classique.

Les idées fausses et les peurs

Bien des gens n'utilisent pas le four à micro-ondes car ils pensent que les aliments ainsi cuits sont dangereux pour la santé. Il faut rappeler que la cuisson au gril utilise les rayons infrarouges qui sont également des ondes électromagnétiques et que cela ne suscite aucune crainte. Une fois le four arrêté les ondes ont totalement disparu et ne restent pas du tout présentes dans les aliments. Cette légende provient vraisemblablement du fait que si l'on réchauffe un biberon, le liquide peut être brûlant alors que le récipient, le biberon, reste froid, c'est pour cela qu'il est conseillé d'attendre un peu avant de faire boire le biberon au bébé afin de se rendre compte au toucher de la température du liquide.

Aucune étude n'a montré de différences entre les aliments cuits classiquement ou par des micro-ondes. Bien entendu la cuisson modifie la composition chimique des aliments en les rendant assimilables ou plus digestes, mais cette modification est bénéfique pour la santé et non pas néfaste.

Illustration : une recette, la grillade à la Brillat-Savarin (recette d'Hervé This):

- dans un premier temps faire griller les cuisses de canard à feu vif avec du beurre ou de l'huile, afin d'avoir une surface bien croustillante. L'intérieur, qui n'a pas eu le temps de cuire, le sera par les micro-ondes.

- puis, dans un second temps, après avoir éliminé le surplus de graisse avec un papier absorbant, injecter avec une seringue du Cointreau (dans lequel on a dissous un peu de sel) au cœur de la viande et passer au micro-ondes. L'intérieur sera cuit à l'étouffée dans une vapeur alcoolisée et aromatisée à l'orange. Pas besoin de sauce, elle est déjà dans la viande ; pas besoin d'alcool, il y est déjà.

Bon appétit.



GÉRARD BAILLET

Ancien Ingénieur en opto-électronique

Membre de la S.A.F. et de la commission des cadrans solaires

Prix Henry Rey de la S.A.F (Société Astronomique de France) 2006

Voici pour commencer une citation célèbre de Saint Augustin (Les confessions livre XI chapitre XIV) :

« Qu'est-ce donc que le temps ? Si personne ne me le demande, je le sais bien ; mais si on me le demande, et que j'entreprenne de l'expliquer, je trouve que je l'ignore. »

Les philosophes ont rempli des volumes sur la notion de temps, sans beaucoup aider les techniciens qui mesurent le temps.

Du point de vue du technicien, le temps est ce qui est mesuré par une horloge. Le mot horloge est le terme générique qui regroupe les instruments de mesure du temps.

On peut classer les horloges en deux types

1 - Celles qui comptent des événements : les jours, les lunaisons, les saisons, les battements d'un pendule, d'un balancier rotatif, les oscillations d'un quartz ou des atomes...

2 - Celles qui mesurent un déplacement : celui du soleil, des étoiles, du niveau d'eau dans une clepsydre, de la hauteur du sable dans un sablier...

Dans les deux cas on suppose que l'horloge mesure un temps qui « s'écoule » à vitesse constante. La comparaison des indications de ces diverses horloges a montré des différences périodiques, proportionnelles, ou même de type aléatoire entre elles.

Nous nous limiterons ici à la description rapide du temps solaire, et à une description des diverses « heures solaires » ayant existé.

L'heure temporaire

Autrement appelée « judaïque ou antique ». Il s'agit de diviser la durée entre le lever et le coucher du soleil en 12 parties égales, de même pour la nuit entre le coucher et le lever. Les heures sont chaque fois comptées de 1 à 12. Par exemple : les ouvriers de la onzième heure sont ceux qui sont arrivés à la fin de la journée (l'Évangile selon Matthieu, chapitre 20, versets 1 à 16).

L'heure babylonique

La durée entre deux levers successifs du soleil est divisée en 24 parties égales, elles sont comptées de 1 à 24. Elles sont originaires de Babylone et furent utilisées dans divers pays d'Europe.

L'heure italique

La durée entre deux couchers successifs du soleil est divisée en 24 parties égales. Elles peuvent être comptées de 1 à 24 ou même **décomptées de 24 à 1**. Ces heures furent utilisées en Italie jusqu'au 19^{ème} siècle.

L'heure commune, vulgaire ou équinoxiale

Aujourd'hui appelée « solaire » est la division en 24 parties égales du temps entre deux passages du soleil dans la direction du sud du lieu avec changement de date à minuit. Elles sont en général comptées deux fois de 1 à 12. Les astronomes les comptent de 1 à 24 en partant de midi avec

changement de date à midi. Elles sont les plus courantes aujourd'hui.

L'heure canoniale ou romaine

Il y a 12 heures d'une durée inégale entre le lever et le coucher du soleil, la durée d'une même heure variant aussi suivant les saisons. Il s'agit d'une dérive de l'heure temporaire vue par les romains. Ce sont les heures marquées par les cadrans canoniaux que l'on trouve encore dans les monastères européens du moyen âge.

Il existe d'autres types d'heures que je ne définirai pas ici comme par exemple les heures de Nuremberg, les heures des prières musulmanes, les heures chinoises, japonaises etc.

Comment lire l'heure solaire ?

En supposant l'astronomie élémentaire et la géométrie dans l'espace connues quelques lignes d'explication suffisent. Comme ce n'est en général pas le cas je vais employer une méthode différente.

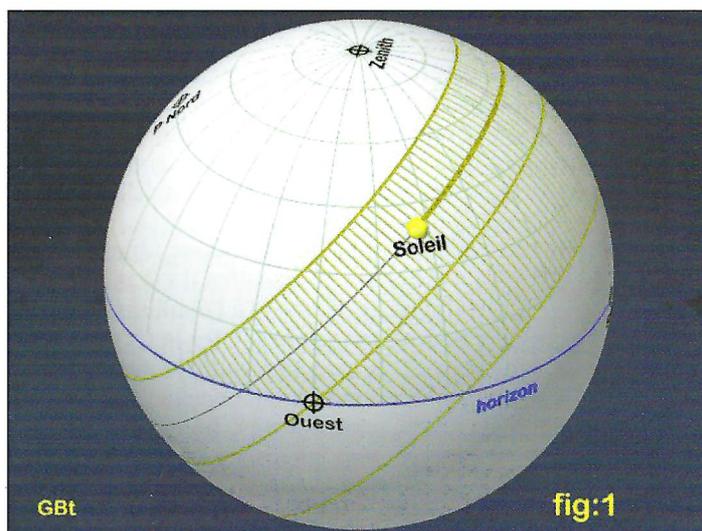
La mesure de l'heure solaire est conduite comme la mesure d'une longueur en utilisant la coïncidence des extrémités d'un objet avec les graduations d'une règle. Dans le cas de l'heure solaire il s'agit de la coïncidence du soleil avec des graduations « imaginaires » dans le ciel.

Le ciel n'ayant pas de forme il est nécessaire de lui en attribuer une pour continuer. La forme sphérique est retenue pour deux raisons :

1 - Le mouvement journalier des astres est « simple » à définir sur une sphère

2 - Les mesures des positions des astres, jusqu'au 19^{ème} siècle, ne donnaient que des directions (sans la distance) aussi la représentation sur une sphère était suffisante.

La sphère utilisée dans notre cas est topocentrique (pour un lieu à la surface de la terre), elle a un rayon indéfini tel que le rapport { rayon sphère / rayon terre } soit grand. La personne qui lit l'heure solaire est au centre de la sphère.

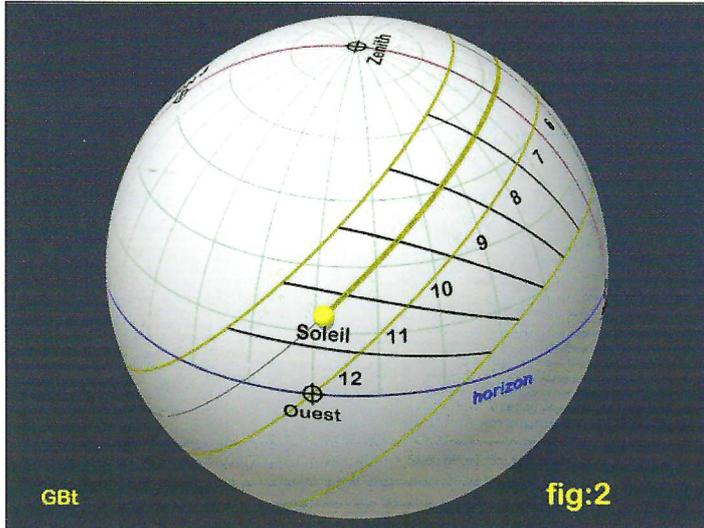


La figure 1 représente la sphère céleste locale pour un lieu de latitude 45° (pratiquement la latitude de Clermont-Ferrand). Le soleil circule dans la zone hachurée. Au solstice

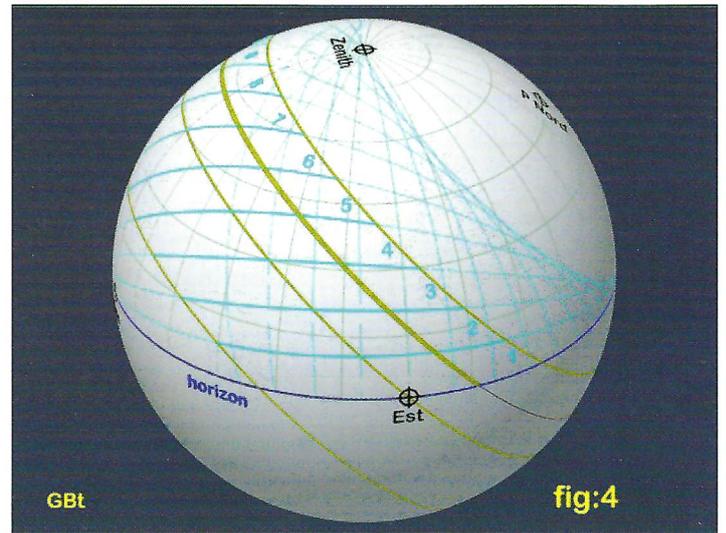
d'été il est sur le cercle proche du zénith et à celui d'hiver sur le cercle le plus éloigné du zénith, sur la figure on voit le soleil suivi de sa trace sur la sphère, chaque jour le soleil décrit un cercle centré sur le pôle nord céleste (en première approximation on néglige la variation de la déclinaison dans la journée).

LIGNES D'HEURES TEMPORAIRES

Voici un exemple (figure 2) des lignes d'heures temporaires. Elles sont symétriques par rapport à la ligne 6h (midi), ce ne sont pas des cercles mais des courbes en S avec le point d'inflexion sur la ligne d'équinoxe. Le S n'est visible que pour les latitudes proches du cercle polaire. Sur la figure 2 le soleil est dans la 11^{ème} heure on voit qu'il est proche de l'horizon au couchant.

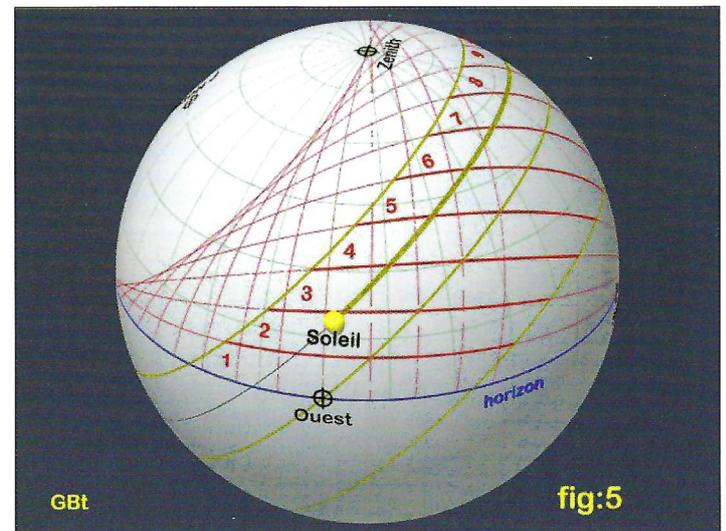


Les lignes d'heures babyloniennes étant dissymétriques la figure 4 montre l'aspect des lignes d'heures côté levant.



HEURES ITALIQUES

La figure 5 représente les heures italiennes. Ce sont des grands cercles sur la sphère obtenus par rotation de l'horizon autour du pôle nord céleste.

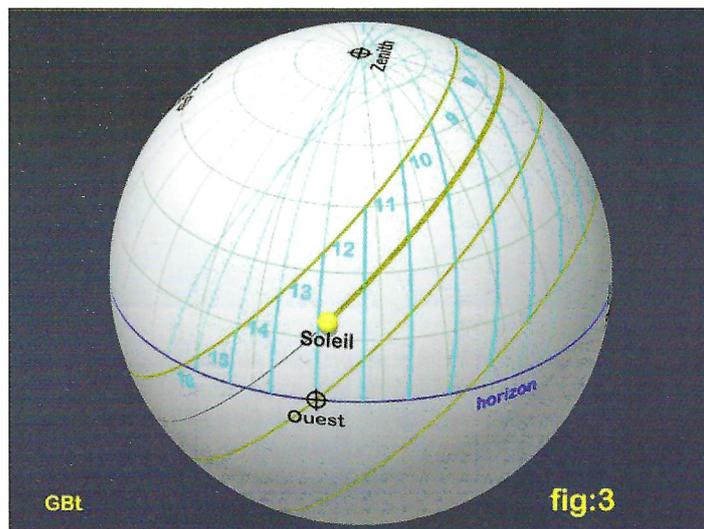


LIGNES D'HEURES BABYLONIENNES

Voici les lignes d'heures babyloniennes sur la figure 3. Il s'agit de grands cercles sur la sphère obtenus par rotation de l'horizon autour du pôle nord céleste.

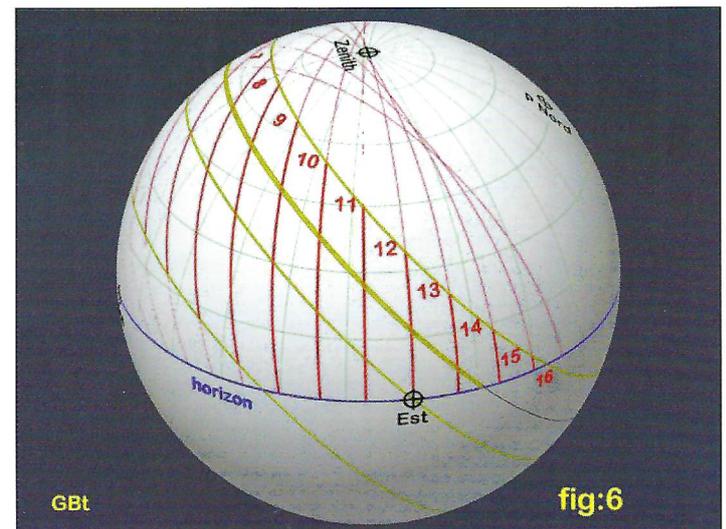
Le soleil est dans la 12^{ème} heure proche de 13h ceci signifie que le soleil est levé depuis plus de 11h.

La durée du jour (du lever au coucher du soleil) varie entre 8h3/4 et 15h1/4 suivant les saisons. À l'équinoxe le jour dure 12h (voir figure 3).



Le soleil est dans la deuxième heure. Cela signifie que le soleil va se coucher dans moins de 2h.

Les lignes d'heures italiennes étant dissymétriques la figure 6 montre l'aspect des lignes d'heures côté levant.



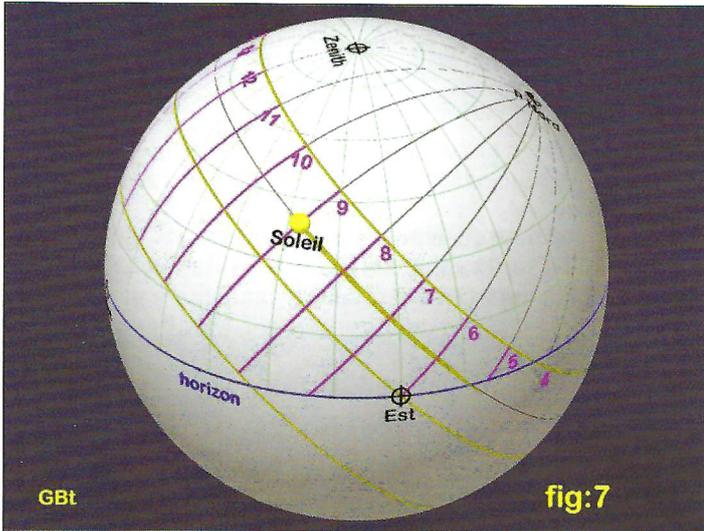
HEURES ÉQUINOXIALES

La figure 7 représente les heures équinoxiales ou heures solaires. Ce sont des grands cercles qui passent par le pôle nord céleste et divisent la sphère en 24 parties égales.

Chaque heure dure le même temps qu'une heure temporaire le jour de l'équinoxe (il s'agit de la définition de Ptolémée).

Sur la figure il est 9 heures solaires.

On peut aussi voir la variation de l'heure de lever du soleil suivant la saison. Le jour de l'équinoxe le soleil se lève à 6h. Les lignes d'heures sont symétriques par rapport à la ligne 12h (midi).



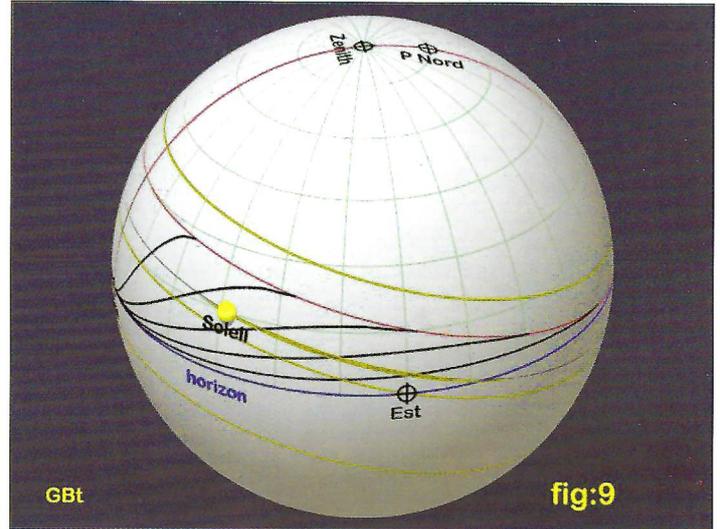
EFFET DE LA LATITUDE AU-DELÀ DU CERCLE POLAIRE

Sur la figure 9, la latitude vaut 75° les lignes d'heures temporaires sont dessinées, on discerne bien la forme en S ().

Le dessin des lignes s'arrête sur un cercle rouge côté nord, de déclinaison = $90^\circ - \text{latitude}$

Elles se rejoignent sur l'horizon en un point au sud.

Dans la période proche du solstice d'été, le soleil se déplace entre le cercle rouge et le cercle du solstice d'été. Il n'y a plus de lever ou de coucher journalier du soleil. Les systèmes horaires temporaires, italiques, babyloniens utilisant comme référence le lever et/ou le coucher du soleil, il est donc impossible de tracer ces lignes d'heures. Idem lorsque le soleil reste en dessous de l'horizon (nuit polaire).

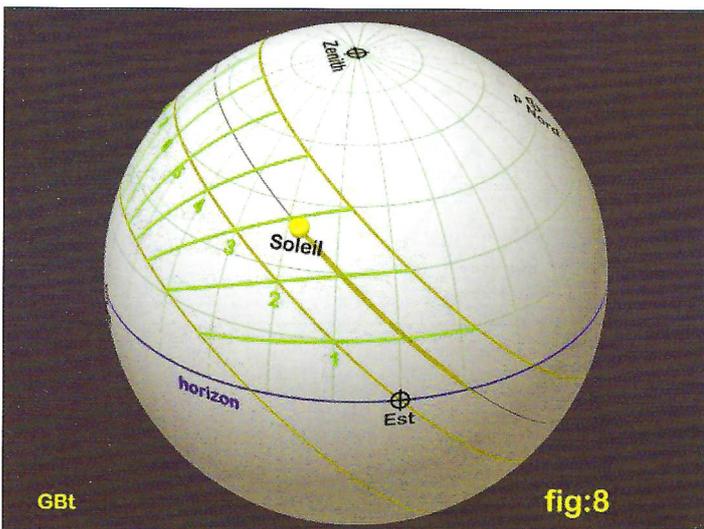


HEURES CANONIALES

Les lignes d'heures canoniales (figure 8) sont des grands cercles qui passent par les points sud et nord de l'horizon et divisent la sphère au dessus de l'horizon en 12 parties égales.

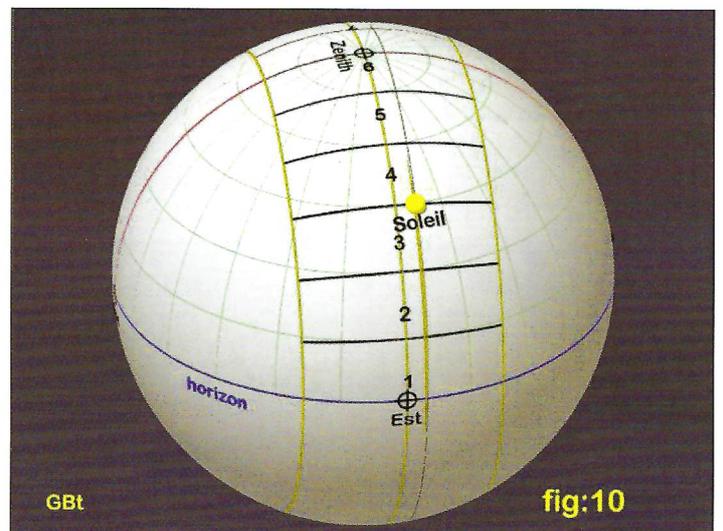
Le soleil dans son parcours met un temps différent :

- Pour franchir chaque heure dans la journée.
- Pour parcourir la même heure suivant les saisons.



EFFET DE LA LATITUDE À L'ÉQUATEUR

Figure 10 :
latitude = 0° ;
lignes d'heures temporaires.



Un phénomène curieux se produit alors :

Les dessins de tous les types de lignes d'heures se superposent exactement, la seule variation se trouve dans la numérotation des lignes ou des intervalles.

Ces similitudes ne me semblent pas liées au hasard mais à une manière identique de concevoir le système Terre-Soleil par les anciens.

On peut envisager comme hypothèses :

- qu'ils « voyaient » le soleil tourner autour de la terre et qu'ils ont défini les lignes d'heures pour l'équateur.

- qu'ils savaient la terre sphérique, ils « se sont arrangés » avec la latitude et les saisons pour définir les positions originales des lignes d'heures, ce qui a donné tous ces types d'heures si différents.

REMARQUE SUR LES GRADUATIONS

Les cadrans solaires de l'antiquité que l'on a retrouvés ne portaient pas de numérotation écrite. Dans les textes on retrouverait pour la figure 8 l'indication « le soleil est dans la troisième heure », aujourd'hui on dirait « il est deux heures trois-quarts » ou « trois heures moins le quart ». Cela est lié au fait que les anciens numérotaient les **intervalles** et qu'ils n'avaient pas l'usage du zéro. Aujourd'hui on numérotait les **lignes** et la première porterait l'indication zéro.

REMARQUE SUR LES HEURES ITALIQUES

L'instant de référence « coucher du soleil » était, dans certaines villes, une demi-heure après le coucher du soleil. Les récits des voyages de Montaigne ou de Goethe (par exemple) montrent les inconvénients pour les voyageurs jusqu'au 19^{ème} siècle de ces fluctuations du système horaire.

REMARQUES SUR LES FIGURES

Elles sont réalisées avec le remarquable logiciel libre POV-RAY. J'ai écrit une bibliothèque de fonctions pour la géométrie sphérique (950 lignes de code), le logiciel de dessin des sphères ne contient que 350 lignes de code. Si des personnes sont intéressées elles peuvent prendre contact [gp.baillet@wanadoo.fr].

LES CADRANS SOLAIRES

Les cadrans solaires sont des instruments permettant la lecture directe de l'heure solaire. On en retrouve qui sont gradués suivant tous les types d'heures décrits.

D'autres articles à venir traiteront des cadrans et de l'heure.

QUELQUES OUVRAGES

- **RECHERCHE SUR L'HISTOIRE DE L'ASTRONOMIE ANCIENNE**, Paul TANNERY, *Éditions Jacques Gabay*

- **TRAITÉ D'HORLOGIOPHIE**, Dom Pierre de Sainte Marie Madelaine, 1645 édition de 1701

- **DICTIONNAIRE ENCYCLOPÉDIQUE DES AMUSEMENTS DES SCIENCES MATHÉMATIQUES ET ...**, par Jacques LACOMBE

- **ASTRONOMIE GÉNÉRALE**, André DANJON, *Librairie Scientifique et Technique Albert Blanchard*

- **RÉCRÉATIONS MATHÉMATIQUES ET PHYSIQUES**, tome premier (1778), *par Ozanam*

- **ASTRONOMIE ET ÉGLISES**, John L. HEILBRON, *Belin pour la science*

- **LA GNOMONIQUE**, Denis SAVOIE, *L'âne d'or, Les Belles lettres*

- **ARISTOTE TRAITÉ DU CIEL**, traduction Catherine DALIMIER et Pierre PELLEGRIN, *GF Flammarion*

- **ÉLÉMENTS D'ASTRONOMIE DE POSITION**, Maurice DANLOUX-DUMESNILS, *Librairie Scientifique et Technique Albert Blanchard*

- **LE MOYEN AGE**, une imposture vérités et légendes, Jacques HEERS, *Perrin*

- **LES OMBRES DU TEMPS**, Yves Opizzo, *Burillier*

MOTS COUPÉS

(jeu proposé par Jocelyne Allée)

Vingt mots ont été coupés chacun d'eux en 3 morceaux qui figurent au complet dans le tableau ci-dessous.

Il s'agit des noms de 10 savants et pour chacun le nom de son domaine d'étude, d'un instrument qu'il a utilisé ou d'une de ses découvertes.

Bien entendu il s'agit de reconstituer la liste des savants associés à leur spécialité.

| | | | | | | | | | |
|-------|------|------|-----|------|-----|------|------|------|------|
| NE | GRAV | ED | NT | BEC | TE | OMIE | LAV | ON | EIN |
| NST | RADI | NIC | OXY | LI | WT | PER | ION | GEN | AR |
| RAY | ROE | OIS | ET | ATO | TIV | NE | ONS | OGRA | REL |
| ON | SON | GA | GAD | PHON | I | M | RELA | WIN | LUN |
| RO | ITA | ES | ITÉ | EI | IER | X | EVO | CO | TION |
| OACTI | D | ASTR | GÈ | VITÉ | PHE | LUT | LÉE | QUE | AVO |

La solution peut être consultée sur le site internet de l'Adasta : <http://www.adasta.fr/>

DE LA BOUSSOLE AU GPS, MILLE ANS DE NAVIGATION



Conférence donnée à l'ADASTA le 20 Octobre 2010 par
FRANCIS ASPORD

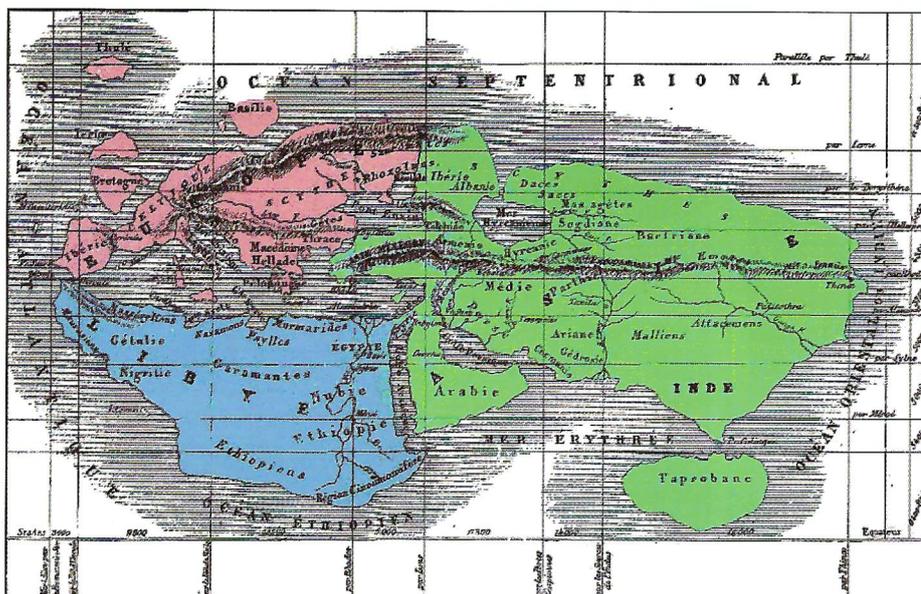
MEMBRE DE L'ADASTA, RETRAITÉ SNCF, INGÉNIEUR CONSEIL

LA NAVIGATION DÈS LA PRÉHISTOIRE

Nos ancêtres de la préhistoire ont dû faire face à un sacré problème de navigation puisque, partis d'Afrique centrale, ils ont progressivement conquis toutes les terres émergées. Comment diable ont-ils pu réussir cet exploit ?

En utilisant deux techniques en parallèle. D'une part la navigation astronomique. Le Soleil, la Lune et, d'une façon générale, tous les astres, se lèvent à l'Est et se couchent à l'Ouest, sur l'ensemble de la Terre, puisque cela résulte directement de son sens de rotation. A noter que ce n'est pas du tout le cas à midi ou à minuit car la situation change du tout au tout en fonction de la latitude (1). D'autre part en utilisant des repères visuels, naturels, très remarquables à grande distance. Exemple bien connu en Auvergne : le Puy de Dôme visible à une centaine de kilomètres à la ronde. Cette technique est toujours utilisée de nos jours par les caravaniers du Sahara. Moyennant quoi, à partir de l'Afrique et en passant par l'Égypte, vous arrivez en Europe, en Sibérie, en Asie, puis, par le détroit de Béring pris par les glaces, en Amérique du Nord et du Sud. Restaient les îles. La plus grande difficulté a dû être la conquête de la Polynésie. En effet ces différentes îles sont séparées par une distance bien plus grande que la visibilité de l'horizon. Il reste une part de mystère concernant cet exploit.

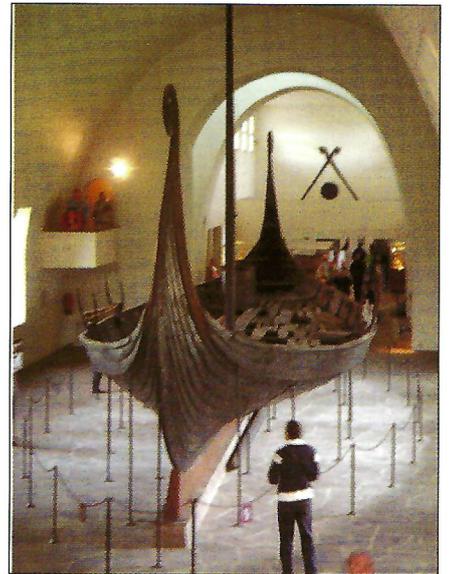
Les Babyloniens furent de grands astronomes. On pense qu'ils étaient capables de prédire les éclipses. Ils nous ont légué le système sexagésimal en base 60, toujours en usage de nos jours (et pour longtemps encore) pour la mesure du temps et des angles. Ils savaient que la Terre était ronde et ont inventé le système de repérage en latitude et longitude. C'est à partir de ces connaissances que le grec Eratosthène attribua à la Terre un rayon de 6.400km. Ceci n'a pas empêché Christophe Colomb, des siècles plus tard, de penser qu'elle était deux fois plus petite.



Carte du monde selon Eratosthène (III^{ème} siècle av JC)

Les Romains appelaient la Méditerranée « mare nostrum » (notre mer). Comme c'est une mer fermée, les problèmes de navigation n'y étaient pas insurmontables, d'autant plus qu'ils longeaient les côtes autant que possible. Ce furent de grands praticiens (aqueducs, ponts), mais aucun mathématicien ou physicien romain n'a laissé son nom dans l'Histoire.

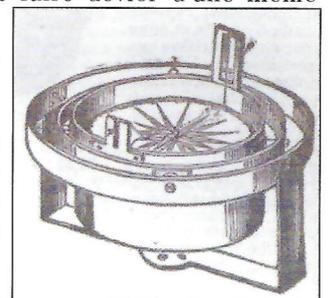
L'histoire des Vikings « côtiers » est bien connue, ceux qui sont descendus, en suivant les côtes, depuis la Scandinavie jusqu'en Normandie (de Nord Man, homme du Nord) où ils se sont sédentarisés avec l'aide du roi de France. La saga des Vikings « hauturiers » est moins connue. Ils ont décidé, un jour, de partir à l'aventure, sur leurs drakkars, en direction du vaste océan qui s'ouvrait à l'ouest de la Norvège. Leur système de navigation était très simple. Après avoir relevé la hauteur de l'étoile polaire à leur port d'attache, ils maintenaient cette hauteur fixe sur l'horizon pendant le nombre de jours nécessaires pour arriver sur une terre nouvelle. Naviguant à latitude constante ils ont ainsi découvert l'Islande, puis le Groenland, puis l'Amérique du Nord.



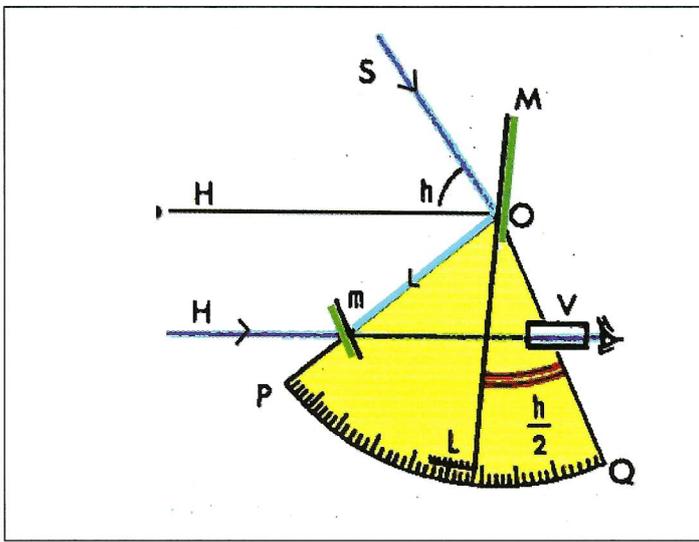
Drakkar d'Oseberg

COMMENT CALCULER LA LATITUDE ? L'INVENTION DE LA BOUSSOLE ET DU SEXTANT

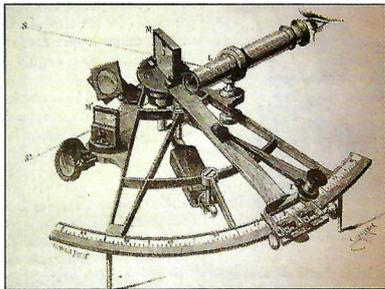
Vers l'an 1000 les chinois ont découvert le principe de la boussole, vraisemblablement en frottant une pierre de magnétite sur un petit morceau de fer et en constatant que, s'il flottait sur l'eau, il était impossible de le faire dévier d'une même direction appelée Nord. Cette révolution technologique est toujours d'actualité car elle vient en complément des petites faiblesses du GPS.



Boussole marine



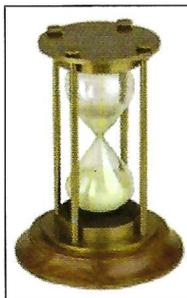
SEXTANT : L'œil, qui vise à travers le miroir m une direction H, voit cette même direction par double réflexion sur M et m. En déplaçant l'alidade OL, tout en continuant à viser H à travers m, l'observateur balaye le plan du secteur gradué PO. Il verra, après double réflexion, une direction S faisant avec H un angle h, après que l'alidade OL aura balayé un angle $h/2$, lu sur le limbe gradué



A partir d'instruments d'astronomie arabes de type astrolabe, le sextant de marine finit par atteindre sa forme définitive (ce qui nécessita la maîtrise de la technologie des miroirs). A partir de cette date le calcul de la latitude devint possible avec une précision de un mile marin, soit 1.852m.

COMMENT CONNAÎTRE SA LONGITUDE ?

Si on pouvait espérer calculer à 1 mile près sa latitude, c'était loin d'être le cas de la longitude ! Des chapelets d'îles apparaissaient sur les cartes, bizarrement toutes à la même latitude. Les récifs n'étaient jamais à l'endroit indiqué par les cartes, d'où une série de naufrages inexplicables. On comprit vite que tout cela ne représentait qu'une seule et même île mais avec des erreurs de longitude effarantes. Il faut dire que la mesure de l'heure se faisait à l'aide d'un sablier et d'un matelot « garde-temps », chargé de le retourner, si possible sans trop d'erreur.

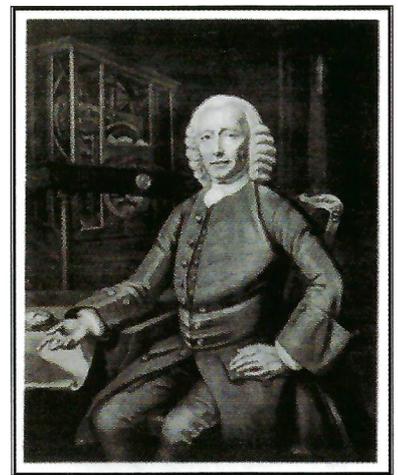


En effet, contrairement à la latitude qui modifie l'aspect astronomique du ciel, la longitude ne fait que les décaler dans le temps. Pas de mesure précise du temps, pas de longitude correcte ! Les Anglais lancèrent donc un concours à qui réussirait à calculer la longitude à un mille marin près. Les Français créèrent le « Bureau des Longitudes » avec la même mission. Toutes les pistes furent étudiées. En particulier en astronomie. Römer, qui étudiait les satellites de Jupiter découvrit ainsi que la lumière avait une vitesse finie. D'autres se lancèrent dans le calcul précis de la position de la Lune, sans résultat. Il faut dire que ce calcul nécessite, avec la précision disponible de nos jours à l'aide d'ordinateurs, quelques... 35.000 termes correctifs !

La solution vint d'un « charpentier-horloger » anglais, John Harrison, ébéniste de formation et horloger autodidacte, qui ne fut guère pris au sérieux par les éminents scientifiques de son époque. On finit quand même par admettre qu'il avait

gagné le prix ! Du coup, faute de publicité tapageuse, son nom est assez peu connu. Il venait de mettre au point le « chronomètre de marine ».

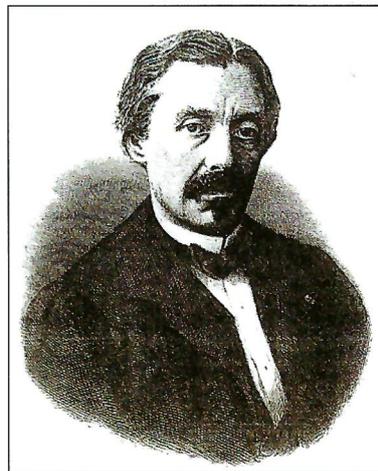
A noter que le principe de l'échappement était déjà connu dès le XIII^{ème} siècle et que l'utilisation du pendule, associée à l'arc de cycloïde, est due à Christian Huygens (1629-1695)



John Harrison (1693-1776)

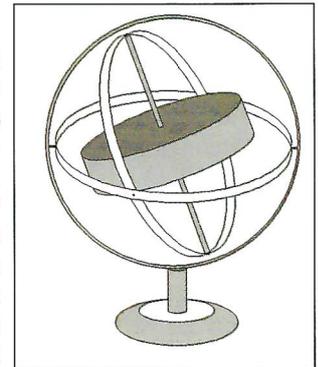
LES TECHNIQUES MODERNES

Nous voici arrivés au XIX^{ème} siècle et à l'invention du gyroscope par Foucault, un Français cette fois. Son principe est simple : tout corps tournant qui ne subit pas d'action extérieure conserve son axe de rotation fixe dans l'espace. Un bon exemple est celui de la Terre. Le pendule de Foucault et les courants de



Jean Bernard Léon Foucault

Foucault sont bien plus connus mais ne jouent pas de rôle prépondérant dans notre sujet d'aujourd'hui. Autodidacte lui-même, il aura, comme Harrison, beaucoup de mal à faire triompher ses idées, ce qui fait que le gyroscope sombrera temporairement dans l'oubli. Un siècle plus tard, il ressortira de l'oubli et servira à l'aviation (horizon artificiel, indicateur de virage) et à la stabilisation des fusées, instables du fait de la poussée par l'arrière.



Gyroscope

Vers 1900 Marconi développe les liaisons radio à longue distance. On s'aperçoit que la qualité de la réception est très influencée par la direction des antennes : La radio-goniométrie est née. Toujours en usage actuellement grâce aux balises d'aviation, elle a cependant un gros défaut : On ne peut implanter des balises au-dessus des mers. Il faudra trouver mieux pour la traversée, en sécurité, des océans.



Guglielmo Marconi (1874-1937)

Le radar apparaît vers 1940, juste à temps pour la bataille d'Angleterre. Il permet la localisation précise d'un objet à plusieurs centaines de kilomètres. Le grand défaut de ce radar, appelé « primaire », est qu'il est vorace en énergie. Son usage est donc plutôt militaire. On inventa alors, pour l'aviation civile, un radar, appelé « secondaire », qui se contente d'écouter les signaux émis par les avions. C'est ce type de radar qui équipe les tours de contrôle aérien.



Antenne radar

Malheureusement il ne fait que répliquer, sur un écran, les informations données par l'avion lui-même. Si celles-ci sont fausses, toute la chaîne est contaminée. Certaines catastrophes aériennes sont dues à cet oubli. L'exemple suivant illustre cette triste situation. Suite à une erreur de maintenance, l'altimètre d'un avion indique 10.000m alors que l'avion se trouve, en fait, à 100m au-dessus de l'eau, de nuit. Le pilote, qui a un doute sur la fiabilité de son altimètre demande au contrôleur aérien de lui confirmer son altitude. Que lui répond le contrôleur, via son radar « secondaire » ? 10.000m évidemment ! Qu'aurait donné un radar « primaire » ? 100m évidemment ! L'histoire s'est très mal terminée.

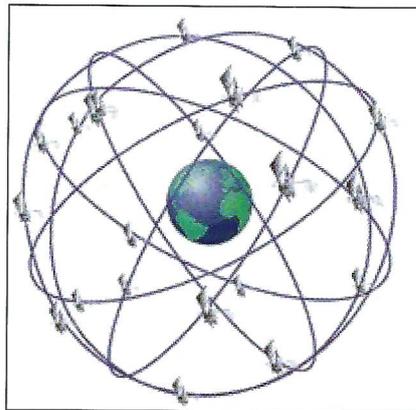
Les radars ne pouvant, de toutes façons, couvrir tout l'océan, il fallait trouver autre chose. Ce fut la « centrale inertielle ». Le principe en est le suivant : Vous devez connaître avec précision votre point de départ, où vous êtes à vitesse nulle. A l'aide de capteurs d'accélération suivant trois axes orthogonaux, fixés sur une plateforme stabilisée 3 axes par un dispositif gyroscopique, vous pouvez en déduire, à tout moment, votre vitesse et donc votre distance parcourue, toujours dans les trois directions. En l'absence d'erreurs de mesure c'est gagné ! Vous connaissez, en temps réel, votre position dans l'espace. Par sécurité vous triplez les centrales pour bénéficier d'une majorité nette sur les indications fournies et vous partez où bon vous semble, en avion, en sous-marin ou en char. Malheureusement ce système présente de gros défauts : Il est cher, délicat à régler et s'écarte progressivement de la position exacte du fait des erreurs de mesure. Il faut donc le recalculer au-dessus de tout point connu, un peu comme un altimètre, qui bouge non seulement avec l'altitude mais aussi avec la météo.

D'où l'idée du GPS qui est devenu opérationnel pour les civils en 1995. J'ai tout de suite compris, en tant que passionné de navigation, que cet appareil serait l'amour technique de ma vie (à égalité avec la calculette programmable !) Avant le GPS j'étais doté de tous les instruments d'un prix abordable : altimètre, chronomètre, podomètre, carte et boussole. Le GPS allait-il remplacer tout ça ? Oui...et non ! Le GPS présente quand même quelques faiblesses qui nécessitent la présence permanente, à ses côtés, d'une boussole et, bien sûr, d'une carte. Le GPS est un système simple à expliquer, simple à utiliser et...extrêmement difficile à mettre au point et à maintenir en service

opérationnel. Il faut dire qu'il tutoie les nano-secondes à longueur de temps et que donc...il doit tenir compte de la théorie de la relativité générale d'Einstein ! Deux horloges identiques, mais qui n'ont pas la même vitesse et le même champ de gravité vont inévitablement diverger. Si vous oubliez cela vous commettrez une erreur de positionnement de 20 km (2) alors que vous visiez une erreur de 5 m ! A part toutes ces finesses son principe est simple :

On mesure le temps de vol d'un bip électro-magnétique entre un satellite et vous, comme vous connaissez la vitesse des ondes vous savez à quelle distance vous vous trouvez du satellite. A vous de gérer ça au mieux et ça marche ! Son gros avantage ? Il est insensible au mauvais temps. Donc en plein brouillard, quand vous aurez vraiment besoin d'un bon coup de pouce pour retrouver votre voiture, il répondra présent.

Son gros défaut ? Il n'est pas considéré comme suffisamment fiable par l'aviation civile pour remplacer les centrales inertielles. Un autre défaut ? Il dépend à 100% du bon vouloir de l'armée américaine.



Les satellites autour de la terre

D'où l'idée de l'Europe de mettre au point un système semblable : « Galileo ». Ses qualités ? Précision 10 fois meilleure, garantie opérationnelle à 100%. Son défaut ? Non opérationnel !

Et après le GPS et, peut-être Galileo, quel est l'avenir ? Dans l'espace, afin de ne plus risquer de perdre une mission par manque de

repères, installer un système de type GPS autour de la Lune et de Mars. Sur Terre ça va être la folie du géo-positionnement : en bien c'est la mise en place du tablier du viaduc de Millau à 1mm près, en mal c'est l'arrivée de « Big Brother » qui saura vous localiser, à tout moment, pour le meilleur et pour le pire, via votre téléphone portable, via le mouchard fixé sous votre auto, via internet, etc...

CONCLUSION

Attention à l'évolution de cette société hyper-technologique. Envisagez de revenir progressivement à la raison en vous rapprochant du mode de vie des hommes pré-historiques ! Nous voilà revenus au début de cette conférence !

(1) Suivant la latitude et la saison le Soleil passe au Sud ou au Nord en Afrique centrale, lieu de départ présumé des hommes préhistoriques, ce qui devait être incompréhensible ! C'est la grande différence entre les deux hémisphères. D'autre part, sans heure, il est difficile de savoir exactement quand il est midi ou minuit. Par contre matin et soir tous les astres sont à l'Est puis à l'Ouest.

(2) La relativité générale dit que le temps est fonction de la vitesse et de la gravité. Jusqu'au GPS les écarts de temps dus à cette théorie étaient considérés comme négligeables dans la vie courante. Or à 300.000km/s un écart de 20 km prend 67 micro-secondes. Si les horloges sol et satellites ne sont pas synchrones avec cette précision tout est faux. Comme on veut une précision de 5 m il faut un synchronisme à 17 nano-secondes ce qui s'obtient très bien avec les horloges atomiques. En fait on fait beaucoup mieux pour les militaires, de l'ordre du cm.

L'enregistrement « live » de cette conférence est disponible sur DVD, en qualité « amateur ». S'adresser au secrétariat de l'Adasta. Le texte est celui de l'auteur, les photos et images ont été ajoutées pour agrémenter la mise en page.

LE NUCLÉAIRE DU FUTUR

LES RÉACTEURS DE QUATRIÈME GÉNÉRATION (1^{ÈRE} PARTIE)

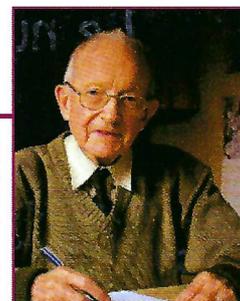


CHRISTIAN LE BRUN

ANCIEN DIRECTEUR DE RECHERCHE
AU CNRS LPSC (LABORATOIRE
DE PHYSIQUE SUBATOMIQUE ET
DE COSMOLOGIE) DE GRENOBLE.



LOUIS AVAN
PROFESSEUR HONORAIRE
DU CONSERVATOIRE
NATIONAL DES ARTS ET
MÉTIERS DE PARIS,
MEMBRE ACTIF DE
L'ADASTA.



Cet article reprend le diaporama présenté par M. Christian LE BRUN lors d'une conférence en partenariat avec l'Adasta à l'initiative du groupe SFEN Auvergne.

Pour faciliter la compréhension de cette présentation hors conférence, M. Louis AVAN a apporté des explications complémentaires, qui apparaissent ci-dessous dans des encadrés de couleur orangée.

RÉSUMÉ

L'énergie nucléaire, qui est une des sources d'énergie produisant le moins de gaz à effet de serre, devrait jouer un rôle important dans un futur proche dans la production d'énergie au niveau mondial. Pour cela elle devra satisfaire un certain nombre de critères généraux qui ont été définis par les organismes internationaux (IAEA, GEN-IV) qui sont: une sûreté accrue, la durabilité par l'utilisation des noyaux fertiles, une bonne gestion des déchets, un champ élargi d'utilisations, une rentabilité économique acceptable et la résistance à la prolifération. Plusieurs concepts sont à l'étude, voire en développement pour essayer de répondre à ces critères au sein de collaborations internationales. L'exposé en fait une présentation sommaire et présente les forces et les faiblesses des principaux systèmes en cours d'étude.

Christian Le Brun, directeur de recherches au CNRS en retraite depuis octobre 2006, a mené des recherches expérimentales en physique des particules et en physique nucléaire. Depuis 10 ans ses travaux menés dans le cadre du programme « aval du cycle électronucléaire » du CNRS, ont porté sur la transmutation des déchets à vie longue (mesure de données nucléaires et mesure et contrôle de la réactivité d'un réacteur sous-critique et, pour les systèmes du futur, plus spécialement sur les réacteurs à sels fondus. Il a

codirigé, de 2003 à 2006, le groupement de recherche GEDEPEON (GESTION des DEChets et PRODUCTION d'ENERGIE par des Options Nouvelles) qui réunit AREVA NP, le CEA, le CNRS et EDF.

SOMMAIRE

1^{ÈRE} PARTIE

Pourquoi faire encore du nucléaire ?

- une énergie concentrée
- la faible émission de gaz à effet de serre
- la demande mondiale d'énergie

=> La situation actuelle – Production et déchets

2^{ÈME} PARTIE

Les conditions pour un futur du nucléaire

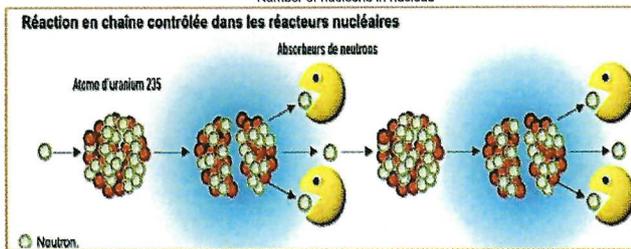
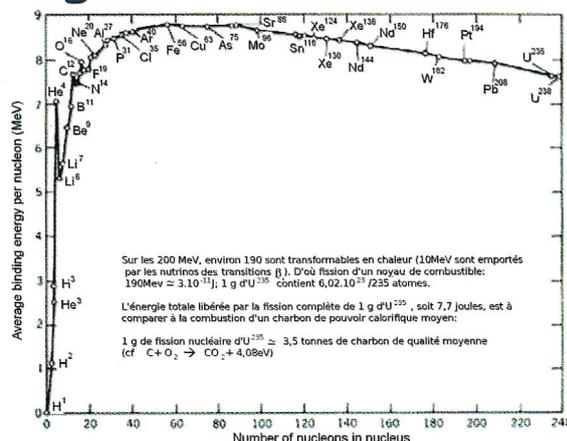
- sûreté
- durabilité des ressources
- gestion des déchets
- économie
- non-prolifération

=> Six systèmes actuellement en cours d'étude

=> Lexique

D'où vient l'énergie nucléaire

- Energies de liaison
- Fusion: < 24 MeV
- Fission: ~200 MeV
- Combustion: ~10 eV
- Soit un rapport 2×10^7 (passe du gramme à la dizaine de tonnes)
- Energie très concentrée (logistique et déchets)
- Réaction en chaîne



DÉCHETS : la France produit chaque année 3 tonnes de déchets industriels par habitant, dont 100 kg toxiques. Sur ces 100 kg, 1 kg est d'origine nucléaire, dont 5 g sont fortement toxiques.

L'ANDRA (Agence Nationale pour la gestion des Déchets Radioactifs) assure pour la France le suivi de la loi dite « Bataille » du 30 décembre 1991 relative aux programmes de recherche sur les déchets nucléaires, programme conduit par le CEA (Commissariat à l'Energie Atomique) « visant à réduire les quantités et la nocivité de ces déchets et à mettre au point des solutions optimales de conditionnement, d'entreposage et de stockage ».

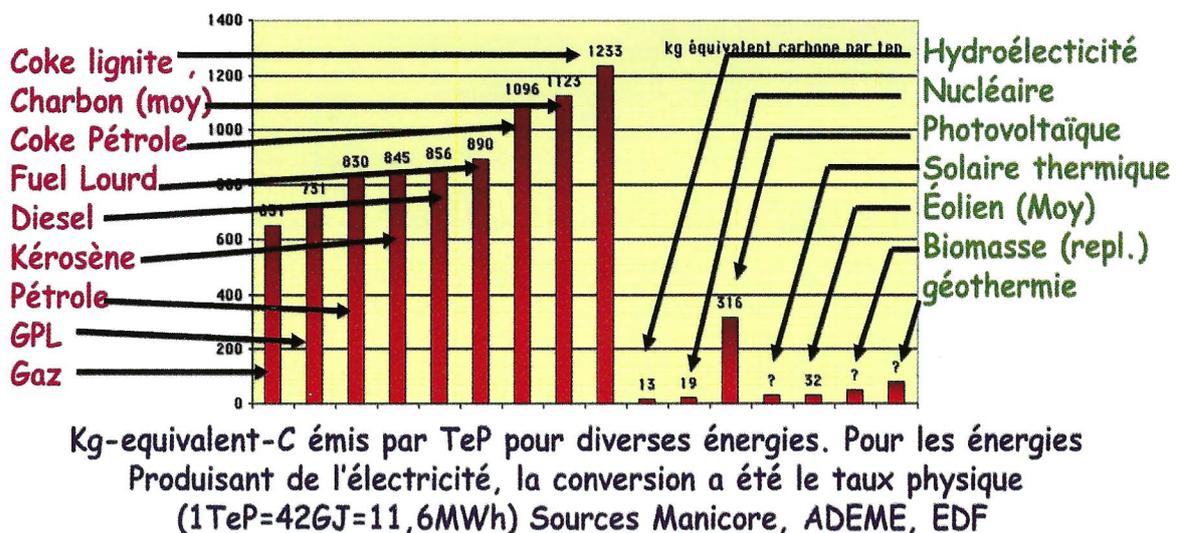
Des travaux sont également conduits sur le conditionnement des déchets et leur comportement à long terme. (Réf. 1)

Le nucléaire, une énergie très concentrée

- 1 réacteur nucléaire de 1GWé.an soit ~7TWh, c'est:
- 27t d'U enrichi à 3.2% par an et autant de déchets et seulement une tonne de noyaux fissionnés
- 1.8 Mt de pétrole et 5.4 Mt de CO₂
- 38 Gt d'eau sur 100m
- 4 000 éoliennes de 1 Mw soit 500 km² (sans stockage)
- 30 km² de cellules photovoltaïques (sans stockage)
- 210 km² de culture pour des biocarburants

Un réacteur nucléaire de 1 GWé.an fonctionnant à pleine puissance pendant 1 an fournirait 8,76 TWh. En réalité l'énergie annuelle fournie est plus faible car la centrale présente nécessairement des arrêts (rechargement du combustible ou incidents de fonctionnement). De plus elle ne marche pas toujours à pleine puissance, d'où une valeur estimée à environ 7 TWh.

Pourquoi le nucléaire Les gaz à effet de serre



L'effet de serre est un phénomène naturel identifié depuis près de 2 siècles et utilisé par tous les jardiniers : le sol, réchauffé par les rayons du soleil, réémet vers l'atmosphère du rayonnement infra-rouge (à la manière du corps noir de la thermodynamique).

La vapeur d'eau, l'anhydride carbonique (CO₂), le méthane, l'oxyde nitreux (N₂O) ... de l'atmosphère forment une couche qui fait office de « plaque de verre des jardiniers » en piégeant ces rayons infra-rouges. Il en résulte une augmentation de température de l'atmosphère et le maintien à la surface de la terre d'une température moyenne de 15°C.

Sans l'effet de serre elle serait de -18°C : l'effet de serre est donc nécessaire à l'apparition de la vie sur terre. La nouveauté tient aux modifications radicales apportées par l'extension de l'activité humaine (agriculture, industrie, production d'énergie). La concentration en CO₂ a augmenté de 30% depuis le début de l'ère industrielle. Aujourd'hui nous émettons annuellement 26 milliards de tonnes de CO₂, soit pas moins de 8 milliards de tonnes de carbone.

| Pays | Population (millions habitants) | Énergie Primaire (Mtep) | tep/habitant |
|-------------|---------------------------------|-------------------------|--------------|
| USA | 281 | 2 293 | 8.2 |
| Chine | 1 271 | 1 245 | 1.0 |
| Inde | 1 045 | 538 | 0.5 |
| Japon | 127 | 509 | 4.0 |
| Europe (15) | 403 | 1 470 | 3.65 |
| France | 60. | 258 | 4.3 |
| Monde | 6 071 | 10 200 | 1.67 |

La demande mondiale d'énergie.

Dans la perspective évoquée par cette page et celle d'une éthique de responsabilité, nous nous permettons de rappeler les quatre conditions détaillées en page 41 du N° spécial II d'Auvergne-Sciences de mars 2004 :

Sobriété énergétique : la direction de l'ADEME (Agence De l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie) estime que le choix d'appareils à basse consommation associé à la généralisation de l'éclairage performant dans les logements et le tertiaire permettrait d'économiser dès 2010 environ 15 TWh, soit l'équivalent de la production annuelle de deux centrales nucléaires de 1 GW !

Dans le même esprit d'économie : extension et utilisation rationnelle des transports en commun ; entretien régulier des chaudières (avec gain de 10 à 20 % d'énergie).

Globalement, il s'agit d'un effort continu à long terme (25 % des habitants de la planète consomment aujourd'hui 75 % de l'énergie mondiale).

Amélioration de l'efficacité de production : la « cogénération » permet la production conjointe d'électricité et de chaleur décentralisée. Cette cogénération peut être utilisée dans de nombreuses filières. Voir aussi GEN-IV et EPR.

Respect de l'environnement. Le tableau sur l'effet de serre (ci-dessus) est significatif quant aux énergies renouvelables. Il faut, dans un esprit éthique, veiller aux ressources menacées : le sol, la qualité des eaux ; il est tout aussi essentiel, quant aux déchets de tous ordres, de tendre à leur réduction (les tonnages mis en décharge ont augmenté de 244 % en 25 ans) et de développer les recherches visant à leur récupération énergétique.

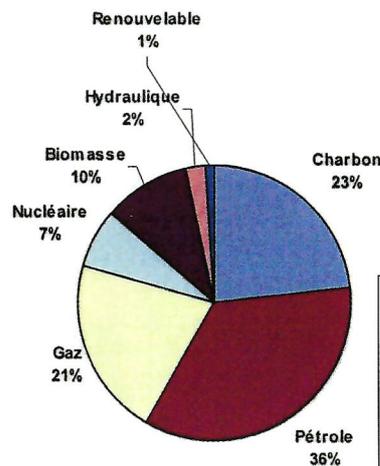
Solidarité internationale : pour une mondialisation cohérente et à visage humain des programmes énergétiques.

Le futur(2050) de l'énergie dans le monde

- Population **X 1.5**
- Rééquilibrage **Accroissement des besoins**
- Economies **Pour 1/4 de la population**
- Si 2tep/personne, il faudra 186tep au lieu de 106tep actuellement
- Il va donc falloir avant 2050:
- Accroître la ressource en diminuant la production de gaz à effet de serre
- trouver entre 7 et 136tep voire plus avec les renouvelables et le nucléaire

Ce que fait le nucléaire actuellement

- Dans le monde 7%
- En France ~30%
- Ce qui limite:
 - Le coût d'investissement
 - L'acceptabilité
 - Les déchets
 - Les ressources
 - Les rendements
- Croître nucléaire ~10, ~2 en France
Renouvelables >250 et plus en France

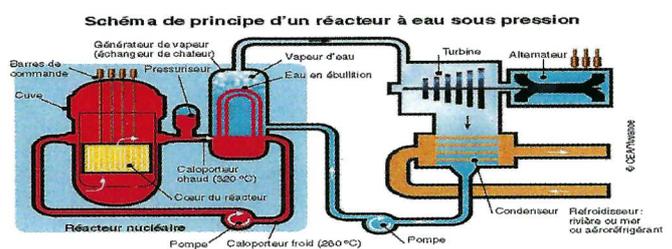


« eau ordinaire » ont des rendements réels de 33 %, ce qui veut dire que les 2/3 de la puissance thermique fournie par le réacteur servent à chauffer l'eau de refroidissement qui circule dans le condenseur, tandis que 33 % (1/3) est transformé en énergie électrique.

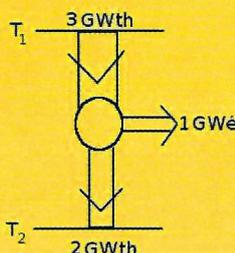
Ainsi une centrale de 1 GWé, d'un rendement de 33 % fournit 2 GWth à l'eau de refroidissement (soit 2 milliards de joules par seconde) (1 cal = 4.185 J). Le « refroidissement » de la centrale élève donc d'environ 10 °C un courant d'eau de 50 m³/s.

UN REACTEUR NUCLEAIRE actuel

- Cœur: combustible(~80t), modérateur, caloporteur
- Cuve et matériaux
- Echangeurs et systèmes de sécurité
- Utilisation électricité (Carnot 33%)
- A l'arrêt: énergie résiduelle = 10%



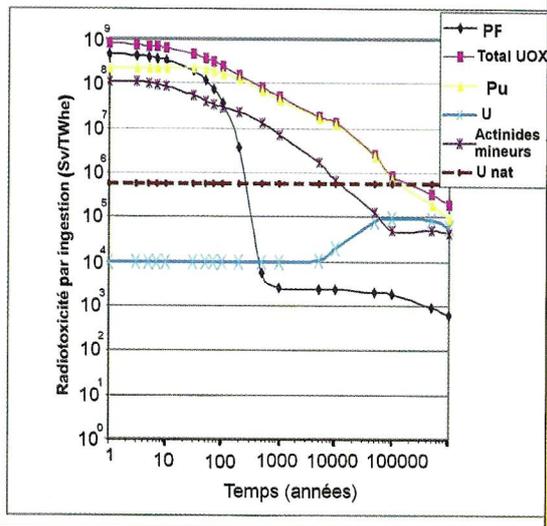
Commentaire de « Carnot 33% » : le rendement du cycle de Carnot, fonction des températures T_1 de la source chaude (fluide caloporteur) et T_2 de la source froide (eau de refroidissement) se calcule par l'expression $r = (T_1 - T_2) / T_1$ où T_1 et T_2 sont exprimés en degrés Kelvin ; r est le rendement maximum que l'on puisse atteindre dans un processus réversible.



Pour des raisons de résistance des matériaux constituant le cœur des réacteurs nucléaires la température T_1 du fluide caloporteur est inférieure à celle qui est obtenue dans une centrale classique. Les réacteurs nucléaires à

Les Déchets actuels

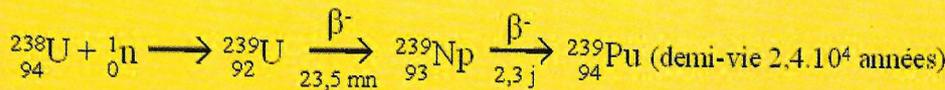
- **Les produits de fission (1t par Gwé.an)**
- **Les actinides**
- Dans un REP par an 27 000kg dont
- 25 700 kg d'Uranium(~1%)
- 270 kg de Plutonium
- 27 kg d'A.M.(Np, Am, Cm)
- 1 000 kg de PF (63 kg VL)
- Radiotoxicité dominée par le Pu
- **Les déchets technologiques**
- **La question: Pu déchet ou combustible actuel (MoX) et du futur pour démarrer les cycles futurs**



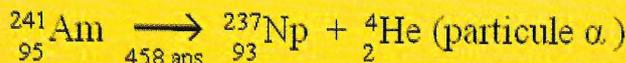
Les actinides : par définition les actinides sont des éléments de nombre atomique Z égal ou supérieur à celui de l'actinium (Z = 89).

Les actinides transuraniens sont engendrés dans les combustibles irradiés, le plus souvent par capture neutronique à partir de l'uranium 238 (élément fertile), ce qui est le cas du plutonium, de l'américium et du curium (en tant qu'éléments à vie longue). La capture neutronique, qui augmente la masse atomique d'une unité est associée à la radioactivité β^- qui fait avancer l'isotope d'une case dans la classification périodique, sans changer la masse.

Exemple :



Le neptunium 237, de demi-vie $2,1 \cdot 10^6$ années, fait exception : il résulte de la désintégration de l'américium 241 suivant la réaction :



Actinides mineurs (A.M.) : grâce à la « séparation poussée » on cherche à extraire les actinides mineurs - Neptunium (Np), Américium (Am), Curium (Cm) - qui présentent au sein des combustibles usés la radiotoxicité la plus élevée après le plutonium. Débarrassés du plutonium et de ces actinides mineurs, les déchets résiduels verraient leur radiotoxicité redescendre en quelques centaines d'années au niveau de la radiotoxicité de la masse de minerai d'uranium naturel dont ils sont issus.

Principaux produits de fission (PF) et leur demi-vie : ce sont essentiellement des émetteurs β et γ (cf tableau ci-dessous)

Radionucléides PF principaux (demi-vie)

| | | | |
|------------------------|-----------------------|-------------------------|-----------|
| Tritium (H 3) | 12 ans | Iode 131 (I 131) | 8 jours |
| Krypton (Kr 85) | 10,7 ans | Xénon 133 (Xe 133) | 5,2 jours |
| Strontium 90 (Sr 90) | 28 ans | Césium 137 (Cs 137) | 30 ans |
| Zirconium 95 (Zr 95) | 65 jours | Cérium 144 (Ce 144) | 285 jours |
| Ruthénium 106 (Ru 106) | 1 an | Prométhéum 147 (Pm 147) | 2,6 ans |
| Iode 129 (I 129) | $1,6 \times 10^7$ ans | | |

PF VL : Produits de fission vie longue

MoX : acronyme de « Mixed oxide », qui mélange étroitement $\text{UO}_2 + \text{PuO}_2$ à 2% en PuO_2 pour le recyclage du plutonium dans des réacteurs à eau légère. Le MoX rend le composant de Pu impropre à des fins militaires. Les travaux du CEA ont montré la capacité de l'EPR à « multirecycliser » le plutonium en utilisant un combustible MoX-uranium légèrement enrichi.

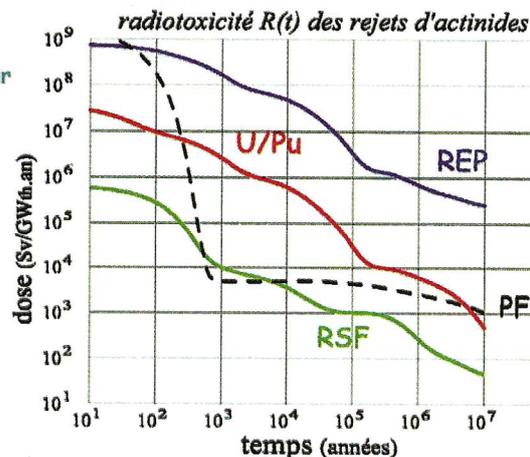
REP : réacteur à eau pressurisée (à uranium enrichi -généralement à 3%)

Sur le graphique, on trouve en ordonnées « Sv/TWhe » = Sievert par térawattheure. Le Sievert est la nouvelle unité d'équivalent de dose (pour un facteur de qualité FQ=1).

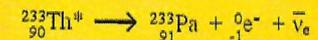
$$1 \text{ Sv} = 1 \text{ joule/kg} = 100 \text{ rem}$$

Les Déchets au futur

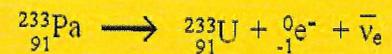
- Objectifs: Diminuer la quantité, la toxicité, la chaleur
- PF: rendement
- A.M.: diminuer la quantité et transmuter
- Pu: le gérer pour le nucléaire du futur = pas de multirecyclage en REP
- U disponible pour U/Pu
- Mettre au point des filières capable de transmuter au moins les actinides qu'ils produisent



RSF (réacteurs à sels fondus) : en projet. Régénérateur associé au cycle du thorium. Séquence



où le proactinium donne, après une période de 27,4 jours :



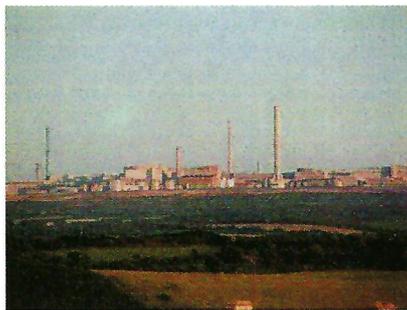
Le produit final ${}^{233}\text{U}$ est radioactif avec une période de 160 000 ans. Comme le plutonium 239, il est fissile, tandis que son « surgénérateur », le thorium 232 est « fertile ». Un tel générateur (en projet) utilise un combustible liquide (mélange de

fluorures d'uranium 233 et de thorium 232). Comme il circule, il fait en même temps office de « transporteur de chaleur » (caloporteur). Autre caractéristique intéressante : retraitement en continu, en ligne ou quasi en ligne.

Solution pratique : produire le thorium 233 à partir d'un réacteur à eau pressurisée utilisant partiellement du thorium 232 en place de l'uranium.

Ce que l'on veut en faire actuellement

- **USA, Suède, Finlande: stockage en l'état**
- **France, Japon, G.B., Allemagne: avec PUREX**
Séparation poussée: PF et A.M. dans les verres, Pu dans le Mox, U sur les étagères
- **La question: Que veut-on et que peut-on stocker (PF, Pu, AM)?**
- **Dépendra du futur du nucléaire**



Le procédé PUREX (Plutonium and URanium Extraction) : ce procédé chimique fut développé initialement par Herbert H. Anderson et Larned B. Asprey au Laboratoire de Métallurgie de l'Université de Chicago, au titre du projet Manhattan. Direction Glenn T. Seaborg. PUREX avait pour but premier d'extraire du combustible nucléaire le plutonium 239 servant à confectionner les bombes atomiques à partir de combustibles irradiés à très faible taux d'irradiation. Il a également fonctionné correctement pour le retraitement des combustibles jusqu'à des taux de quelques milliers de MWj/t (mégawatt.jour/tonne).

Le procédé PUREX est une méthode échangeuse d'ions par extraction liquide-liquide entre une phase aqueuse (eau + HNO_3) et une phase organique (tributylphosphate ou « TBP » à 30% dans du dodécane). Cette méthode permet d'extraire en premier lieu l'uranium et le plutonium, indépendamment l'un de l'autre et des autres constituants (actinides mineurs et produits de fission). Des étapes préalables sont nécessaires :

- Élimination des gaines par cisailage-dissolution par exemple
- Dissolution du combustible irradié dans l'acide nitrique.

Après cette étape on extrait les particules fines solides qui autrement perturberaient les processus d'extraction par le solvant « TBP » en altérant l'interface liquide-liquide. PUREX peut alors être mis en œuvre : le contact entre phase aqueuse et phase organique s'effectue dans des colonnes échangeuses. La phase organique, injectée en bas, monte par « effet de bouée ». Elle sera extraite par débordement. La phase aqueuse injectée par le haut descendra par gravité et sera soutirée en bas. Un brassage permanent par injection d'air comprimé provoque la formation d'émulsion.

Les produits de fission demeurent dans la phase nitrique aqueuse. Une fois récupérés ces produits de fission, l'étape suivante permet la récupération, ensemble ou séparément, du plutonium et de l'uranium.

L'extraction simultanée uranium-plutonium est favorisée via une haute concentration de l'acide nitrique tandis que l'extraction-retour simultanée ou « dés-extraction » (« stripping ») est favorisée par une basse concentration de l'acide nitrique.

Par contre, pour extraire séparément Pu du mélange Pu-U, il est possible d'utiliser un procédé « redox » dans lequel l'état d'oxydation est abaissé de IV à III par l'action d'un agent réducteur (nitrate d'uranium III ou nitrate d'hydroxylammonium).

Pu^{IV} est plus soluble en phase organique. Pu^{III} est plus soluble en phase aqueuse. Pu^{III} passe alors dans la phase aqueuse avec laquelle il a le plus d'affinité. On extrait alors U^{IV} de la phase organique (où il est resté seul) par le même procédé de stripping que précédemment.

La contamination inévitable, par irradiation, des produits de fission lors d'un cycle unique d'extraction rend nécessaire la répétition d'un tel cycle. Le premier cycle abaisse la radioactivité du mélange, ce qui permet aux cycles ultérieurs d'être nets en termes de produits de dégradation.

Les dernières étapes d'obtention de l'uranium et du plutonium sont « post-PUREX » et requièrent des procédés spécifiques. Les actinides mineurs (AM) et les produits de fission sont calcinés puis vitrifiés au sein d'une matrice inerte qui assure la stabilité physico-chimique des déchets. Le plutonium est disponible sous forme métallique ou oxyde PuO_2 et peut être utilisé conjointement avec l'uranium nécessairement appauvri (son enrichissement étant celui du combustible irradié). L'une des voies d'exploitation du plutonium et de l'uranium obtenus est la réalisation du combustible MoX. (Réf. 2,3,4)

Remarque : toutes ces opérations sur le plutonium soulèvent des problèmes de sécurité: le Pu239 est un puissant émetteur alpha et il faut veiller aussi aux risques de criticité (réaction en chaîne divergente). La masse critique du plutonium 239 est de 5 kg environ s'il est à l'état métal, 6 à 7 kg à l'état d'oxyde PuO_2 .

Que veut-on et que peut-on stocker (PF, Pu, AM) ? Ce qui dépendra du futur du nucléaire. Avant 2050, les quelques 440 réacteurs actuels entrés en exploitation à travers le monde entre 1970 et 1995 seront arrêtés. Ils devront être démantelés, comme le sont actuellement leurs aînés « première génération » de réacteurs civils. Ce démantèlement sera long et coûteux. A titre d'exemple, celui de Brennilis dans le Finistère a été commencé en 1985 et estimé à 482 millions d'euros. Des problèmes de stockage des déchets ont interrompu ce programme en juin 2007. **Quelle que soit la stratégie d'expansion du nucléaire civil - caractérisée à titre d'exemple par le GNEP (Global Nuclear Energy Partnership, partenariat global pour l'énergie nucléaire) lancé en février 2006 par cinq pays détenteurs de l'ensemble du cycle, jusqu'au retraitement : France, Chine, Japon, Russie et Etats-Unis, groupe auquel se sont joints en septembre 2007 onze nouveaux membres : Australie, Bulgarie, Ghana, Hongrie, Jordanie, Kazakhstan, Lituanie, Pologne, Roumanie, Slovaquie, Ukraine - le problème des déchets et de leur stockage reste entier.** Assurer l'immobilité des radio-nucléides et la stabilité d'un stockage géologique pendant des milliers d'années est un défi.

La France a adopté une démarche exigeante marquée par la création de l'ANDRA, la loi « Bataille » de 1991 sur le stockage géologique, prolongeant la loi N°75-638 du 15 juillet 1979 (article L.541 du code de l'environnement) et de ses décrets d'application : les principes de base étant la prévention de la production de déchets, la responsabilité des producteurs de déchets jusqu'à leur élimination, la traçabilité des déchets et la nécessité d'informer le public.

CAPACITÉ MONDIALE DE TRAITEMENT NUCLÉAIRE CIVIL (COMBUSTIBLE USÉ)

Combustibles de réacteurs à eau légère

- France, la Hague : 1700 tonnes/an
- Royaume-Uni, Sellafield (THORP) : 900 tonnes/an
- Russie, Ozersk (Mayak) : 400 tonnes/an
- Japon : 14 tonnes/an

Soit un total d'environ 3000 tonnes/an

Autres combustibles nucléaires :

- Royaume-Uni, Sellafield : 1500 tonnes/an
- Inde : 275 tonnes/an

Soit un total d'environ 1750 tonnes par an

TOTAL DES CAPACITÉS : 4750 TONNES/AN

(Réf. 5,6)

Dans le paragraphe « les déchets actuels » nous avons évoqué la « séparation poussée » et le cas des actinides mineurs. En France également, les travaux conduits par les équipes du CEA pour mettre au point les procédés de séparation poussée ont débouché sur des résultats très positifs : taux de séparation supérieurs à 99%. La phase de faisabilité technique a été conduite de 2002 à 2005.

Après séparation, les actinides mineurs pourraient être éliminés par transmutation, avec des configurations de réacteurs et de parcs adaptés. Des travaux sont également conduits sur le conditionnement des déchets et leur comportement à long terme. Un résultat marquant concerne les colis de déchets vitrifiés. Il montre que dans un stockage profond, 99% du verre serait toujours intact, même après 10 000 ans de contact avec l'eau. D'autres études montrent que certaines matières minérales ont une durabilité 100 fois supérieure à celle du verre.

Assurer l'immobilité des radionucléides et la stabilité d'un stockage géologique pendant des milliers d'années demeure une exigence pour les scientifiques.

En France l'entrée en exploitation, en 2025, du site de Bure, dans le sud de la Meuse, est fixée par la loi de juin 2006, si le bilan des recherches en 2012 le permet. D'ici à 2012, aux Etats-Unis, le site Yucca-Mountain, dans le Nevada, devrait recevoir quelque 77 000 tonnes de déchets. Mais l'évocation récente de la présence sous-jaçante de la faille géologique Bow Ridge met à nouveau à mal le projet sur le plan politique. (Réf. 7)

L'un des objectifs de l'EPR (European Pressurized Reactor), avec un cœur plus large, une puissance accrue de 1000 MWé à 1600 MWé, un rendement thermodynamique poussé à 36%, est de consommer moins de combustible et donc de produire moins de déchets.

Dans la perspective de la « quatrième génération », la France a exprimé un intérêt prioritaire, notamment pour le Réacteur à Sels Fondus (RSF) surgénérateur, et d'autre part « sobre et propre » : consommation de 100 kg de thorium par TWh, pour quelques grammes de plutonium et actinides mineurs envoyés aux déchets ultimes. De plus il n'est plus nécessaire d'extraire les actinides pour fabriquer du combustible neuf. L'incinération des déchets étant retenue comme prioritaire par le document final de Génération IV.

Toujours en vue de la 4^{ème} génération la France s'intéresse aux réacteurs à très haute température (Very High Temperature Reactor Systems - VHTR : 1000°C à 1200°C refroidi à l'hélium et dédié à la production d'hydrogène ou à la cogénération hydrogène/électricité) et au Réacteur à Neutrons Rapides, caloporteur hélium (Gas cooled Fast Reactor – GFR).

Enfin le Multiplicateur d'Énergie, proposé par Carlo Rubbia, prix Nobel de Physique, est un projet qui couple un réacteur à neutrons rapides en régime sous-critique avec un accélérateur de particules. Le combustible, le thorium 233, produit des neutrons rapides en nombre insuffisant. D'où le projet d'utiliser un accélérateur de protons dont la collision avec une cible de plomb située au cœur du réacteur fournit les neutrons supplémentaires.

Ce projet séduisant est à l'étude. Il répond à deux préoccupations :

- pas de production d'éléments radioactifs à vie longue
- pas de risque de fusion du cœur (l'arrêt de l'accélérateur entraînant l'extinction, en quelques secondes, de la réaction en chaîne).

Guinevere, maquette d'un projet d'incinération des déchets nucléaires : les deux composants de cette maquette du futur démonstrateur d'incinérateur sont fabriqués pour l'un, Genepi-3C, accélérateur de particules miniature, par l'IN2P3 du CNRS, pour l'autre, Venus-F, réacteur nucléaire, par le centre d'études nucléaires belge SCK-CEN de MOL. Ils vont être réunis à MOL. Guinevere apporte à la communauté des physiciens un banc d'expériences unique au monde, de la taille d'un collecteur de verre. Il permettra de tester à petite échelle la physique qui servira demain à incinérer une partie des déchets des centrales nucléaires, en particulier les déchets les plus dangereux dont les atomes lourds tels que le neptunium 237, du fait de la haute toxicité de leur radioactivité et de leur durée de vie importante (cf note page 22). L'objectif de l'incinération est de casser ces atomes en atomes plus légers, en les bombardant avec un flux de neutrons créé par le réacteur, lui-même piloté par l'accélérateur de particules. C'est ce dernier qui initie les réactions de fission dans le cœur du réacteur.

Guinevere est une maquette permettant l'étude de la neutronique, et défrichant le terrain du démonstrateur grandeur nature Myrrha qui devrait être construit à MOL avant 2023, prélude à un incinérateur de taille industrielle. Premier en son genre, Myrrha offrira une alternative au stockage des déchets ; il en éliminera certains. (Réf. 8,9)

RÉFÉRENCES

1 - REVUE GÉNÉRALE NUCLÉAIRE mars-avril 2002, N°2 page 28.
Philippe LECONTE CEA/DEN/DDIN.

2 - Le cycle du combustible nucléaire – Louis PATARIN – EDP SCIENCES 2002

3 - PUREX Wikipedia « the free encyclopedia »

4 - US patent 2924506, Anderson, Herbert H. et Asprey, Larned B in "Solvent extraction process for plutonium granted 1960-02-09"

5 - OECD/NEA 2004 Nuclear Energy Data – Nuclear Eng. International handbook 2004

6 - Wikipedia : traitement du combustible usé – [http://wikipedia.org/wiki/traitement du combustible](http://wikipedia.org/wiki/traitement%20du%20combustible)

7 - Camille Saüsset in « Objectif Terre 2050 » - La Recherche. Cahier spécial janvier 2008 N°415 p 57

8 - Xavier Muller. Journal du CNRS N°250 – novembre 2010; p 33

9 - Annick Billebaud. Unité CNRS/ Université Joseph Fourier / Grenoble INP

LES JEUNES POUSSÉS : PROGRAMME 2010-2011

Mercredi 29 septembre 2010

Rentrée – Sujet : micro-ondes

Principe et domaines d'application, exemples pour trouver la longueur d'onde

Mercredi 20 octobre 2010

Initiation à l'orientation avec utilisation de boussoles et GPS

Nota : apportez vos instruments si vous en possédez

Mercredi 17 novembre 2010

Initiation à l'astronomie avec le planétarium

Découverte des cadrans solaires

Mercredi 15 décembre 2010

Découverte visuelle et auditive de l'Orgue

(différentes sortes de tuyaux et de transmission, alimentation en air, résultat acoustique)

Mercredi 26 Janvier 2011

Géologie : étude des minéraux et examens microscopiques

09 février 2011

Orientation avec cartes, boussoles et GPS

Mise en pratique au Lac de Servières (ceux qui disposent de matériel peuvent l'apporter)

23 Février 2011

Petites voitures à hydrogène

16 Mars 2011

De la magie peut-être, de la physique sûrement ! (expériences de physique expliquant l'illusion d'optique, l'électricité statique, l'image virtuelle, la pression atmosphérique, la tension superficielle de l'eau, la dynamique de l'air, etc...)

Date à définir

Différents montages électriques

Date à définir

Microscopes, analyse du fonctionnement, applications

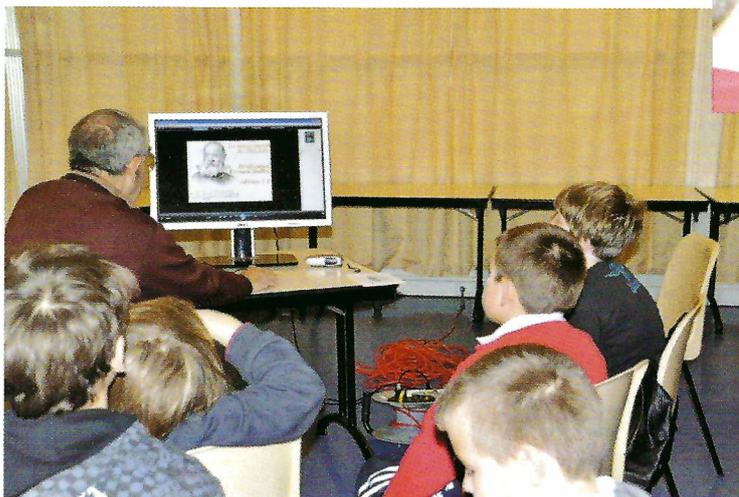
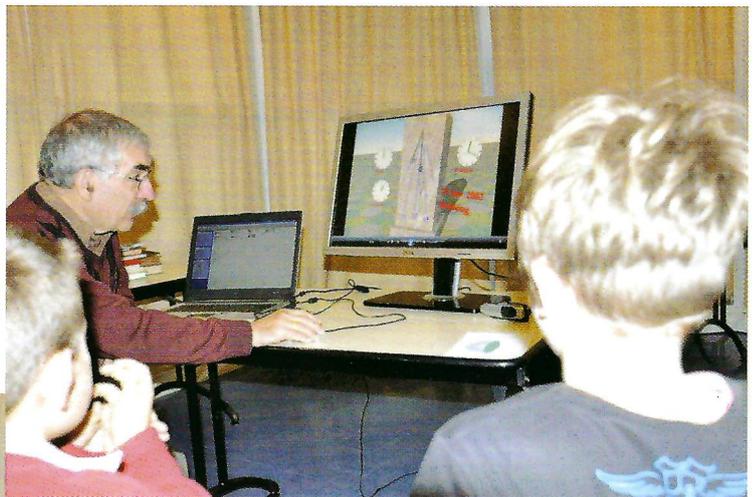
Eté

Principes des Eoliennes et application au plateau d'Ally

Application en salle sur petites éoliennes

Eté

Sortie Géologie/Minéralogie



Les Jeunes Poussés pendant la séance
« découverte du cadran solaire »

Les conférences du 1^{er} semestre 2011

(10 rue de Bien-Assis à Clermont-Ferrand)

Mercredi 12 janvier

17h30 - La thermodynamique - Jean-Karl Patten

Mercredi 16 février

17h30 - SPECIALE conférence-débat "Energies" M. Montcomble Secrétaire Général Français de l'Energie

Mercredi 16 mars

17h30 - Calcul d'une éclipse de soleil - Francis Aspor

Mercredi 20 avril

17h30 - Principe de Carnot ou pourquoi les centrales nucléaires réchauffent les fleuves - Jean Chandezon

Mercredi 18 mai

17h30 - De photosynthèses en respirations, les chemins de l'énergie dans les être vivants (végétaux, animaux, bactéries)
Michel Gendraud

Mercredi 22 juin

17h30 - Les cadrans solaires - Gérard Baillet



Sortie du 19 novembre 2010 à Issoire-Aviation

ADASTA

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 :

lundi de 14h à 18h, mercredi de 9h à 12h et de 14h à 18h, vendredi de 9h à 12h

En cas d'absence laisser message sur répondeur 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 - E-mail : adasta@wanadoo.fr - Site internet : www.adasta.fr