AUVERGNE Sciences

N° 50 - AVRIL 2001

LES INSTABILITÉS HYDRODYNAMIQUES

IMAGERIE MÉDICALE ET ISOTOPES RADIOACTIFS

LES PILES A COMBUSTIBLE

IMAGES ET PAROLES DE LOUIS LEPRINCE RINGUET

BULLETIN DE L'ADASTA

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

éditorial

Louis Leprince-Ringuet nous a quittés en décembre 2000. Physicien français né à Alès en 1901, il fut l'auteur d'innombrables ouvrages scientifiques. Il détermina entre autres la masse de plusieurs types de mésons et participa à la découverte des hypérons (particules instables de masse supérieure à celle du neutron.)

J.C Capelani

Le petit Robert dans son édition 2001 présente l'exposé des motifs qui auraient pu valoir au "Prince" le Prix Nobel de Physique.

Grâce à nos Maîtres à qui nous devons notre orientation scientifique : Les Professeurs Madeleine et Louis Avan Directeurs du Laboratoire de Recherche de Physique Corpusculaire de Clermont-Ferrand, nous avons pu côtoyer cet immense scientifique. Nous fûmes très impressionnés par son charisme, son sens humain, son sourire de scientifique hors du commun lorsqu'il présida une leçon inaugurale au Conservatoire National des Arts et Métiers de Clermont-Ferrand et assura également la Présidence de plusieurs thèses de Doctorat au Laboratoire de Physique Corpusculaire de Clermont-Ferrand, la centième thèse d'Ingénieur CNAM et une série d'examens généraux dont le souvenir nous restera gravé pour toujours.

Les grands traits caractéristiques de la vie et de l'œuvre scientifique de Louis Leprince-Ringuet sont connus des lecteurs et membres de l'ADASTA. Son humour a comblé des générations d'élèves, d'amis, d'auditeurs... pendant ses cours et conférences, ses inoubliables "quart d'heure" avec Pierre Desgraupes, et tout au long de ses ouvrages et de sa vie.

Que Madeleine et Louis Avan acceptent toute notre gratitude et notre profond respect pour avoir retracé pour l'ADASTA le magnifique article "Images et Paroles de Louis Leprince-Ringuet."

Les obsèques à Saint Germain des Prés furent paisibles, hautement musicales.

Hélène Carrère d'Encausse rappela sa joie de vivre, sa verve, son indépendance d'esprit, sa foi rayonnante, sa merveilleuse intelligence, sa simplicité, son sens de l'amitié, sa fidélité.

Avec tristesse, nous supprimons de nos fichiers son adresse qui nous permettait des échanges de courriers tout particulièrement lorsqu'il recevait le bulletin de l'ADASTA Auvergne-Sciences.

Référence : "Images et Paroles de Louis Leprince-Ringuet" par Madeleine et Louis Avan.

sommaire

Les instabilités hydrodynamiques 3
Imagerie médicale et isotopes radioactifs 8
Les piles à combustible 11
Images et paroles de Louis Leprince Ringuet 15
Parution d'ouvrage 20
Newton : contenu et arguments des principes 21
Nuages, pollution et climat 22
Une serre tropicale 24

Photo de Couverture : La serre Michelin (Photo Jean-Pierre Garcia)

Merci à nos sponsors

AUVERGNE CONSEIL RÉGIONAL D'AUVERGNE

volvic

VILLE DE CLERMONT FERRAND

MICHELIN

EDF Electricité de France

MINISTERE DE LA RECHERCHE ET DE LA TECHNOLOGIE

Comité de rédaction de la Revue Auvergne-Sciences

Président : Paul Avan - Rédactrice : Jocelyne Allée
Membres : Jean-Claude Capelani, Luc Dettwiller, Paul-Louis Hennequin, Roland Jouanisson, Michel Naranjo.

Adhésions et Abonnements

Adhésions à titre individuel	150 F - 22,87 €
Adhésions à titre collectif	500 F - 76,22 €
Membre bienfaiteur	1 000 F - 152,45 €

L'adhésion donne droit au service gratuit du bulletin et à des réductions sur les différents services rendus par l'Association (publications, stages, visites,...)

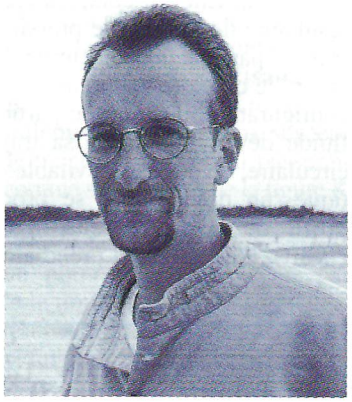
Permanences : L'A.D.A.S.T.A. a de nouveaux horaires d'ouverture : Lundi 14 H 00 à 18 H 00 ; Mardi 8 H 00 à 12 H 00, 14 H 00 à 17 H 00 ; Mercredi 8 H 00 à 12 H 00, 14 H 00 à 18 H 00 ; Jeudi 8 H 00 à 12 H 00, 14 H 00 à 17 H 00 ; Vendredi 8 H 00 à 12 H 00

Adressez le courrier à

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

Dossier

Les instabilités hydrodynamiques : elles sont partout



Ivan DELBENDE

Laboratoire d'Informatique pour la Mécanique et les Sciences de l'Ingénieur (LIMSI-CNRS), Maître de Conférences à l'Université Paris 6.

Quel point commun peut-il bien exister entre un robinet qui goutte, un drapeau qui flotte au vent, des nuages striant le ciel et le chant du vent dans les lignes à haute tension ?

Dans toutes ces situations, et bien d'autres encore où interviennent des fluides — liquides ou gaz — des ondes se manifestent sans qu'on les y ait invitées. Elles se forment par un phénomène d'instabilité qui vient modifier le mouvement et la forme du fluide.

Le filet d'eau qui coule du robinet se sépare en gouttelettes : la coupure est due aux ondulations qui se développent le long du filet depuis le robinet, dont la croissance est plus ou moins rapide suivant le débit du robinet.

POURQUOI ?

Pourquoi ces ondes apparaissent-elles ? Pour répondre à cette question, il faut examiner les différentes forces qui s'exercent dans chaque cas. Ces forces sont de nature diverse : forces capillaires, forces de pression, de viscosité, forces de gravité, de flottabilité (type Archimède), etc...
Le plus souvent, deux forces dominantes sont en compétition, l'une favorable au changement, qui tend à dévier le cours du fluide, et l'autre plus conservatrice, qui tend à ramener les écarts éventuels dans le droit chemin. L'instabilité naît d'une inversion du rapport de force au profit des forces du changement (et oui !).

Figure 1 : On a rarement l'occasion de le voir à l'arrêt. La séparation du filet d'eau en gouttelettes relève des instabilités hydrodynamiques (ici l'instabilité de Rayleigh) : de gauche à droite l'onde se développe jusqu'à la rupture.
Photo d'après Rutland & Jameson.

Les instabilités peuvent se manifester sous des formes très diverses, tant les situations que l'on rencontre, leur géométrie, la nature des fluides et les contraintes qui s'y exercent sont multiples. La complexité inhérente aux lois qui régissent le mouvement des fluides vient encore enrichir cette phénoménologie.

On propose ici une promenade à travers quelques expériences, académiques ou plus porteuses d'applications, dans le but d'illustrer les concepts fondamentaux de ce vaste domaine de recherche.

Prenons un exemple mécanique simple illustré *figure 2 :* un cerceau sur lequel peut coulisser un petit anneau pesant, situé en position basse quand le cerceau est immobile (a).

A faible vitesse de rotation (b), l'anneau reste en position basse, qui est une position d'équilibre stable. Si on l'écarte légèrement de cette position, il y revient car la force du changement, la force centrifuge, n'est pas suffisamment intense pour s'opposer au poids. En revanche, pour une vitesse de rotation plus élevée (c), la force centrifuge qui agit quand l'anneau bouge, même insensiblement, est suffisamment intense pour déplacer l'anneau vers une autre position d'équilibre, la position basse d'équilibre étant de ce fait devenue instable.

EXPERIENCE DE TAYLOR-COUETTE

Voici une expérience très similaire, mais dans un fluide : l'expérience de Taylor-Couette. Il s'agit d'un récipient cylindrique rempli de fluide visqueux (traditionnellement un mélange glycérol/eau, avec de la poudre d'aluminium pour visualiser l'écoulement), dans lequel est placé un cylindre de rayon inférieur que l'on met en rotation plus ou moins rapide *(voir figure 3).*

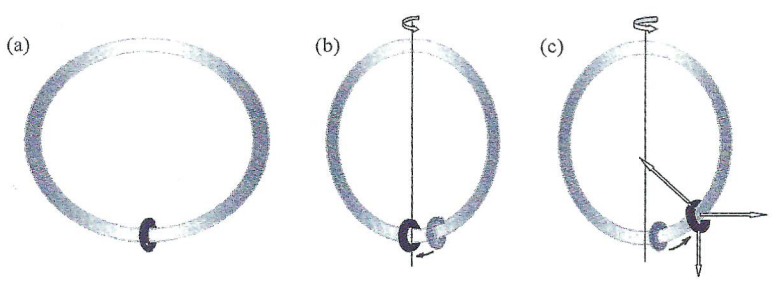


Figure 2

Le fluide est lui-même entraîné en rotation, et tourne plus rapidement près du cylindre central que sur sa périphérie. Dans le rôle du moteur de l'instabilité, nous avons la force centrifuge qui a tendance à projeter le fluide vers l'extérieur. Elle est contrecarrée par la résultante des forces de pression, centripète, par réaction du fluide " tassé" contre le cylindre extérieur. Dans cette configuration, dès qu'une particule du fluide dévie un peu de sa trajectoire circulaire, ce qui est inévitable en pratique, un déséquilibre se produit au profit de la force centrifuge (voir encart). L'écoulement prend alors l'allure de tourbillons toroïdaux, c'est-à-dire en forme d'anneaux, de sens de rotation alterné, comme ceux de la *figure 3*.

Imaginons que, sous l'effet d'une petite perturbation, une particule fluide s'écarte un peu de sa trajectoire circulaire vers l'extérieur : elle perd de la vitesse. En effet, par conservation du moment cinétique (vr=cte), la vitesse orthoradiale v de la particule diminue si sa distance à l'axe r augmente. La force centrifuge qui s'exerce sur cette particule, d'intensité proportionnelle à v^2/r, diminue. Si la force de pression que subit alors la particule diminue plus vite que la force centrifuge, la particule est incitée à s'écarter encore plus de sa trajectoire initiale : c'est le mécanisme de l'instabilité centrifuge. La résultante des forces de pression varie en $-V^2/r$ où $V(r)$ est la vitesse orthoradiale de l'écoulement qui entoure notre particule égarée. Le lecteur en manque d'équations montrera que l'on a instabilité si $V(r)/r+V'(r) < 0$. Dans notre cas, $V(r)= a (R_2^2/r-r)$ où a est une constante positive et où R_2 est le rayon du récipient extérieur, et l'on a effectivement $V(r)/r+V'(r) = -2a<0$.

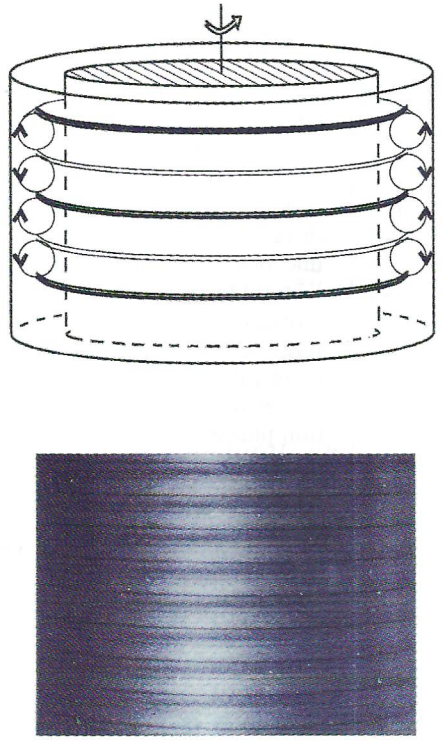
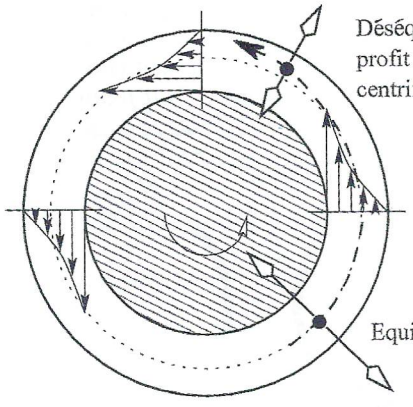


Figure 3 : Expérience de Taylor-Couette. Dispositif expérimental montrant également la géométrie des tourbillons toroïdaux, et photo de l'instabilité (photo d'après Koschmieder).



Le mécanisme proposé dans l'encart pour l'instabilité de l'écoulement de Taylor-Couette prévoit que la moindre rotation du cylindre intérieur suffit à déclencher l'instabilité.

Ce n'est en fait pas tout à fait ce qui se produit en pratique : l'instabilité n'apparaît que pour des vitesses de rotation suffisamment élevées.

Ce seuil provient de la prédominance des forces de viscosité qui stabilisent l'écoulement à fai-ble vitesse. La viscosité est d'ailleurs souvent (mais pas toujours !) un facteur stabilisant des flui-des en écoulement.

L'instabilité apparaît donc comme l'amplification naturelle de petites perturbations (toujours présentes dans la réalité) dans un écoulement de départ dit "écoulement de base ".

Comme la position basse d'équilibre de l'anneau pesant, l'écoulement de base est toujours possible théoriquement, mais jamais observé en pratique puisqu'il est instable.

L'onde apparaît progressivement : son amplitude croît tout d'abord exponentiellement, puis se fixe à une certaine valeur (on dit que l'instabilité " sature ", (*voir figure 4*). La longueur d'onde de cette instabilité, c'est-à-dire la largeur d'une paire de rouleaux contra-rotatifs, est ici deux fois l'espacement entre les cylindres.

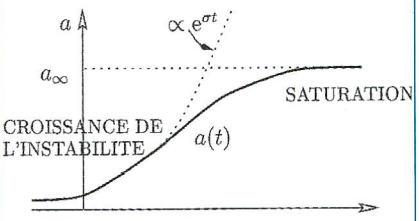


Figure 4 : Amplitude de l'onde en fonction du temps. Aux petites amplitudes, l'instabilité croît exponentiellement comme exp(στ), la grandeur σ constitue le taux de croissance de l'instabilité.

Cette dernière est tout d'abord imperceptible, puis devient visible à l'œil nu ; peu après, son amplitude se stabilise à une certaine valeur, l'instabilité "sature".

PRIMAIRE ET SECONDAIRE

Que se passe-t-il si l'on augmente encore la vitesse de rotation du cylindre intérieur ?

Expérimentalement, on observe que les anneaux tourbillonnaires se mettent à onduler le long de la circonférence *(figure 5)*. Les tourbillons toroïdaux ont donc été, à leur tour, victimes d'une instabilité ! : issus eux-mêmes d'une instabilité primaire, ils donnent lieu à une instabilité "secondaire".

Un tel enchaînement d'instabilités constitue l'un des scénarios admis de transition vers un état complètement désordonné, turbulent. Ici, on arrive à la turbulence en faisant tourner le cylindre intérieur encore plus vite.

Figure 5 : Instabilité secondaire dans l'instabilité de Taylor-Couette. Les anneaux ondulent le long de la circonférence (d'après Koschmieder).

DANS LES NUAGES ET LE CAFÉ AUSSI

Une instabilité très analogue, bien que de toute autre nature, apparaît quand on chauffe une couche de fluide par-dessous et qu'on la maintient à température constante par-dessus.

A partir d'une certaine différence de température imposée entre bas et haut, le fluide inférieur chaud, plus léger, remonte alors que le fluide supérieur froid, plus lourd, plonge. On obtient ainsi des rouleaux de convection de Rayleigh-Bénard *(figure 6)*.

Il se peut que les stries formées par les nuages par temps calme soient la manifestation de cette instabilité.

Signalons aussi l'instabilité de la tasse de café, appelée de manière plus technique l'instabilité de Bénard-Marangoni, qui apparaît quand on chauffe un liquide par-dessous, la surface supérieure étant à l'air libre.

Les fluctuations de température sur la surface libre provoquent des déséquilibres des forces de tension superficielle, et le fluide entre spontanément dans un régime de cellules de convection souvent hexagonales, au centre desquelles le fluide chaud monte et sur les bords desquelles il redescend.

Ce phénomène se déroule quotidiennement sous nos yeux dans une tasse de café ou de thé : le café brûlant chauffe la tasse, et quand il refroidit, c'est la tasse qui le chauffe par-dessous.

On arrive alors parfois à discerner à sa surface les parois des cellules de convection, moins régulières que sur la photo de la figure 7 cependant !

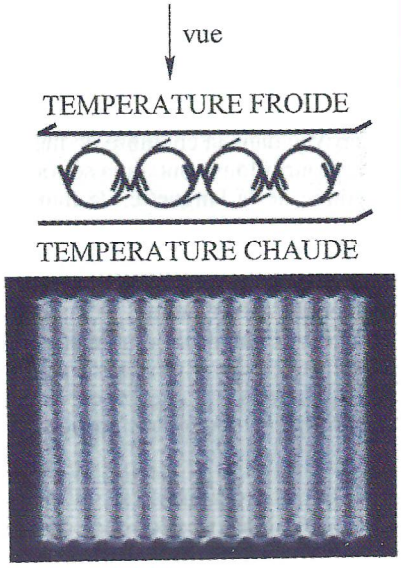


Figure 6 : Instabilité de Rayleigh-Bénard. Le fluide (gaz argon) est chauffé par-dessous et refroidi par-dessus. L'instabilité prend la forme de rouleaux vus ici par-dessus (cliché Croquette).

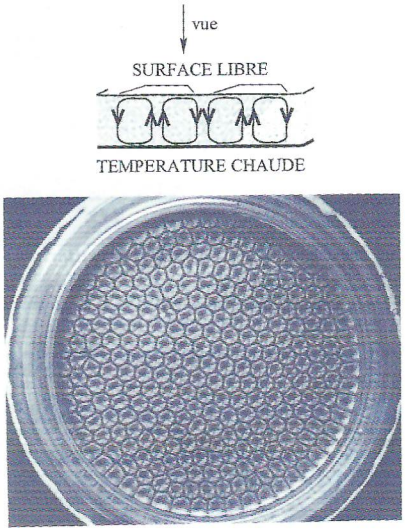


Figure 7 : Instabilité de Bénard-Marangoni. A la surface libre se dessinent les contours des cellules de convection hexagonales vues ici par-dessus (d'après Koschmieder & Pallas).

INSTABILITÉS DE CISAILLEMENT

Revenons aux nuages striant le ciel. Une instabilité d'un tout autre type peut s'en révéler la cause : si, en altitude, des couches d'air en contact sont animées de vitesses suffisamment régulières mais différentes, il résulte de ce "cisaillement" des rouleaux susceptibles de piéger le nuage qui passerait par-là, comme sur la photo de la figure 8. Ce type d'écoulement est une couche de mélange : le profil de vitesse présente un point d'inflexion (voir par exemple le profil de vitesse schématisé à l'extrémité droite de la figure 9), ce qui est favorable au développement d'instabilités sous forme de tourbillons d'axe perpendiculaire au plan du mouvement, qui portent le nom de tourbillons de Kelvin-Helmholtz. On peut domestiquer cette instabilité en laboratoire dans un tube horizontal rempli de deux liquides non miscibles (par exemple eau/pétrole). Quand on incline le tube, le fluide lourd se dirige vers l'extrémité basse du tube alors que le fluide léger est chassé en sens inverse, ce qui crée un " cisaillement" de vitesse (deux courants avec des vitesses différentes, ici opposées) dans la partie centrale du tube. L'instabilité se déclenche sous la forme de rouleaux où les deux fluides s'interpénètrent en s'enroulant l'un dans l'autre *(figure 9)*. C'est également le mécanisme qui conduit à la formation de la houle sous l'action d'un vent soufflant sur l'océan suffisamment longtemps dans la même direction.

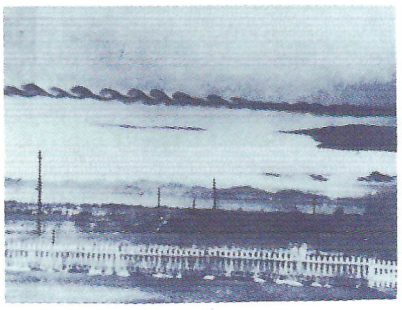


Figure 8 : Rouleaux de Kelvin-Helmholtz piégeant des nuages dans le ciel de Denver, Colorado (photo d'après Brantine).

Figure 9 : Instabilité de Kelvin-Helmholtz d'une couche de mélange dans un tube incliné (photo d'après Thorpe).

Cette instabilité a également une grande importance industrielle ou même dans la vie quotidienne, car elle permet le mélange efficace de deux fluides. A la différence du tube incliné, le mélangeur schématisé sur la figure 10 permet un mélange en continu, puisque des fluides y sont constamment introduits par la gauche, le mélange étant évacué vers la droite. Ceci conduit à distinguer la croissance de rouleaux dans le temps (tous en même temps : instabilité temporelle, c'est le cas du tube) et la croissance de rouleaux dans l'espace (toujours au même endroit : instabilité spatiale, c'est le cas du mélangeur).

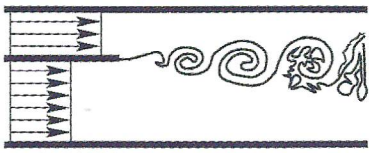


Figure 10 : Schéma de principe du mélangeur. L'instabilité croît ici dans l'espace de gauche à droite à partir de l'entrée dans la chambre de mélange : l'instabilité est dite spatiale.

LES GRANDEURS CARACTÉRISTIQUES DES INSTABILITÉS

Une instabilité temporelle se développe de manière simultanée dans tout le volume favorable à son épanouissement : elle se caractérise par un taux de croissance temporelle σ, une célérité c, et un nombre d'onde k suivant la direction x. L'amplitude $a(x,t)$ évolue comme $\exp[i(k(x-ct))]. \exp(\sigma t)$. Pour Taylor-Couette, $c = 0$, l'instabilité est stationnaire : les rouleaux ne se déplacent pas en x.

Une instabilité spatiale, comme son nom l'indique, se forme dans l'espace, à partir d'un endroit pris comme origine : elle se caractérise par un taux de croissance spatiale k, un nombre d'onde k, et une vitesse de phase c.

L'amplitude $a(x,t)$ évolue comme $\exp[i(k(x-ct))]. \exp(\kappa x)$. Pour le mélangeur, c est la vitesse moyenne des deux fluides qui entrent en contact : c'est la célérité de déplacement des tourbillons de Kelvin-Helmholtz.

AMPLIFICATEURS ET OSCILLATEURS

Supposons qu'on fasse battre la languette qui sépare les deux courants à leur arrivée dans la chambre de mélange : les tourbillons vont alors se former au rythme de la languette, de manière plus ou moins efficace suivant que le tempo imposé à la languette est proche ou éloigné de la fréquence "naturelle" de la couche de mélange. La couche de mélange se comporte comme un véritable filtre vis-à-vis des perturbations qui entrent dans le mélangeur : certaines fréquences y sont amplifiées, les autres sont atténuées.

A l'opposé, certains écoulements comme les sillages[1] d'obstacles ronds ou carrés génèrent une allée de tourbillons alternés, l'allée de Von Karman *(figure 11)*, beaucoup plus régulière que la couche de mélange. La fréquence de ces tourbillons, pour un obstacle donné, est très bien définie, et peut être utilisée pour mesurer la vitesse du fluide incident (d'où une application immédiate pour mesurer la consommation d'eau !). Contrairement à la couche de mélange, il est impossible de forcer ce sillage à une autre fréquence, il ne se comporte pas en amplificateur du bruit incident, mais en véritable oscillateur hydrodynamique. L'étude théorique de ce système est très complexe et la prédiction de la fréquence des tourbillons en est encore un challenge, même si le phénomène est fondamentalement compris : il existe juste à l'aval de l'obstacle une poche résonante qui tient lieu d'excitateur et qui est à l'origine de la formation de l'allée tourbillonnaire.

Ce phénomène est à l'origine du chant des câbles dans le vent, utilisé pour la harpe éolienne par exemple. La génération de ces tourbillons est très robuste et persiste même en régime turbulent, comme l'illustre la catastrophe de la figure 12.

(1) Zone abritée à l'aval de l'obstacle, où le fluide est moins rapide qu'ailleurs et éventuellement remonte à contre-courant. Cette situation provoque un profil de vitesse à deux points d'inflexion qui se déstabilise sous la forme d'une allée de tourbillons alternés très réguliers.

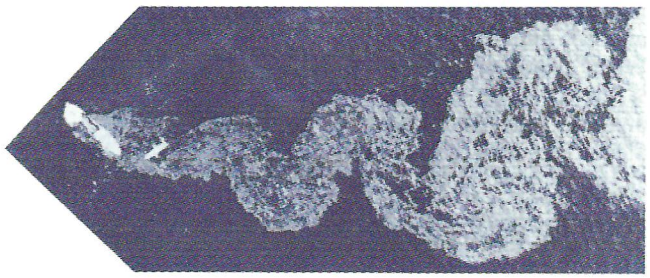


Figure 12 : Allée de tourbillons alternés en régime turbulent, rendue visible à l'aval d'un pétrolier échoué par la fuite d'hydrocarbures en 1976 (d'après Griffin).

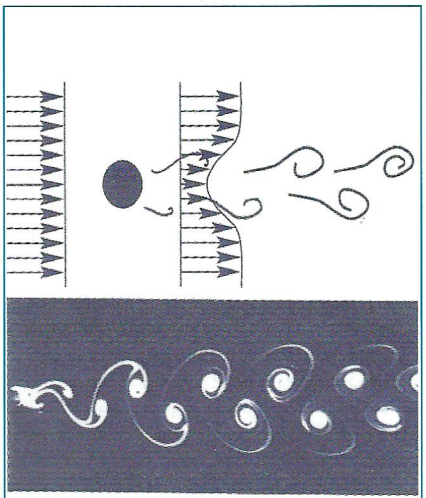


Figure 11 : Instabilité de Bénard-Karman. L'écoulement va de gauche à droite.
A l'aval du cylindre se forme une superbe allée de tourbillons alternés (d'après Taneda).

CONTRÔLE DES INSTABILITÉS

Alors, utiles ou nuisibles, les instabilités ? L'instabilité de Kelvin-Helmholtz sert au mélangeage, l'allée tourbillonnaire de Von Karman fait chanter les câbles électriques, les rouleaux de Rayleigh-Bénard et les cellules de Bénard-Marangoni accélèrent les transferts de chaleur en mettant le fluide en mouvement de convection.

Dans certains cas, on souhaite les supprimer, par exemple quand elles induisent des vibrations par leur couplage avec des structures solides : c'est à un tel couplage que l'on doit l'effondrement de plusieurs ponts, le plus célèbre étant celui de Tacoma Narrows en 1940 *(figure 13)* ;

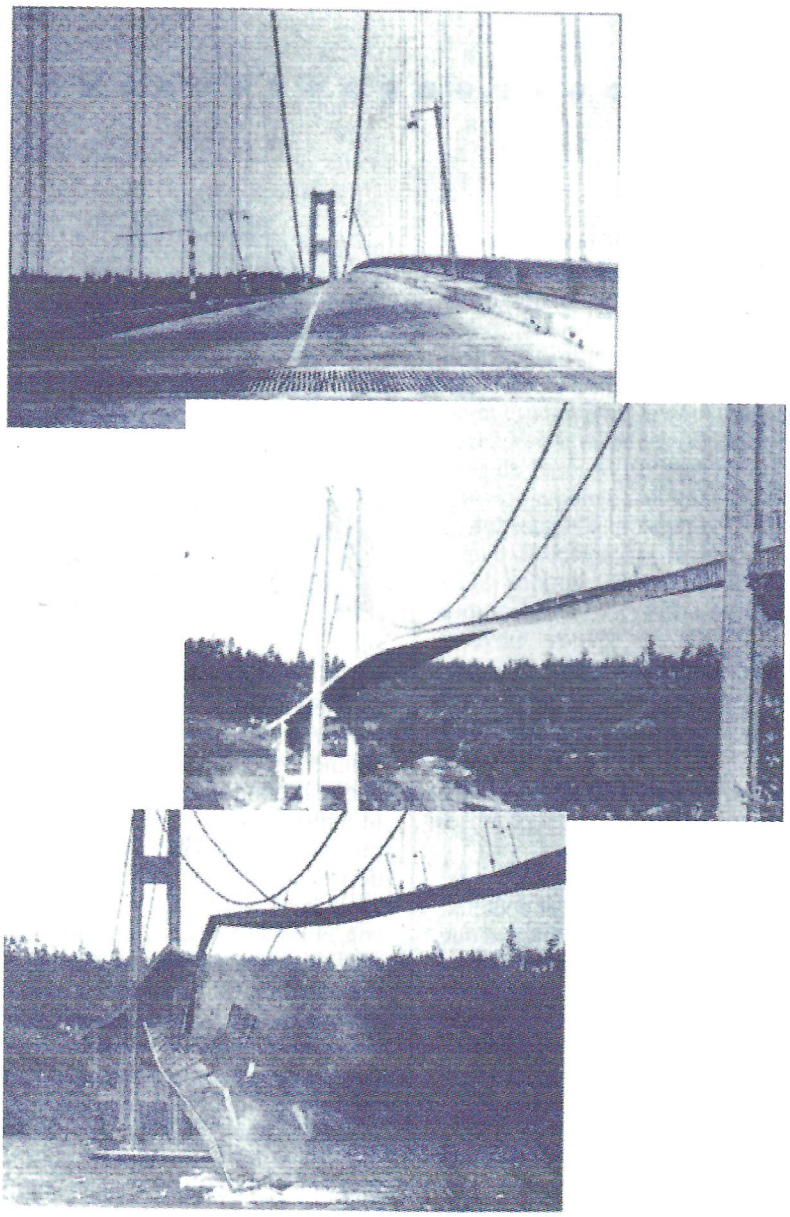


Figure 13 : Déformation du pont de Tacoma Narrows quelques mois après son ouverture en 1940. Une instabilité résultant d'un couplage fluide/structure est à l'origine de cette catastrophe. On peut y remédier en profilant le tablier du pont, mais là c'était trop tard.

le problème se pose également au niveau des tubulures des centrales nucléaires.

Dans d'autres cas, on souhaite les promouvoir, sur les ailes d'avion, par exemple, où elles réduisent indirectement la résistance de l'avion à l'avancement.

En effet, les instabilités qui s'y développent, que nous n'avons pas évoquées ici et qui sont dues aux forces visqueuses, rendent l'écoulement turbulent le long de l'aile.

Cet effet est positif car il réduit globalement la traînée de l'aile en évitant au fluide de se séparer de la paroi, même si, localement, le frottement est plus important. Décrire et comprendre les instabilités permet donc de les contrôler, soit passivement, soit activement.

Les nouvelles technologies des MEMS, les systèmes électro-mécaniques microscopiques permettent de concevoir des micro-capteurs, des micro-pompes, des micro-volets, etc...

Elles devraient permettre, dans le futur, par une action fine et distribuée sur l'écoulement, de contrôler ce dernier, pour provoquer telle ou telle instabilité, ou au contraire, l'annihiler.

EXEMPLE EXOTIQUE

Instabilité de la fumée de cigarette *(figure 14)* : elles sont vraiment partout.

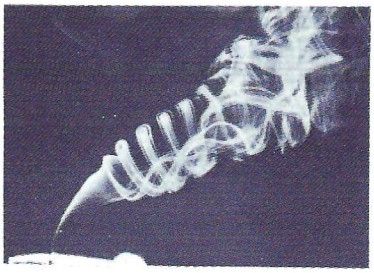


Figure 14 : Panache d'une cigarette. L'instabilité de la nappe chaude ascendante prend la forme d'une échelle de tourbillons très réguliers (photo Perry & Lim). Amplificateur ou oscillateur ?...

POUR EN SAVOIR PLUS

Une introduction aux instabilités dans l'excellent livre de mécanique des fluides: *Hydrodynamique Physique,* de J.P. Hulin, E. Guyon et L. Petit. Collection Savoirs Actuels, InterEditions-CNRS, 1991. De nombreuses photos de cet article sont tirées de l'ouvrage indémodable *An Album of Fluid Motion,* de Van Dyke. The Parabolic Press, 1982.

La bible des instabilités, pour les spécialistes : *Hydrodynamic stability,* de P.G. Drazin & W.H. Reid. Cambridge University Press, 1993.

Celle des instabilités dans les écoulements ouverts : *Hydrodynamic instabilities in open flows,* de P. Huerre & M. Rossi. Chapitre de l'ouvrage *Hydrodynamics and Nonlinear Instabilities,* édité par C. Godrèche and P. Manneville. Cambridge University Press, 1998.

Dossier

Imagerie médicale et isotopes radioactifs

Professeur Jean MAUBLANT

Chef du service de Médecine Nucléaire
au Centre Jean-Perrin - Clermont-Ferrand

Summary

Nuclear medicine is a fast growing technique in medical imaging. It is based on the administration of a radiolabelled gamma-emitting molecule, which distributes inside the patient organism as a function of its metabolism. Dedicated detectors called gamma cameras provide an image of this distribution on a scintigraphy. Recent technological developments allow a better localisation of new tumor - avid agents. In the forefront of these evolutions are positron emitting agents, which open new promises in the diagnosis and treatment of cancer.

PROGRÈS EN MÉDECINE NUCLÉAIRE

Introduction

La médecine nucléaire est une spécialité médicale à part entière basée sur l'utilisation de substances radioactives. Moins connue car plus récente que la radiologie ou la radiothérapie, elle est surtout utilisée dans un but de diagnostic (identification de la maladie) mais elle est appelée à jouer un rôle de plus en plus important en thérapeutique (traitement de la maladie). Dans les deux cas, le principe de base reste le même : une substance radioactive se concentre dans un organe ou un tissu particulier ; les rayonnements qu'elle émet sont utilisés soit pour réaliser une image de la distribution de cette substance dans l'organisme, image appelée scintigraphie, soit pour irradier ce même tissu ; on parle alors de radiothérapie métabolique.
La présentation de deux développements récents et très prometteurs de la médecine nucléaire, l'imagerie par émetteurs de positons et la détection peropératoire, sera sans doute plus aisée si un bref rappel sur les radiotraceurs est préalablement réalisé.

Dans la pharmacopée, les traceurs radioactifs utilisés en médecine nucléaire composent la classe des radiopharmaceutiques. A ce titre, ils sont soumis à la même réglementation que tout médicament, en particulier au niveau des tests, fort longs et coûteux, nécessaires pour la délivrance d'une autorisation de mise sur le marché.
Les radiotraceurs sont composés au minimum d'un radioélément artificiel en solution ou sous forme gazeuse ; plus généralement le radioélément est fixé chimiquement à un vecteur.
Le radioélément idéal pour l'imagerie doit présenter une émission gamma pure pour limiter l'irradiation (il faut éviter les bêta et les alpha), une énergie d'émission suffisamment élevée pour qu'une proportion suffisante des photons émis puisse franchir les tissus et être détectée sans encombre, une période suffisamment courte pour limiter l'irradiation du patient, mais suffisamment longue pour permettre l'enregistrement des images, enfin un comportement chimique autorisant l'établissement de liaisons chimiques avec les vecteurs. Il faut enfin que la production ne soit pas trop onéreuse. Toutes ces conditions font que le nombre de candidats retenus est faible, comme indiqué dans le tableau I. Il est aussi à noter que ces éléments sont " lourds " par rapport aux principaux éléments constitutifs des molécules biologiques (carbone, oxygène, azote, hydrogène).

Parmi ces radioéléments artificiels, le technétium-99m présente le meilleur compromis vis-à-vis des propriétés énumérées ci-dessus. Toutefois, même dans ces conditions, le patient chez qui le radiotraceur est administré est soumis à une irradiation dont le niveau doit être maintenu à une valeur suffisamment faible pour que tout risque soit éliminé. En se calant sur les données historiques, épidémiologiques et expérimentales, il apparaît que la dose efficace ne doit pas dépasser quelques dizaines de millisieverts (mSv). Pour respecter cet objectif, et compte tenu de la cinétique des radiotraceurs en médecine nucléaire, les activités administrées sont généralement comprises entre 30 et 1000 mégabecquerels (MBq). Comme chaque désintégration n'émet au maximum qu'un seul photon gamma utile (les autres émissions sont d'énergie trop faible), il en résulte que le flux de photons issu du patient n'excède jamais un milliard par seconde. Ce chiffre peut paraître élevé mais il ne correspond en fait qu'à une très faible fraction du flux de photons utilisé en radiologie (qui est 10^{12} fois plus élevé).
Une des difficultés de l'organisation de la médecine nucléaire est l'approvisionnement en ces radioéléments artificiels. Leur fabrication est assurée soit en réacteur nucléaire, soit en cyclotron. Le technétium-99m présente la particularité et l'avantage de pouvoir être produit dans un petit générateur portable par filiation d'un produit de réacteur, le molybdène-99.

Tableau 1. Principaux radioéléments artificiels utilisés en imagerie scintigraphique

Radioélément	Période	Energie maximale des gamma
Technétium-99	6 heures	140 keV
Iode-131	8 jours	360 keV
Indium-111	2,8 jours	247 keV
Thallium-201	73 heures	80 keV

Les émetteurs de positons

Une des évolutions les plus importantes de la médecine nucléaire est l'avènement de la tomographie par émission de positons (TEP). Cette technique est basée sur l'administration d'un radiopharmaceutique marqué par un émetteur de positon ("électron positif").
Les émetteurs de positons sont des radioéléments artificiels produits en cyclotron par bombardement d'une cible contenant un élément chimique stable avec des particules chargées, typiquement des protons. Par exemple, le bombardement d'atomes d'oxygène-18 par un flux de protons d'une énergie d'environ 15 MeV provoque, par l'absorption de protons, l'apparition de noyaux de fluor-18. Ce proton, qui est alors excédentaire au niveau nucléaire, subit une transformation de type : $p \rightarrow e^+ + n$. Le positon (e^+) est émis avec une énergie cinétique qui se dissipe au cours d'une série d'interactions avec des électrons du milieu et qui lui permet de parcourir 1 à 3 mm dans les tissus. Lorsque son énergie cinétique est faible, sa rencontre avec un électron provoque une réaction d'annihilation. Les deux particules disparaissent et leur équivalent en énergie est émis sous forme de deux photons isoénergétiques qui partent en opposition à 180° l'un de l'autre. L'énergie de chaque photon (511 keV) peut être prévue en prenant pour base de calcul la masse de l'électron, qui est également celle du positon. C'est là une particularité des émetteurs de positons. Les photons gamma qui marquent indirectement leur présence sont émis par paires et ont toujours une énergie fixe de 511 keV, et cela quel que soit le radioélément en cause. De cette singularité découlent les caractéristiques des détecteurs. D'une part on cherche à mettre à profit l'émission de paires en opposition, ce qui implique des détecteurs comportant au minimum deux surfaces sensibles, d'autre part l'énergie des photons à détecter est au-delà du domaine habituel de l'imagerie scintigraphique (qui est limité au 360 keV de l'iode-131), ce qui implique une augmentation de l'épaisseur des cristaux scintillants. Ces deux éléments aboutissent à un détecteur dont à la fois la surface et le volume sensibles sont plus importants qu'en imagerie scintigraphique conventionnelle, ce qui retentit directement sur le coût de ce détecteur.
Mais pourquoi rechercher de telles complications ? La principale raison du succès des émetteurs de positons est en fait une pure conséquence de la nature physique du phénomène. En effet, parmi tous les isotopes possibles (plus de 1500), les émetteurs de positons se rencontrent préférentiellement parmi les éléments légers, les plus favorables étant indiqués dans le tableau 2.

Tableau 2. Principaux émetteurs de positons pour l'imagerie TEP

Radioélément	Période
Oxygène-15	2 minutes
Azote-13	10 minutes
Carbone-11	20 minutes
Fluor-18	110 minutes

Or nous avons vu dans le tableau 1 que tous les émetteurs de gamma utilisés en imagerie sont des éléments lourds. Pourquoi est-il important de pouvoir disposer d'émetteurs légers plutôt que d'émetteurs gamma lourds ? C'est là un point crucial pour le développement de la médecine nucléaire. En effet le principe de base de cette technique est de pouvoir amener par voie métabolique la substance radioactive, émettrice du signal détectable, au niveau de la cible. Cela suppose donc qu'une molécule radiomarquée est utilisée. Mais pour pouvoir trouver de nouvelles molécules, il est évidemment hautement plus rentable de chercher à marquer des molécules dont on connaît la structure et le métabolisme que de s'en remettre au hasard d'une recherche sans but précis...

Le fluorodésoxyglucose marqué au F-18

Le glucose est une importante source d'énergie pour le métabolisme cellulaire. Il se concentre dans des tissus normaux comme le cerveau et le myocarde, mais aussi dans de nombreuses tumeurs, d'où l'intérêt potentiel pour l'imagerie de pouvoir disposer d'un glucose radiomarqué.
Le plus simple serait évidemment de marquer le glucose avec un émetteur gamma du type de ceux du tableau 1. Les chimistes savent faire cela parfaitement bien, par exemple avec de l'iode-131, mais la greffe d'un tel atome sur cette molécule, dont la masse molaire est de 180 g, modifie profondément sa structure. L'organisme est capable de distinguer les deux types de molécules et, en pratique, l'iodo-glucose ne suit pas du tout les voies métaboliques du glucose (il est en grande partie éliminé par le foie). Ce problème a pu être en grande partie résolu par le marquage du glucose avec le fluor-18, dont le produit est dénommé fluorodésoxyglucose (FDG). Cette molécule suit le début du métabolisme glucidique avant de se retrouver piégée sous une forme très lentement dégradable dans les cellules qui l'ont abondamment captée. En pratique, comme indiqué plus haut, le fluor-18 est produit dans un cyclotron, instrument généralement géré par un industriel. Sa période physique de 110 minutes oblige à une production en "flux tendu", le produit ne pouvant pas être stocké. La fabrication dure environ une heure, temps durant lequel une cible est bombardée par des protons. Il faut ensuite isoler chimiquement le fluor-18 du reste de la cible puis procéder au marquage du glucose. Cette opération est complexe car il s'agit en réalité d'une véritable synthèse de la molécule de FDG. Des automates permettent de s'assurer de la parfaite reproductibilité du processus, qui prend environ une heure également. Viennent enfin les phases de calibration, de conditionnement en doses individuelles, de contrôle de qualité de la solution injectable et d'expédition. La durée du transport jusqu'au service hospitalier utilisateur ne doit pas excéder deux heures afin de préserver la qualité de la préparation. L'activité administrée au patient est d'environ 370 MBq (10 mCi).
Les premiers pas de l'application en routine du FDG sont en train de s'accomplir dans les pays occidentaux. Il est utilisé dans un certain nombre de cancers (poumons, colon, rhino-pharynx, mélanome, lymphomes). Plusieurs hôpitaux français cherchent à s'équiper de cette technique, dont le Centre Jean Perrin à Clermont-Ferrand.
La problématique évoquée dans ses grandes lignes à propos du FDG est identique pour toutes les petites molécules, en particulier pour les petits peptides d'intérêt biologique. Le marquage par un des radioéléments émetteurs de positons du tableau 2 modifie peu ou pas la structure de ces petites molécules. Les émetteurs de positons constituent donc un outil irremplaçable pour le radiomarquage des petites molécules à intérêt médical. Leur disponibilité représente une ouverture exceptionnelle vers le développement de nouveaux radiotraceurs spécifiques pour l'imagerie, ouvrant peut-être aussi la voie à des molécules ayant une activité thérapeutique. Cette spécificité peut concerner en particulier les nombreux récepteurs membranaires à l'origine de la transmission des signaux entre cellules et impliqués dans de nombreuses maladies. C'est ainsi que la TEP a, en laboratoire, permis de mettre en évidence des altérations de la fonctionnalité de récepteurs neuronaux dans plusieurs pathologies psychiatriques. Il s'agit dans ce domaine de la seule atteinte organique objective, observable et mesurable. Il est permis de penser que la TEP jouera un jour un rôle capital pour prendre des décisions thérapeutiques souvent graves dans cette discipline où les décisions restent à l'heure actuelle souvent basées sur des impressions plus que sur des faits mesurables.

Les caméras à positons.

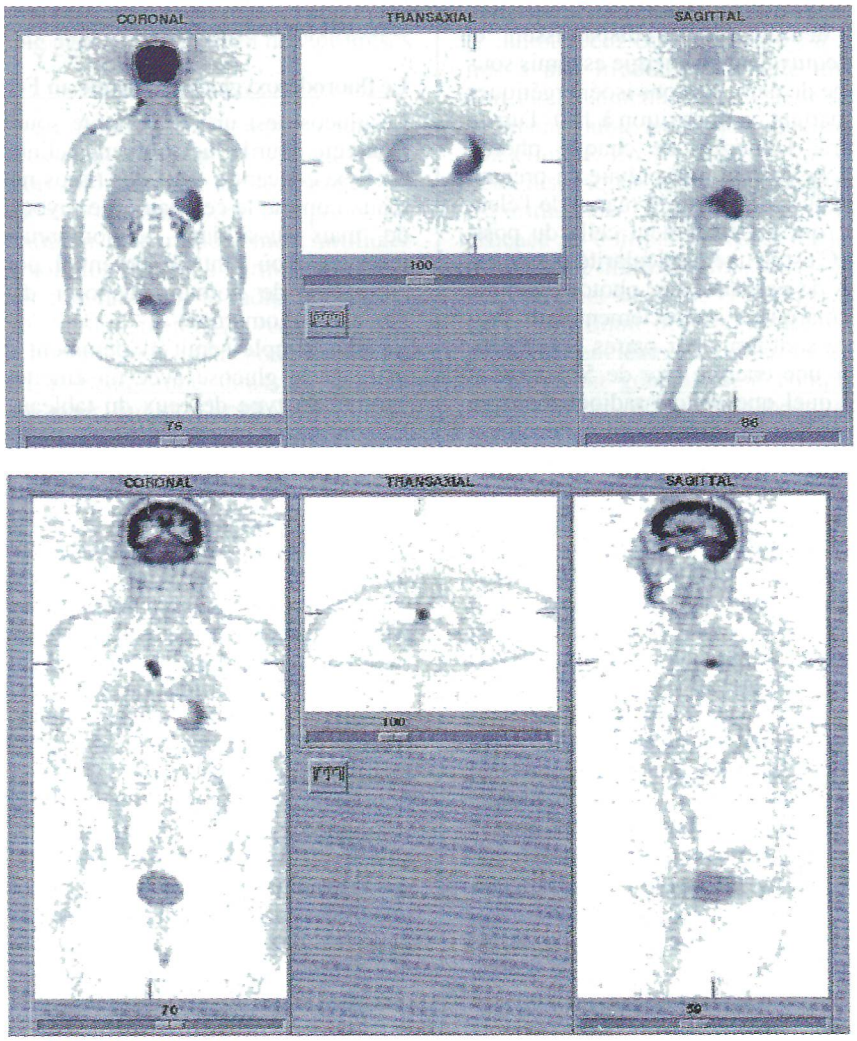
La détection des gamma issus d'un émetteur de positons peut être assurée par deux types de détecteurs. Le plus simple et le moins onéreux est une caméra à scintillation "classique" équipée de deux têtes placées en opposition

et comportant un cristal épais (2 cm). Ce type de détecteur appelé "caméra à détection de coïncidence" , ou caméra hybride, ou caméra CDET (pour "coïncidence détection émission tomographie") présente l'avantage de pouvoir être également utilisée indifféremment pour l'imagerie scintigraphique classique comme pour la TEP ; son principal inconvénient est que son faible taux de comptage n'autorise pas la réalisation de mesures de fixation absolue du traceur (les valeurs mesurées sont trop imprécises).
L'autre option est la caméra dédiée pour la TEP. Elle est formée de plusieurs anneaux adjacents comportant chacun plusieurs centaines de petites surfaces sensibles (cristal et photomultiplicateur). Les performances sont élevées, avec une résolution spatiale de 3 à 4 mm et une sensibilité de 50 000 événements détectés par kBq de traceur. Le coût est en proportion, environ quatre fois celui d'une caméra CDET.

La détection peropératoire

Un autre domaine en plein développement, situé à l'autre extrémité de la gamme des détecteurs à scintillation en terme de coût et de complexité, est celui de la détection des photons gamma en cours d'intervention chirurgicale par une sonde de détection peropératoire.
Ce nouveau progrès a pour origine la technique de détection du ganglion sentinelle. Il s'agit d'une méthode relativement simple de repérage du premier ganglion lymphatique drainant une tumeur. En administrant en périphérie de la tumeur un radiotraceur de type nanocolloïdes, qui est entraîné de façon naturelle par le courant lymphatique, on assiste en quelques minutes à une concentration de ce traceur dans le ganglion le plus proche, ganglion dont la localisation est très variable d'un patient à l'autre, même pour des tumeurs de localisation identique. La sonde de détection, qui est manipulée directement par le chirurgien, permet de localiser ce ganglion particulier et de le prélever pour analyse histologique. Il est désormais prouvé que l'absence de cellules anormales (cancéreuses) dans ce ganglion signifie l'absence d'autres cellules anormales dans le reste de l'organisme. Cet élément est capital pour décider de la nature et de l'intensité d'un éventuel traitement complémentaire de type chimiothérapie. L'avantage de cette approche est qu'elle est très peu invasive et qu'elle est en voie de remplacer la technique actuelle qui est aveugle et est basée sur le prélèvement de tous les ganglions situés en périphérie de la tumeur. Cette minimisation du geste chirurgical est particulièrement intéressante dans le cancer du sein ou elle pourrait permettre d'éviter 70% des opérations sur les lymphatiques du creux de l'aisselle.
La sonde de détection peropératoire est un détecteur à scintillation simplifié comportant un collimateur et un cristal NaI ou CsI couplé à un photomultiplicateur ; l'ensemble est relié à un analyseur indiquant en temps réel le taux de comptage et le traduisant par un signal sonore dont la fréquence est modulée par ce taux. Le chirurgien dirige son geste d'exérèse en suivant la direction suivant laquelle le signal est le plus intense. Ces sondes sont utilisées en laboratoire ou pour des applications médicales limitées depuis plusieurs dizaines d'années. Le développement de la technique du ganglion sentinelle a amené à adapter ces sondes en vue d'une utilisation spécifique : fonctionnement en cours d'intervention chirurgicale, détection exclusive du technétium-99m, taille réduite du corps de la sonde pour pouvoir l'introduire à travers une incision limitée, collimation adaptée à la taille du ganglion, minimisation de l'effet du point d'injection, réponse sonore adaptée aux activités utilisées, etc. Ce nouveau marché amène de nombreuses firmes à s'intéresser à ce type de détecteur. Une société orientée dans ce domaine vient d'ailleurs d'être fondée à Clermont-Ferrand par un jeune docteur issu du Laboratoire de Physique Corpusculaire du campus des Cézeaux ; des solutions innovantes sont proposées pour rendre plus efficaces et mieux adaptés les détecteurs proposés au chirurgien.

En conclusion, cette présentation incomplète des nouveautés récentes en médecine nucléaire permet cependant d'illustrer quelques uns des progrès très importants rendus possibles dans le combat contre la maladie et le vieillissement par la combinaison des connaissances acquises dans des domaines scientifiques aussi divers que la physique, la chimie, l'électronique, l'informatique, la biologie et les mathématiques.



Figures 1 et 2
Exemples d'images de tomographie par émission de positons avec le fluorodésoxyglucose obtenues chez deux patients porteurs d'un cancer (source : Institut Gustave Roussy, Villejuif, et Centre Hospitalier Frédéric Joliot, Orsay).

LES PILES À COMBUSTIBLE PRINCIPES ET QUELQUES APPLICATIONS

Alain Comte, Dr.-Ing.
EDF - Pôle Industrie - Division Recherches et Développement
Les Renardières - Route de SENS - 77818 MORET-sur-LOING
Tél +33 i 60 73 67 16 - Fax:+33 160736743 - e-mail: A.Comte@edfft

RÉSUMÉ

Les piles à combustibles sont des dispositifs de cogénération dont les développements s'accélèrent et se diversifient depuis plusieurs années. Offrant à la fois une grande modularité et une souplesse d'utilisation certaine, des rendements électriques élevés et de très faibles taux d'émissions de polluants (hors $C0_2$), elles pourraient prendre à terme une part importante dans le paysage énergétique mondial. Toutefois, leur commercialisation véritable n'interviendra vraisemblablement pas avant 5 à 10 ans suivant les technologies.
Après avoir présenté les principes de fonctionnement des piles à combustible, et les technologies majeures en cours de développement, on présente quelques exemples d'applications de ces technologies.

Fuel Cells - Principles and Applications
SUMMARY

Fuel Cells are quite new combined heat and power generation devices whose developments have been accelerated the last years. They combine modularity and obvious versatility, high electrical efficiency and very low pollutant emissions (except $C0_2$). Thus, they can represent in the future an important part of the energy production devices. However, a real commercialisation of fuel cells is flot to corne before 5 to 10 years, depending on the technology.
In the first part, we present the principles of fuel cells, and the major technologies under development. Then we present exemples of what their utilisation could be.

1- PRINCIPES DE FONCTIONNEMENT DES PILES À COMBUSTIBLE

Les installations actuelles de production d'électricité (et de chaleur) à combustion sont basées sur la combustion vive (avec flamme) de combustibles pour la plupart à base de composés hydro-carbonés (gaz naturel, fioul, essence, etc...) ou de carbone. Le principe en est simple : le combustible, mélangé à de l'air, est brûlé (oxydé) dans un foyer (brûleur ou chaudière), transformant en chaleur l'énergie chimique (enthalpie) du combustible. Cette chaleur est alors soit utilisée directement (chaufferies, chaudières...), soit transformée en électricité, par deux grandes classes de processus :

Dans les centrales de production "classiques ", la chaleur est utilisée pour vaporiser de l'eau sous pression (chaudière et/ou générateur de vapeur), cette vapeur chaude sous pression est refroidie et détendue dans une turbine à vapeur qu'elle fait tourner, et cette turbine entraîne à son tour un alternateur qui produit directement du courant alternatif.

Dans les installations de type moteur (diesel ou à gaz) ou turbine à combustion (TàC), la combustion est réalisée dans une chambre de combustion (turbines) ou des cylindres à explosion (moteurs), et l'énergie de pression est directement transmise à l'alternateur soit par une turbine, soit par l'ensemble bielle/manivelle.

Dans tous les cas, on assiste à une suite de transformations d'énergie : énergie chimique → énergie thermique (chambre de combustion ou brûleur), énergie thermique → énergie de pression (générateur de vapeur ou chambre de combustion), énergie de pression → énergie mécanique de rotation (bielles et arbre ou turbine), enfin énergie mécanique de rotation → énergie électrique (alternateur).

Les processus sont alors relativement complexes, et passent par la forme la plus "basse" d'énergie, à savoir l'énergie thermique. Etant données les limitations introduites par les principes du cycle de Carnot, le rendement électrique total de ces types de cycles élémentaires est relativement faible : 33 à 35 % pour une centrale nucléaire, de l'ordre de 40 % pour une centrale thermique à combustible fossile, ou pour un moteur diesel, un peu moins de 40 % pour une turbine à combustion de puissance moyenne. Il faut mettre en place des cycles complexes (cycles combinés par exemple) pour atteindre des rendements de 60 %. Rajoutons que dans certains processus, il est possible de mettre en place des échangeurs qui récupèrent une partie de la chaleur pour cogénération.

De plus, la présence d'une flamme vive dans la chambre de combustion ou le brûleur, générant des températures égales ou supérieures à 1500° C, jointe à l'utilisation d'air, conduit à la génération de NO_x. Enfin, l'absence de dispositifs de traitement du combustible en entrée conduit à la libération dans l'environnement de produits soufrés (acide sulfurique).

A la base, la combustion est une réaction chimique qui consiste à mettre en commun des électrons entre l'hydrogène et/ou le carbone et l'oxygène, à qui il en "manque" 2 pour saturer la couche extérieure. C'est ce "transfert" d'électrons qui est le principal phénomène de génération d'énergie.

Le principe de base des piles à combustibles, découvert au début du XIX^e siècle par Sir William Grove, consiste à "canaliser" ce transfert d'électrons dans un circuit électrique, de manière à "récupérer" l'énergie chimique le plus possible directement sous forme d'électricité. Une pile à combustible va alors se présenter comme un électrolyseur " à l'envers":

Le cœur d'une cellule de pile à combustible *(voir figure 1)* est un sandwich (le PEN) constitué d'un électrolyte entouré de 2 électrodes poreuses contenant un catalyseur. Un ensemble de canaux (de quelques millimètres de côté) amènent de part et d'autre des électrodes de l'hydrogène (côté anode) et de l'air (côté cathode). Côté anode, l'hydrogène pénètre par diffusion dans l'électrode, et au contact de l'électrolyte l'atome d'hydrogène se scinde en un électron et un proton (on parle d'ionisation).

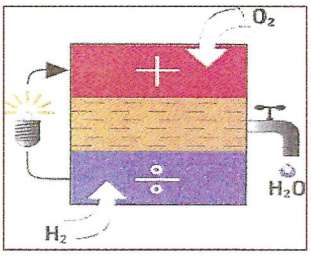


Figure 1 - Principe de fonctionnement d'une cellule élémentaire

L'électrolyte a comme rôle de laisser passer les protons (conductivité ionique), mais pas les électrons. Ceux-ci sont alors obligés de passer par un circuit (électrique) extérieur pour rejoindre la cathode, produisant ainsi de l'électricité. A la cathode, les électrons sont captés par les atomes d'oxygène qui ont migré dans l'électrode poreuse, et les ions oxygène O^{2-} se combinent aux protons H^+ pour former de l'eau, assurant alors la réaction globale :

$$H_2 + 1/2\ O_2 \rightarrow H_2O$$

On récupère alors :

- D'une part, sous forme électrique, une bonne partie de l'énergie "libre" de la

réaction (en fait, on récupère l'énergie libre de Gibbs moins les pertes Joules liées à la circulation des électrons et des ions) ;

• D'autre part, sous forme de chaleur (vapeur d'eau chaude) l'entropie de la réaction globale (part de l'énergie chimique qui ne peut être récupérée que sous forme de chaleur) et l'énergie dégagée par l'effet Joule ;

• Plus naturellement de l'eau pure produite par la réaction.

La pile fournissant du courant continu, un convertisseur assure la transformation en courant alternatif triphasé. De plus, elle ne nécessite aucun rechargement, contrairement à une batterie, et produit chaleur et électricité tant qu'elle est alimentée en combustible et en air.

Nous avons alors affaire à une installation "naturellement" de cogénération, dont le rendement total est actuellement de 80 %, et dont le rendement électrique est de 35 à 40% pour les piles froides, et de 50 % pour les piles chaudes, ce dernier rendement pouvant être poussé à 60 % ou plus pour ces dernières par couplage à une TàC transformant une partie de la chaleur produite en électricité.

Autre avantage par rapport aux dispositifs déjà évoqués (moteurs diesels ou à gaz, turbines à combustion...), le rendement est quasiment constant sur une grande plage de puissance (de 40% à 100% de la puissance maximale), et elle fonctionne pratiquement de 0 à 100 % de la puissance maximale. Pour comparaison, un moteur diesel ne peut pas fonctionner au-dessous de 40 % de sa puissance nominale, et moteur à gaz comme turbine à combustion, voient leur rendement chuter assez rapidement dès que l'on s'écarte de la puissance nominale.

Concernant les émissions, il y a bien sûr toujours la même quantité de CO_2 émise par débit de combustible carboné injecté, mais le rendement électrique plus élevé autorise un taux de CO_2 par kW produit plus faible (jusqu'à 50 % de moins par rapport à un moteur diesel de génération actuelle par exemple). Concernant les NO_X, il n'y a pas de flamme vive dans une PàC, et les températures de fonctionnement (entre 80° C et 1000° C suivant le type) sont trop basses pour générer des NO_X. En ce qui concerne les produits soufrés, le soufre étant un poison pour tous les catalyseurs utilisés dans une PàC, un dispositif de filtration en entrée de pile élimine tous les produits soufrés. Il n'y a donc aucune émission de produits soufrés en sortie de pile à combustible. La figure 4 compare les rejets de polluants des piles au gaz naturel avec les centrales classiques (fioul et charbon) et les moteurs ou turbines au gaz naturel.

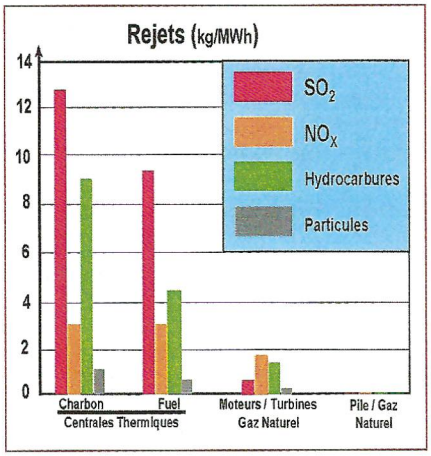


Figure 4 - Comparaisons de rejets de polluants

Les piles à combustible sont constituées de cellules élémentaires (comme les batteries), le plus souvent planes : il s'agit de plaques jusqu'à 1 m² de surface, de quelques millimètres d'épaisseur (jusqu'à 1 cm), délivrant chacune 0,8 V en moyenne, et entre 200 et 2 000 mA/cm² de surface.
On a alors affaire à des installations très modulaires, la puissance (et la tension) s'adaptant aux besoins en disposant en série et/ou en parallèle les cellules de dimensions adéquates. Il est alors possible de générer de quelques Watts (*figure 2*, 50 W) à plusieurs centaines de kW (*figure 3*, 250 kW) voire plusieurs mégaWatts.

Enfin, étant données les puissances envisagées (pas plus de quelques méga Watts), il s'agit plutôt d'installations d'énergie répartie, installées au plus près des besoins des clients ou des réseaux.

2 - LES COMBUSTIBLES UTILISABLES

Comme nous l'avons vu, les cœurs de pile ne savent oxyder que l'hydrogène (et le monoxyde de carbone pour les plus chaudes). Mais, que ce soit pour des raisons de sécurité ou de production/distribution, ce combustible est mal adapté. On cherche alors à utiliser des combustibles soit disponibles pratiquement à n'importe quel endroit (gaz naturel), soit facilement transportables et couramment distribués (GPL, fioul...). On dispose alors, dans les installations de type PàC, un ensemble de réacteurs catalytiques, connus sous le terme générique de "reformeurs ", qui ont pour but de décomposer le combustible choisi pour en extraire l'hydrogène nécessaire au cœur de pile.

A l'aide de ce dispositif, une pile à combustible est capable de fonctionner avec :

• Des composés hydrocarbonés : gaz naturel (méthane), GPL (Propane ou butane), biogaz... Le circuit de traitement se décompose en deux étapes : le reformeur (entre 600°C et 900°C) transforme un mélange hydrocarbure + vapeur d'eau en mélange hydrogène + monoxyde de carbone. Puis un deuxième réacteur élimine le CO, en transformant un mélange monoxyde de carbone + vapeur d'eau en un mélange hydrogène + gaz carbonique, fabriquant ainsi un peu plus de combustible pour le cœur.

Pour les piles chaudes (voir plus loin), la transformation s'arrête au reformeur, puisque ces piles peuvent directement oxyder le monoxyde de carbone, voire même transformer le méthane en interne.

La totalité des piles existantes sont capables de fonctionner avec du gaz naturel. A noter que l'hydrogène est fabriqué au fur et à mesure de sa consommation : il n'y a pas de capacité de stockage d'hydrogène intermédiaire.

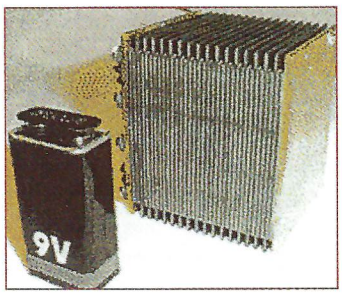


Figure 2- Coeur de 50 W

Figure 3 - Coeur de 250 kW

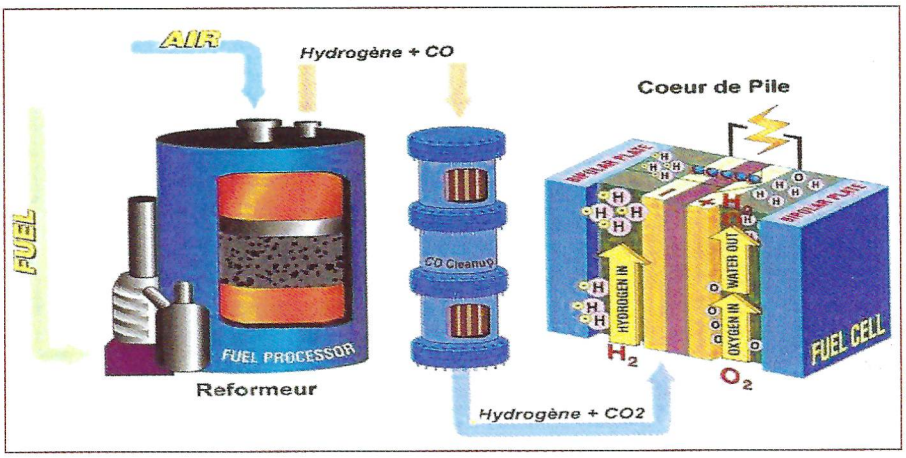


Figure 5 - Circuit complet Traitement du Combustible + Pile

• Carburants pour véhicules : essence sans plomb, fioul, kérosène : des prototypes ou pré-séries commencent à fonctionner avec ce type de combustible (le principe est le même que pour les hydrocarbures gazeux : reformeur plus traitement du CO).

• Alcools (méthanol ou éthanol) : carburants a priori privilégiés pour l'automobile, ces alcools offrent l'intérêt de ne pas nécessiter de traitement du CO, puisque les reformeurs correspondants fabriquent directement du CO_2.
De plus, leur température de transformation est plus faible : 350°C. Ils sont donc moins chers, plus compacts et plus réactifs.

3 - LES GRANDES CLASSES DE PILES

Les performances et les utilisations possibles des piles à combustible sont en grande partie définies par leurs technologies, principalement par l'électrolyte. Classées par ordre de température de fonctionnement, on distingue deux grandes classes de piles :

3.1 / Les piles froides (température inférieure à 300°C) :

Cette classe regroupe deux types de piles :

Les **PEMFC** (**P**olymer **E**lectrolyte **M**embrane **F**uel **C**ell), dont l'électrolyte est une membrane polymère, de 100 à 200 micromètres d'épaisseur. Leur température de fonctionnement est basse (actuellement 80 à 100°C. Leur rendement électrique net est le plus faible (35 %) à cause de la consommation électrique interne d'auxiliaires de mise en pression des gaz. Fonctionnant pour les plus importantes (100 à 200 kWe) sous 1,5 à 2 atm, la faible température de sortie des gaz (70°C) limite leur utilisation en cogénération au chauffage d'immeubles et à l'eau chaude sanitaire. Ce sont les piles privilégiées également pour les applications mobiles (portables ou transport).

Les **PAFC** (**P**hosphoric **A**cid **F**uel **C**ell), dont l'électrolyte est l'acide phosphorique. Leur température de fonctionnement est de 200°C (pour que l'acide phosphorique soit liquide), et autorise des températures de sortie des fluides pour cogénération de 120°C. Elles ont un rendement électrique net et un rendement thermique net de 40 % chacun. Elles ont été les premières à atteindre le stade précommercial (piles ONSI PC25C, modèle installé à Chelles), et ont conduit au plus gros prototype ayant fonctionné (11 MWe au Japon).

Une des composantes communes aux piles froides est la température relativement basse des fluides caloporteurs en sortie : de 70°C à 120°C. Ceci limite leur utilisation en cogénération aux applications de chauffage urbain ou résidentiel, et à l'eau chaude sanitaire.

L'autre point commun est le fait qu'elles ne peuvent oxyder que l'hydrogène, et qu'elles ont une grande sensibilité au monoxyde de carbone, nécessitant un système de traitement du combustible en entrée plus complexe.

Enfin, toutes deux utilisent comme catalyseur le Platine, ce qui pénalise leur coût de fabrication.

Signalons enfin une technologie prometteuse mais encore au stade du laboratoire : les **DMFC** (**D**irect **M**éthanol **F**uel **C**ell), piles froides (120°C) dont l'électrolyte est solide, offrant la particularité d'oxyder directement du méthanol (en eau et dioxyde de carbone). De telles piles seraient très simples (pas de circuit de traitement du combustible) de conception et d'utilisation, et offriraient par exemple une autonomie de 100 heures en communication pour un téléphone portable, avec un petit réservoir de méthanol facilement remplissable. Leur émergence industrielle ne devrait toutefois pas intervenir avant une dizaine d'années.

3.2 /Les piles chaudes (température supérieure à 500°C) :

Cette classe regroupe deux types de piles :

Les **MCFC** (**M**olten **C**arbonate **F**uel **C**ell), dont l'électrolyte est un mélange de carbonates fondus. Leur température de fonctionnement est de 650° C, et elles présentent des rendements électrique et thermique de 45 et 35 % respectivement. Leur couplage possible avec une turbine à vapeur autoriserait un rendement électrique de près de 60 %. Bien que leur haut rendement électrique et leur température de cogénération élevée les rendent séduisantes, les problèmes techniques importants qu'elles soulèvent (gestion des carbonates fondus, extraction et recirculation du CO_2) limitent fortement à la fois leur utilisabilité dans l'avenir et leur aptitude à atteindre des coûts de production intéressants.

Les **SOFC** (**S**olid **O**xide **F**uel **C**ell), dont l'électrolyte est un oxyde solide (feuille de Zircone de 100 micromètres d'épaisseur). Leur température de fonctionnement est de 1000°C, leurs rendements électrique et thermique de 50 et 30 %. Elles peuvent être couplées à une turbine à combustion (dont elles remplacent la chambre de combustion), portant leur rendement électrique à 60 % ou au-delà. Encore au stade des installations de démonstrations (un prototype Westinghouse de 100 kWe en Hollande), leur production industrielle ne devrait pas intervenir avant 8 à 10 ans.

Une première caractéristique commune des ces piles chaudes est leur aptitude à oxyder également le monoxyde de carbone, offrant ainsi la possibilité d'éliminer utilement ce gaz. Une deuxième caractéristique est de pouvoir utiliser directement le gaz naturel (méthane), en le transformant en interne, donc ne nécessitant pas de réacteurs de transformation en amont.

Enfin, toutes deux offrent à la fois des rendements électriques élevés, et une température des gaz en sortie également élevée, autorisant ainsi une utilisation en cogénération industrielle. Les conditions de construction (isolation thermique importante) et leur grande inertie thermique les réservent toutefois à la production de puissance importante (plusieurs centaines de kWe) fonctionnant en base, en utilisation en réseau.

4 - LES APPLICATIONS ACTUELLES ET ÉVOLUTIONS À TERME

Les piles à combustibles sont un domaine encore jeune techniquement et en développement qui n'a pas encore atteint sa maturité. Nous pouvons toutefois esquisser un aperçu de l'état actuel et des évolutions probables pour la prochaine décennie :

Les **PAFC** ont été les premières piles commercialisées (par la firme ONSI). Un peu moins de 200 piles PC25 modèles A ou C (200 kW électriques et 200 kW thermiques, fonctionnant au gaz naturel, au propane ou au biogaz, voir *figure 6*) ont été vendues dans le monde depuis 6 ans. Elles équipent des hôtels, des hôpitaux, etc... Elles ont permis de commencer à établir une base de données de maintenance (difficile à généraliser étant donnée la diversité des processus de maintenance et utilisation), et surtout de crédibiliser l'utilisation des PàC. Il s'agit de la pile que EDF et Gaz de France ont installée à Chelles. Leur prix est encore élevé, et il semble subsister quelques difficultés à faire encore baisser leurs coûts de fabrication. Si tel était le cas, elles pourraient être supplantées par des PEMFC nouvelle génération, si ces dernières démontrent qu'elles peuvent fonctionner durablement au gaz naturel.

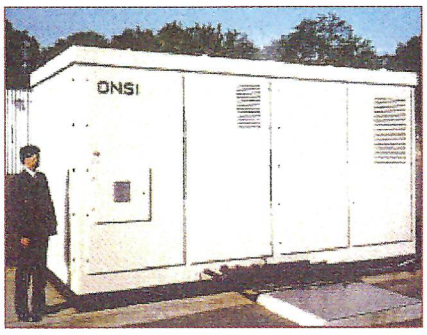


Figure 6- Pile PAFC ONSI 200 kWe

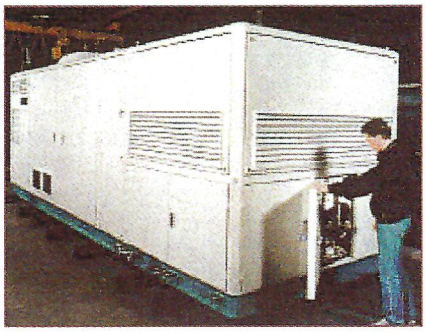


Figure 7- Pile PEMFC Ballard 250 kWe

Les **PEMFC** représentent actuellement une technologie très dynamique, offrant un vaste champ d'application. Quatre axes principaux pour les développements de cette technologie :

⇒ Cogénération tertiaire/résidentielle (chauffage + eau chaude sanitaire) de moyenne puissance, 100-300 kWe : le leader mondial est actuellement Ballard. Des démonstrations tests d'un modèle fournissant 250 kWe sont en cours de démarrage, dont une à Berlin à laquelle participe EDF. Alstom et Ballard, qui se sont alliés, envisagent la construction en Europe d'une usine de fabrication de piles de 2ème génération, et prétendent commercialiser ces unités de 220 kWe à partir de 2003/2004 (voir *Figure 7*) ;

⇒ Piles transport / véhicules : que ce soit pour l'automobile (piles de 50 kWe, *figure 9*), les bus (100 à 120 kWe, *figure 8*), le rail (200+ kWe) ou les navires, de nombreux projets existent, beaucoup tournant autour d'alliances avec Ballard (Daimler-Benz, Ford, etc..). Nombre de constructeurs automobiles annoncent une commercialisation de véhicules propulsés par un moteur électrique alimenté par une PEMFC vers 2004/2005 ;

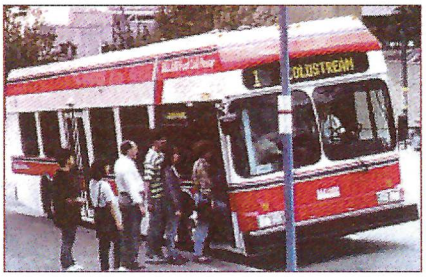


Figure 8 - Bus Ballard

Figure 9 - Projet Renault FEVER

⇒ Piles individuelles : une demi-douzaine de constructeurs, américains pour la plupart, prévoient de proposer d'ici 3 à 4 ans des installations individuelles de 3 à 7 kW fonctionnant au gaz naturel, au méthanol ou au fioul domestique. Ces dispositifs pourraient alors éventuellement changer de manière importante la gestion de l'énergie dans les zones non raccordées aux réseaux électriques. Leur développement est probable aux Etats-Unis, étant données la faible densité démographique et les grandes surfaces non couvertes par un réseau. Leur implantation devrait être plus limitée en Europe, continent nettement mieux couvert.

⇒ Applications portables : des petites unités prototypes, de 1 Watt à 1 kW, commencent à faire leur apparition, fonctionnant à l'hydrogène ou au méthanol, pour les applications portables : téléphones cellulaires, caméras vidéos *(figure 10)*, ordinateurs portables *(figure 11)*, mais aussi prothèses pour handicapés, etc...) De l'encombrement d'une batterie d'accumulateur actuelle, ces dispositifs assureraient une autonomie bien plus grande, et élimineraient les contraintes de rechargement ; il reste à démontrer que ces applications puissent dépasser le stade du prototype.

Les **SOFC**, étant donné leur rendement électrique élevé, semblent les mieux placées pour les applications de production d'électricité ou de cogénération industrielle, pour des puissances moyennes ou élevées. Plusieurs expérimentations sont en cours ou prévues à court terme, de 100 kWe à 1 MWe. Le leader mondial est Siemens / Westinghouse. Toutefois, les coûts élevés (actuellement) de fabrication et les problèmes techniques qui existent encore ne laissent pas envisager de commercialisation de ces types de piles avant 8 à 10 ans.

Figure 10 - Alimentation pour caméra vidéo

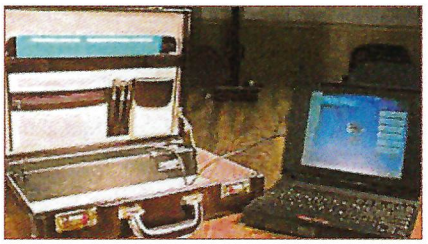


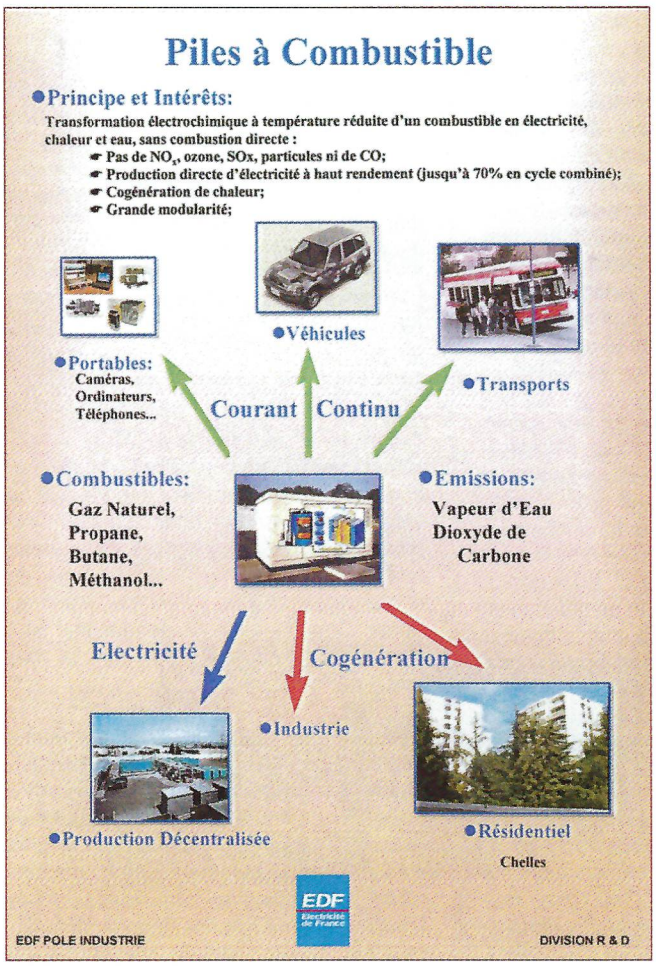
Figure 11 - Alimentation pour PC portable

Quant aux **MCFC**, bien que plusieurs opérations de démonstration soient en cours aux Etats-Unis et en Europe, le grand nombre de problèmes techniques encore à résoudre et les coûts élevés liés à leur complexité ne laissent pas augurer d'une commercialisation possible à court/moyen terme.

5 - CONCLUSIONS

Les piles à combustibles sont des dispositifs de production en cogénération qui allient à la fois une grande modularité dans la constitution, une grande diversité d'utilisations possibles, des rendements élevés (et stables dans les différentes configurations de marche à puissance réduite), et une grande souplesse dans les combustibles utilisables potentiellement. Elles peuvent être amenées à jouer un rôle important dans le paysage énergétique futur, que ce soit pour les applications mobiles ou transport, résidentiel/tertiaire, de production d'électricité décentralisée, voire de production individuelle.

Il reste toutefois à valider ou améliorer un certain nombre de données techniques, concernant notamment la longévité et la fiabilité (disponibilité et maintenance), ce qui représente le but des démonstrations actuelles dont celle de Chelles. Il faut enfin mener et faire aboutir des actions importantes sur le plan économique, visant en particulier à diminuer les coûts d'investissement, mettre en place les structures de fabrication de masse, et cerner (et diminuer si besoin est) les coûts de maintenance. C'est pourquoi on ne peut pas attendre de réelle commercialisation avant une échéance de 5 à 10 ans suivant la technologie.



Panneau présenté lors de la session poster

Dossier

Images et paroles de Louis LEPRINCE-RINGUET

Madeleine et Louis Avan

"Louis LEPRINCE-RINGUET, Physicien français (Alès 1901-Paris décembre 2000). Auteur de recherches sur les Rayons Cosmiques, il détermina la masse de plusieurs types de mésons et participa à la découverte des hypérons (particules instables de masse supérieure à celle du neutron)". Le "Petit Robert" (Edition 2001) résume ainsi l'exposé des motifs qui auraient pu valoir "au Prince" le Prix Nobel de Physique. L'article conclut : "Académie des Sciences 1949. Académie des Sciences 1966"

L'essentiel nous semble pourtant manquer dans les lignes précédentes, essentiel devenu familier, bien au-delà de la communauté scientifique.

Dans les années 1948-49, au terme d'études universitaires classiques à l'Université de Caen, qui venait de renaître de ses ruines, tandis que nous nous sentions attirés par la Recherche Scientifique, notre Maître, le Professeur Maurice SCHERER, lui-même issu du Laboratoire Leprince-Ringuet de l'Ecole Polytechnique, nous conseilla la lecture de l'ouvrage "Les Rayons Cosmiques", dans l'édition Albin-Michel de 1948 préfacée par Maurice de BROGLIE.

Ce livre nous laissa éblouis, bouleversés… et détermina le sens de notre vocation scientifique.

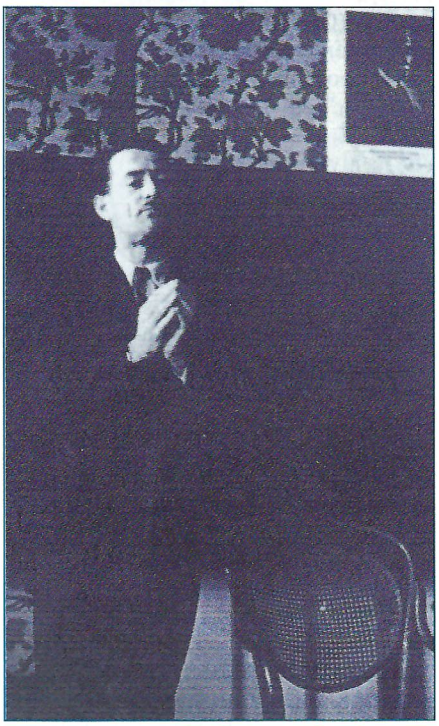
"Le vrai savant, et je pense à certains Maîtres très vénérés et aimés, est humble, modeste, amoureux de la science au développement de laquelle il contribue, profondément heureux (et c'est là un critère fondamental) des découvertes des autres. Ce n'est pas lui-même qu'il contemple avec satisfaction, c'est la grande œuvre créée dont il découvre la trame, dont il s'aperçoit des aspects merveilleux restés cachés jusqu'alors."
C'est un grand contemplatif au sens le plus complet du mot, avec tout le bagage d'ascétisme, de ténacité, d'activité efficace, de sens précis des réalités, nécessaires au grand contemplatif. Auprès de lui règne un charme de pureté, de joie, qui ne trompe pas ; la " Mère du Bel Amour, de la Science et de la Sainte Espérance " le fait rayonner d'un peu de sa splendeur.

[Référence : conclusion de l'ouvrage "Les Rayons Cosmiques - Les Mésons"]

Toute l'éthique Scientifique, et la foi de l'auteur, sont concentrées dans ces lignes somptueuses.
Quelques années plus tard, alors que nous avions soutenu nos thèses de Doctorat sur les intensités, la composition, les distributions énergétique et zénithale, les propriétés nucléaires et électromagnétiques du Rayonnement Cosmique "aux grandes profondeurs sous terre", Louis Leprince-Ringuet nous a reçus, pendant des heures dans son bureau de l'X. Il a patiemment exploré au microscope les trajectoires enregistrées dans nos émulsions nucléaires. Elles nous arrivaient en flacons de gel par la valise diplomatique. Il nous appartenait de les couler dans un véritable Laboratoire chirurgical installé au niveau le plus profond des Mines de fer de May-sur-Orne, puis de les assembler en étuis d'acier inoxydable hermétique, verticaux et horizontaux, de les exposer pendant de longs mois à des niveaux différents, de les développer, toujours au fond, avant de les étudier au microscope Leitz à grande platine au Laboratoire de Caen.

Louis Leprince-Ringuet nous questionnait sur la nature de ce rayonnement, beaucoup plus faible qu'au niveau de la mer ou en montagne, mais bien plus pur et en moyenne plus énergétique. Il passait et repassait les trajectoires en chapelet de grains d'argent très rectilignes (en raison de leur grande énergie) souvent très longues, jusqu'à 15 centimètres, ce qui correspond à plusieurs centaines de mètres dans une chambre de WILSON.

Il s'émerveillait de ces trajectoires relativistes de muons (électrons lourds) rappelant ses mesures de masses, vers 1935… nous questionnait sur le caractère spécifique des explosions nucléaires détectées dans les émulsions, tellement différentes de celles qui lui étaient familières au Pic et à l'Aiguille du Midi, ou dans les expéditions en ballons-sondes.
[Contrairement à la présence, intensive de particules d'interaction forte, les muons (appelés aujourd'hui LEPTONS sont des particules d'interactions faible ou électromagnétique).



Professeur de Physique à l'X
(photo prise au printemps 1942 à Villeurbanne où la promotion 1941 occupait la Maison Jeanne d'Arc, (dépendance des usines Gillet) d'octobre 1941 à mars 1943).

Contrairement aux apparences, sa pose n'est pas d'extase sous le portrait du Maréchal : il doit plus vraisemblablement exhorter ici ses 200 auditeurs à s'intéresser aux joies de la thermodynamique (dont l'enseignement le passionnait plus spécialement...).

Puis ce fut l'exploration, avec une joie d'enfant, l'exploration d'une petite gerbe électrons-positons très spectaculaire, et des autres "paires e^+ e^- " induites soit par des photons gamma associés aux muons, soit par les muons eux-mêmes... enfin l'incidence de la présence locale de mésons π secondaires (Ces pions qui en altitude engendrent précisément l'essentiel de la composante muonique capable de "perforer" des centaines de mètres de roche. Il nous questionna longuement sur le niveau de nos relations internationales (Giuseppe OCCHIALINI, chez qui nous avions passé deux mois à BRUXELLES, Kenneth GREISEN à l'Université CORNELL, S. HAYAKAWA à OSAKA, " par correspondance") et nous encouragea à poursuivre. **Tout le passionnait :** Notre travail et ses conditions matérielles rudes, notre vie au fond de la Mine, notre lutte contre la radioactivité des roches, faible, mais polluante en radon, notre combat contre l'humidité ambiante qui longtemps effaçait, par destruction de l'image latente, les trajectoires précieuses, et relativement rares, enfin l'aide permanente et incomparable des mineurs du fond, leur initiative déterminante de faire baisser cette néfaste humidité relative de 98 % à 30 %, en même temps que la teneur de l'atmosphère en radon ; tout simplement en injectant dans le Laboratoire, "à flots puissants" "l'air primaire sec" destiné à l'aération de toutes les galeries, non sans nous avoir formellement recommandé de boire beaucoup d'eau,... leur délicatesse enfin lorsque s'annonça la naissance de Paul, notre premier enfant... et leur animation des "pots de thèses".

Les trois mille heures passées au fond rappelaient à Louis Leprince-Ringuet, nous l'avons compris, plus tard, son travail aux câbles sous-marins, les rencontres des Equipes Sociale, les longues heures de constructions de la "Cabane des Cosmiques", à l'Aiguille du Midi, avec les techniciens, les ingénieurs, les guides de CHAMONIX (dont Jean FARINI, plus tard guide préféré de KARAJAN, et devenu pour nous un ami très cher).

Nous étions arrivés à 13 heures 30. A 16 heures, sa secrétaire personnelle a bien annoncé l'arrivée de deux Physiciens Américains, dont Donald A. GLASER, inventeur de la "Chambres à Bulles", futur Prix Nobel de Physique ; Louis LEPRINCE-RINGUET ne quitta pas le microscope LEITZ à grande platine, et pria ses invités de descendre avec les chercheurs du Laboratoire jusqu'au thé de 17 heures qui précédait le traditionnel colloque du lundi. Nous venions de vivre une inoubliable leçon vivante de Science, de disponibilité, de PRESENCE, de confiance exigeante, et de PASSION... Beaucoup d'autres rencontres suivront, à l'X avec tel ou tel jeune chercheur du Laboratoire de Physique Nucléaire de Clermont, (Ainsi Jean-Claude MONTRET, futur Directeur du Laboratoire devenu Laboratoire de Physique Corpusculaire) ; à son domicile parisien, 86 rue de Grenelle, où son épouse Jeanne nous accueillit après l'enregistrement d'une émission télévisée de Physique Fondamentale du CNAM pour Antenne 2..

Emission pendant laquelle nous avions admiré les tableaux "qui remplissaient, de façon fort anarchique" son bureau. Pendant le repas chaleureux qui suivit, **il nous confia ses préférences :**
" J'aime peindre les symboles de la vie moderne, les voies de chemin de fer, les gares, les banlieues avec leurs usines aux cheminées fumantes, les canaux, les villes sous éclairage nocturne, les grues fines, élégantes, efficaces, les pylônes racés transportant l'énergie en silence, et aussi les ciels : ciels légers des matins mouvants, ciels de gloire des campagnes printanières... ciels enflammés des crépuscules dorés... ciels rougeâtres des banlieues nocturnes... Ciels qui symbolisent, dans nos évolutions éternelles la merveilleuse diversité de nos pensées et de nos attitudes... Musique ou peinture, l'art et la science font bon ménage" Et de citer Einstein, violoniste, Oppenheimer, Pasteur et leurs peintures et parmi les musiciens : Newton, Ampère, Galilée, Lacèpède.

Louis Leprince-Ringuet présida la leçon inaugurale de l'un de nous (L.A) au Conservatoire National des Arts et Métiers. Il assura également la Présidence de plusieurs thèses de Doctorat au Laboratoire de Physique Corpusculaire de Clermont-Ferrand, la centième Thèse d'Ingénieur, CNAM et une série d'examens généraux (L'actuel président de l'ADASTA doit s'en souvenir !)

En juin 1962, trois élèves-ingénieurs du CNAM de Clermont-Ferrand purent, à l'occasion du Congrès International de Physique Nucléaire organisé en l'honneur du tricentenaire de Blaise Pascal, soutenir leur Mémoire d'Ingénieur à partir de travaux réalisés sur la grande chambre de Wilson et de ses bobines magnétiques offertes par l'Etude Polytechnique sur demande de Monsieur Leprince-Ringuet.

(Références : Mémoires de Pierre LAMOTTE, Robert DESNOYER et Alain CAMUSSON)

Les grands traits caractéristiques de la vie et de l'œuvre scientifique de Louis LEPRINCE-RINGUET sont connus des lecteurs et membres de l'ADASTA Qu'il nous soit permis seulement d'évoquer quelques points de repère, souvenirs et surtout paroles, de cette vie et de cette œuvre **dans la mesure où ils donnent sens à l'ensemble de cette véritable épopée scientifique et humaine.**

1°/ **Louis Leprince-Ringuet est donc né à ALES, dans le GARD " au début du printemps de 1901",** tout près du bassin houiller de la "Grand-Combe". Son père, Polytechnicien, était Ingénieur des Mines. Son grand-père maternel, René STOURH, Inspecteur des finances, contribuera à la fondation de l'école des Sciences Politiques. Il fut dreyfusard " Dans ma parenté lointaine, un restaurateur italien aurait servi son dernier repas à Robespierre... Les Leprince-Ringuet, le mot vient d'une adoption : celle de mon ancêtre "Leprince" par un oncle "RINGUET"... Mon meilleur souvenir : Dessiner des cartes de géographie, et dès l'âge de douze ans, et pendant la guerre de 1914, la photographie (Prises de vue, développement, agrandissement).

2°/ **Les amitiés du collège STANISLAS ?** " Robert MORANE " (de la future firme d'aviation MORANE-SAULNIER) et Jacques LACAN (le philosophe). Ils étaient en tête de classe. J'arrivais après... Nous nous entendions très bien, LACAN a toujours eu le goût du canular...(Il continuera, "se foutant de nous"- sic). Le soir, nous allions nous balader, sous les bombardements. La classe de maths-élems fut très féconde, et intellectuellement très heureuse. Nous chahutions sans arrêt le professeur de philosophie, Jean BARUZZI futur professeur au Collège de France et spécialiste de Saint Jean de la Croix.

1919 "Mathématiques spéciales à Louis-Le-Grand. Malgré les prédictions du professeur de Mathématiques (qui m'annonçait une brillante entrée, l'année suivante !) Je suis reçu à l'X : 204ème sur 250 en 1920, à la grande joie de mes parents qui, depuis ma naissance, n'envisageaient pas d'autre possibilité. Je sortis de l'X avec le N° 27, bien convaincu de l'intelligence supérieure des 26 premiers. Le seul "corps" accessible était celui des P.T.T..."

3°/ **Les câbles sous-marins :** "Après une année de service militaire en Rhénanie, et deux années à Sup-Elec puis aux Télécom, j'allais passer quatre années merveilleuses à réparer les câbles sous-marins, de Brest à Dakar, de Marseille à Bizerte : Travail rude,

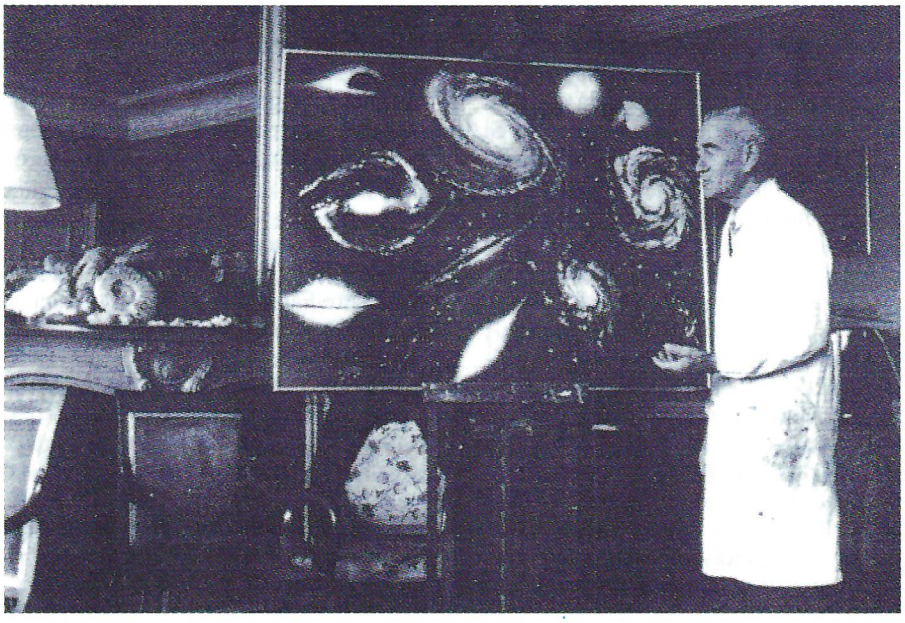
exaltant, extrêmement formateur pour un jeune étudiant. J'appris ce que les classes et l'X n'enseignent pas : vivre avec les hommes, les comprendre, accepter de dures contraintes... réussir une réparation.
Nous étions, au sortir d'une guerre meurtrière, remplis d'espérance, porteurs de vie. "Comme plus tard Frédéric Joliot "LLR" se fera des amis parmi les pêcheurs de Bretagne pendant ces campagnes de câbles.

4°/ **Les Equipes Sociales. Premier mariage et drame :** La même période vit l'entrée de Louis Leprince-Ringuet dans les Equipes Sociales de Robert GARRIC, nées de la fraternité des tranchées..." C'est là que j'ai compris ce qu'imposera bientôt la vie moderne, froide et dure : un regard chaleureux, une mentalité évangélique... Je fis la connaissance d'une équipière, Denise Paul-Dubois, petite fille d'Hyppolite Taine, philosophe et historien français. Je l'ai aimée. Très peu de temps après notre mariage, alors qu'elle attendait un bébé, elle est morte : ce fut un drame, un très grand drame... J'ai gardé des liens étroits avec la famille DUBOIS-TAINE. Exceptionnels par l'intelligence et la sensibilité, ils sont pour ma famille devenus des amis très intimes. "

5°/ **Une grande rencontre : Maurice de BROGLIE. Première équipe scientifique**

"Un ami me présenta un jour à Maurice de BROGLIE ; c'était en 1928-1929. Ancien officier de Marine (collaborateur de Paul LANGEVIN), Maurice de BROGLIE s'était reconverti dans l'une des plus grandes aventures de ce siècle : les rayons X. La distinction incarnée, l'affabilité dénuée de toute condescendance, l'honnêteté intellectuelle et morale, l'humilité qui lui faisait accepter d'autres avis, bref sa personnalité entière respirait la noblesse de cœur et d'esprit. Quand il m'offrit d'entrer - sans salaire - j'acceptai avec enthousiasme, abandonnant mes appointements réguliers pour de maigres indemnités.
J'avais appris la vieille physique à Polytechnique, ce sera la Physique vivante avec Maurice de BROGLIE.

Sous l'impulsion des premières découvertes des transmutations artificielles que l'Ecole de Cambridge, avec son grand animateur, LORD RUTHERFORD, avaient réussi à mettre en lumière, la physique expérimentale commençait à se transformer. Voyant loin " par-delà les rayons X" Maurice de Broglie était préoccupé de pénétrer aussi dans ce domaine prometteur. C'est ainsi que mon travail fut la réalisation d'un amplificateur linéaire de



grande sensibilité qui, relié à une chambre d'ionisation, permet de détecter individuellement les particules nucléaires produites au cours des transmutations. J'avais un atout précieux, en dehors de ma bonne volonté : je connaissais les " courants faibles " leur détection, leur traitement, leur amplification. Mes années de câbles sous-marins m'avaient familiarisé avec leur personnalité et leurs caprices. Un tel amplificateur linéaire n'existait pas encore en France, tandis qu'à l'étranger quelques prototypes apparaissaient ça et là.

Mais l'essentiel, c'est ce que j'ai découvert auprès d'un Maître : la sagesse de savoir que la seule logique ne gouverne pas le monde. Je n'étais pas venu seul : Maurice de BROGLIE accepta, sur ses fonds personnels, d'embaucher quelques mécaniciens et électriciens venus des Equipes Sociales. C'est ainsi que nous pûmes, avec Roger LOUVIGNY, René FRADIN, Eugène BOULANGER, dans une grande salle proche du bureau personnel du duc, côté rue Chateaubriand, former, en France, la première véritable équipe de recherche, associant dans une étroite collaboration, chercheurs et techniciens.

Le travail en groupe a été un fondement de mon existence. Les huit années passées auprès de Maurice de BROGLIE furent des années heureuses, bénies pour ainsi dire. Jamais, lorsque nous venions le voir avec nos questions, nos doutes ou nos joies candides d'apprentis scientifiques, nous n'avions l'impression de le déranger... Ces années représentent dans mon souvenir une tranche de vie si pure et si parfaite que toute la vie en reste marquée comme d'une grâce "in LLR" Foi de Physicien" Testament d'un scientifique. Bayard Editions/Centurion.1996

Notre expérience personnelle a confirmé la totale imprégnation de " l'esprit Maurice de BROGLIE" par Louis LEPRINCE-RINGUET, et d'autres témoins (ainsi notre amie commune, Suzanne FOUCHEE, grande allongée de BERCK, proche de "LLR" et de Jeanne MOTTE, sa seconde épouse, ont vécu cette formidable irradiation, assumée dans une filiale liberté.

6°/ **L'aventure des Rayons Cosmiques. L'Ecole Polytechnique. Le CERN**

Bruno ROSSI, scientifique italien, eut connaissance de "l'amplificateur linéaire LLR" Il vint le voir. Spécialiste des rayons cosmiques, ROSSI persuada Louis LEPRNCE-RINGUET de s'attacher à leur observation, pour tenter d'y découvrir les particules élémentaires de matière issues des collisions des particules lourdes" primaires" (Noyaux atomiques plus ou moins lourds... jusqu'au fer) avec les atomes atmosphériques.

" Travailler sur les Rayons Cosmiques, c'est se pencher sur les origines du monde"... "Bruno ROSSI m'a initié aux compteurs à fil, à leur utilisation pour le passage des rayonnements corpusculaires et aux circuits de coïncidences pour les rayons cosmiques. Je me lançai avec Roger LOUVIGNY et Eugène BOULANGER, dans la fabrication de centaines de compteurs à fil et de sélecteurs de coïncidences, avec l'idée encore imprécise et bien arrêtée de devenir l'un des "Cosmiciens" de la Planète... " Notre chasse aux rayons cosmiques avait un côté poétique, bohème. Avec Pierre AUGER, physicien mondialement connu pour la découverte de l'effet photoélectrique composé (Effet Auger), nous nous proposons de mesurer l'effet des Rayons Cosmiques. Si les rayons cosmiques sont des photons γ, le rayonnement

venant de l'espace, supposé isotrope, n'aura aucune raison d'être différent à l'Equateur (là où le champ magnétique est plus intense) et au pôle (là où il est le plus faible et orienté autrement). Si au contraire il s'agit non de photons, mais de noyaux ou de particules de très grande énergie, alors leur nombre et leur énergie seront différentes au pôle et à l'équateur. Nous avons donc embarqué le matériel dans les cabines d'un Cargomixte, "Le Kerguelen", effectuant le trajet HAMBOURG-BUENOS AIRES, en septembre 1933...Malgré la défaillance de certains compteurs de Geiger fabriquées chez Maurice de BROGLIE, grâce aux installations de coïncidences [malgré l'effet Elisa] nous pûmes, les premiers établir avec précision le caractère corpusculaire des Rayons Cosmiques". Cette expérience demeure un chef d'œuvre : Il a associé l'expérience scientifique déjà profonde de Pierre AUGER et la maîtrise des dispositifs expérimentaux (compteurs et électronique associée).

Nous n'avons jamais compris que cette découverte de l'effet de latitude et de la structure corpusculaire des Rayons Cosmiques n'ait pas été sanctionnée par le Prix Nobel !

1936 Louis Leprince-Ringuet est nommé Professeur à l'Ecole Polytechnique

Plusieurs membres du Jury de Concours acceptèrent de venir assister à des expériences difficiles, à Bellevue, où une grande chambre de Wilson (celle qui sera donnée à Clermont-Ferrand) fut installée dans l'entrefer du plus puissant électro-aimant du monde (treize mille gauss soit 1,3 tesla sur un parcours vertical de 80 cm.)...Un soir de 1935, un dimanche soir, en observant les trajectoires plus ou moins courbées, nous en observons une, verticale, sans aucune déviation. Nous venions de prouver l'existence de particules cosmiques arrivant sur la Terre avec une énergie supérieure à 20 milliards d'électrons-volts : record du Monde.

" Nous étions fort excités, et nous vint l'idée audacieuse d'aller sonner au domicile d'Aimé COTTON, prestigieux patron de Bellevue, quitte à le réveiller dans son premier sommeil. Il le prit fort bien, et ce fut une soirée de fête et de joie. "... Quant aux membres du jury qui firent la visite, ils semblèrent conquis (même après avoir été happés par l'électro-aimant en raison de trousseaux de clés, ou de pièces de nickel ferromagnétique, dont ils n'avaient pas voulu se dessaisir.

Louis LEPRINCE-RINGUET est élu, de justesse, "J'allais devenir professeur de Physique à l'X pour trente trois ans : j'envisageai de m'engager totalement, de créer un centre de recherches ouvert aux élèves, mission exaltante et captivante ! "

Louis Leprince-Ringuet succédait à Charles FABRY, celui de l'Interféromètre Fabry-Pérot, brillant opticien qui ne disposait que d'un bureau et pas de laboratoire.
LLR obtint du CNRS, nouvellement fondé, que les trois techniciens des Equipes Sociales l'intègrent et participent aux programmes de recherche, à Bellevue d'abord, puis à l'X. Eugène Boulanger deviendra même le patron de l'atelier.

" Ce qui forme une bonne équipe, c'est le don gratuit, le détachement ".

Le Labo de l'X va grandir très vite, à partir de la "Fosse aux ours" et devenir non seulement l'un des tout premiers en France par sa taille, mais aussi par son rayonnement.

Les grandes amitiés

" Le milieu scientifique avec lequel j'ai eu la chance de vivre et de travailler était très riche humainement "
Le charisme de Louis Leprince-Ringuet, son ouverture d'esprit le fit être adopté par la grande famille des Scientifiques français tels que Pierre AUGER, Francis PERRIN, le fils de Jean PERRIN, "le grand physicien de l'électron qui reçut le Prix Nobel pour ses travaux". "On ne pouvait vivre dans leur entourage sans être gagné par leur ferveur". Il aimait beaucoup Francis PERRIN, brillant physicien, chaleureux, "Président de l'Union des Athées" et animé d'un tel sens de l'amitié et "d'une ferveur apostolique pour le développement de la science pure, désintéressée". Il admirait aussi bien la virtuosité intellectuelle et expérimentale de Joliot, sa rigueur sportive (bateau et tennis)... mais " disciple de Jean BOROTTA, je le battais régulièrement sur son court de SCEAUX. Louis Leprince-Ringuet succèdera à Joliot comme professeur au Collège de France. " Nous étions animés par la volonté de faire reculer les limites du Savoir, non par l'ambition de conquérir de nouveaux marchés. " Jeanne LEPRINCE-RINGUET nous parla un jour longuement de l'amitié indéfectible qui unit sa famille et Robert OPPENHEIMER, et de l'admiration que son mari portait à "OPI". Après avoir dirigé le programme scientifique de Los Alamos, OPPENHEIMER, s'était opposé au développement de la bombe thermonucléaire. Son procès soulèvera beaucoup de boue politicienne. Sa condamnation fut durement ressentie. Il sera réhabilité grâce au Président Eisenhower... L'appartement du 86 rue de Grenelle était pour lui un hâvre de détente et de paix, sans compter les échanges scientifiques et artistiques... Il chérissait Van Gogh dont il possédait 2 tableaux. Louis Leprince-Ringuet et Robert Oppenheimer passèrent ensemble à la télévision dans le célèbre "Quart d'heure" animé par Pierre DESGRAUPES. L'avis d'OPPENHEIMER fut déterminant dans la nomination de son ami au Collège de France.

Parmi les autres grandes amitiés, il faut citer Andreï SAKHAROV "qui s'est sacrifié pour la fraternité humaine, la dignité et la liberté".

L'article du petit Robert évoque l'essentiel des travaux de Laboratoire de l'X, avant l'épopée du CERN.

Dès le début, Louis Leprince-Ringuet comprit les enjeux d'une collaboration Scientifique Européenne, et il fit partie du premier Conseil Scientifique du CERN, autour du grand physicien danois NIELS BOHR... Des nations, hier ennemies se donnent pour construire le premier grand synchrotron à protons : 1 kilomètre de long, énergie de 25 GeV : Autriche, Belgique, Danemark, Espagne, France, Hollande, Irlande, Italie, Norvège, RFA (Allemagne de l'ouest), Royaume Uni, Suède, Suisse, mettent en commun des moyens individuellement dérisoires, pour surmonter les difficultés techniques. Chaque pays participe financièrement en fonction de son revenu national. Le synchrotron sera prêt 6 mois avant celui des Américains. La collaboration scientifique parfaite fut pour Louis Leprince-Ringuet le prototype de ce que devait devenir un jour l'Europe... Progressivement la collaboration s'ouvrit aux savants soviétiques, américains, yougoslaves, hongrois...

Louis Leprince-Ringuet pressentit dès le départ la révolution que la naissance du CERN inaugurait par le Laboratoire de l'X. "Les machines ont gagné la course en énergie "contre le cosmique" "Finie l'Aventure des cosmiques, à l'Aiguille du Midi, au Jungfraujöch... Toutes mes équipes de l'X me rejoignent dans une nouvelle aventure scientifique, celle du CERN de Genève, où extensions " jusqu'à former un gigantesque couvent à la gloire de l'atome", et découvertes majeures s'accumulaient comme en cascade.

Bernard GREGORY, brillant disciple, futur successeur comme professeur et directeur du Labo de l'X, sera responsable, avec la collaboration du CEA, de la construction de grandes chambres à bulles à hydrogène liquide : L'un des plus beaux résultats fut, en 1962, d'une antiparticule spécialement intéressante : L'anti-ksi... Devenu Directeur Général du CERN, membre actif du CNRS, Bernard Grégory consacra deux journées pleines de Mission d'évaluation au Laboratoire de Physique Nucléaire et Corpusculaire de Clermont : 1965, date du passage du Labo à une pleine reconnaissance par le CNRS ; "de l'adolescence à la première jeunesse.

Trois autres physiciens de l'X : André LAGARRIGUE (responsable de l'équipe, Paul MUSSET, André ROUSSET conçurent GARGAMELLE ("Fille de Gargantua"), chambre à bulles à liquide lourd de près de 5 mètres, où seront découverts les premiers courants leptoniques neutres. La mort brutale d'André LAGARRIGUE, d'une crise cardiaque à la fin d'un de ses cours à ORSAY, est intervenue alors qu'il était généralement prévu comme "Nobélisable".

Louis LEPRINCE-RINGUET, à l'image de son maître Maurice de BROGLIE, fut un éveilleur de vocations nobles, un formateur " d'Inventeurs d'expériences" de " Fabricants de Prototypes".
Il a toujours laissé la vedette à ses collaborateurs : grandeur et humilité... **"Qu'ils grandissent"**

Louis Leprince-Ringuet et l'Europe
Européen enthousiaste, successeur pendant dix ans de Gaston DEFERRE (à la demande du même DEFERRE) du Mouvement Européen, Louis Leprince-Ringuet, tout en reconnaissant la nécessité d'une Administration Européenne, lui reproche " son ignorance méprisante pour l'Europe des Peuples, ses traditions, ses richesses culturelles..." L'esprit, les réussites de l'Europe Scientifique suscitent son émerveillement. Ainsi la découverte en 1983 de 2 nouvelles particules de matière ultra-lourdes : les Bosons W et Z, médiateurs de l'interaction faible. Et l'arrivée du futur grand collisionneur de hadrons (L. H. C.) le remplissait de joie.

Sciences et Foi
On ne peut évoquer la vie et l'œuvre de Louis Leprince-Ringuet, sans parler de sa Foi Chrétienne, qu'il considérait comme fondatrice, et pas seulement comme un soutien dans les grandes épreuves (dont la mort de son fils Dominique lors d'une expédition en Cordillère des Andes, ou l'arrestation de son épouse Jeanne par la GESTAPO).

Ami de Pierre TEILHARD de CHARDIN, Louis Leprince-Ringuet récusait les systèmes de pensée qui nient la dimension spirituelle de l'homme. Il était plus sensible à la force transformante, révolutionnaire de l'Evangile qu'aux formulations dogmatiques détaillées et définitives : "La remise en question est une attitude scientifique primordiale".

De l'Evangile il retenait les "Loïs" de douceur, d'humilité, d'amour. D'amour, sa vie fut remplie, d'amitiés également, par-delà les options philosophiques et religieuses. D'humilité, " parce que l'Homme n'a de lumière que dans la mesure où il s'incline ; l'humilité de l'intelligence est la mesure de sa grandeur... Et le scientifique sait que son ouvrage ne sera jamais achevé : d'autres le poursuivront"... de douceur et d'humour : sa foi joyeuse aimait l'Evangile des Béatitudes, en particulier celle de la douceur, mais cette foi était tendue vers la liberté : de chercher, de créer ! Foi et Science, Musique, Peinture et toute forme d'expression artistique, vie familiale harmonieuse, accueillante, Sport et Montagne (Ecoles d'un art de vivre équilibré)... furent ses passions. Son humour a comblé des générations d'élèves, d'amis, d'auditeurs... pendant ses cours et conférences, ses inoubliables "Quarts d'heure" avec Pierre Desgraupes, et tout au long de ses ouvrages et de sa vie... et pour nous jusqu'à sa dernière Conférence au Lycée Godefroy-de-Bouillon, le 22 mars 1997... Lorsqu'il y a quelques mois, il fut rivé à son fauteuil, il disait " Lorsque je ne peux plus rien faire, je prie ; lorsque je ne peux plus prier, je dors ; et souvent, je ne peux plus dormir, je pense à tout ça, et j'attends". Les obsèques à Saint Germain des Prés furent paisibles, hautement musicales. Hélène Carrère d'Encausse rappela sa joie de vivre, sa verve, son indépendance d'esprit, sa foi rayonnante, sa merveilleuse intelligence, sa simplicité, son sens de l'amitié, sa fidélité.

Madeleine et Louis AVAN

A la suite de ce bel article de Madeleine et Louis Avan, je tiens à rappeler aux adhérents de l'ADASTA que lorsque notre association et la revue Auvergne-Sciences sont reparties au début de 1997, Monsieur Louis Leprince-Ringuet a bien voulu, à ma demande, écrire un texte inédit pour la renaissance de notre revue N° 38.
Ensuite il a continué de nous envoyer ses encouragements.

Suzanne GÉLY.

Parution D'ouvrage

"Electrostatique, magnétostatique, optique géométrique"

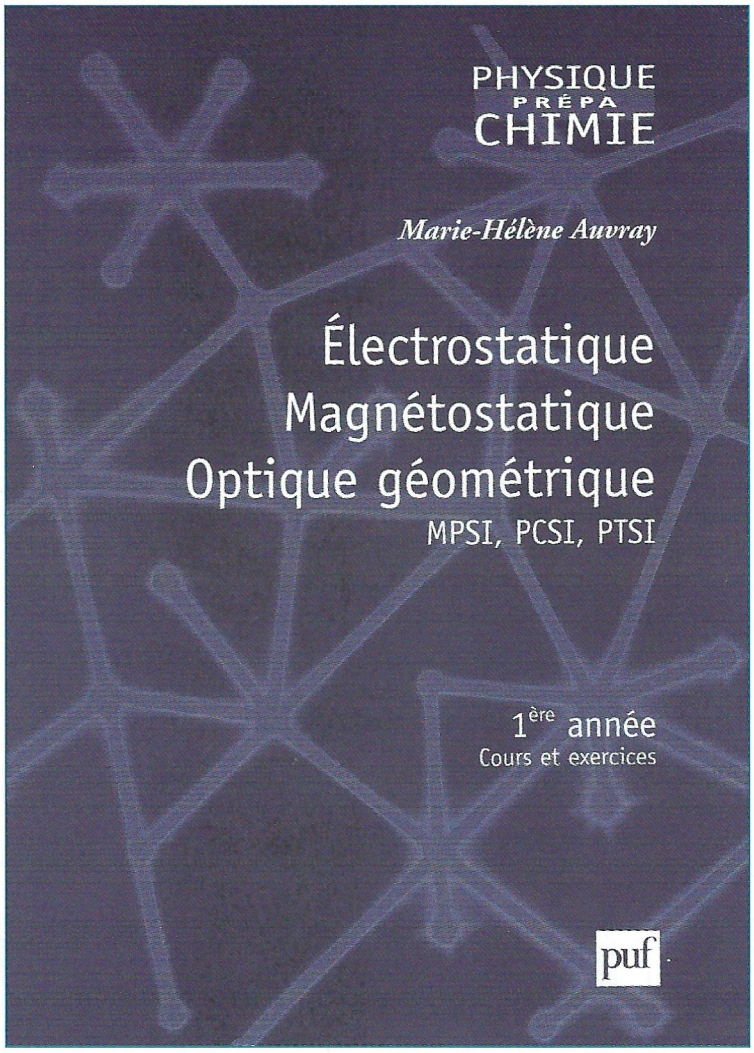
Marie-Hélène Auvray

Nous signalons à nos lecteurs la parution d'un excellent ouvrage de Marie-Hélène Auvray : "électrostatique, magnétostatique, optique géométrique". S'adressant aux élèves des classes préparatoires MPSI, PCSI, PTSI, ce livre traite des champs statiques en électromagnétisme, du mouvement des particules chargées dans ces champs, et de l'optique géométrique, souligne les analogies et permet d'envisager de nombreuses applications. Il fait partie de la collection lancée par les PUF en 2000, et dirigée par Daniel Mauras, professeur de physique-chimie au lycée Louis-le-Grand. Sont déjà parus :

- Mécanique (1ere année), par P. Brasselet
- Electromagnétisme (2ème année) par D. Mauras
- Optique ondulatoire (2ème année) par D. Mauras

Marie-Hélène Auvray est docteur-ès-Sciences, Professeur agrégé de Sciences Physiques en PCSI au lycée Louis-le-Grand à Paris. Rappelons aussi qu'elle est la fille de Madame Suzanne Gély, présidente d'honneur de l'ADASTA.

Le livre de Marie-Hélène Auvray contribuera, sans aucun doute, à la formation de futurs ingénieurs, professeurs et chercheurs.



Newton : contenu et arguments des Principes

Traduction de Madame Suzanne Gély

(Suite aux numéros 46, 47 et 48 et 49 d'Auvergne Sciences)

A cause de la concision de son argumentation, (l'ouvrage) *Principes mathématiques de la Philosophie Naturelle* de Newton a été considéré comme un des livres les plus difficiles jamais écrits. A Cambridge, seules les premières parties ont été étudiées par les candidats aux grades universitaires jusqu'à la moitié du siècle dernier. Cependant ses méthodes mathématiques auraient pu être à la portée des grands géomètres de l'antiquité tels qu'Apollonius et Archimède. Bien qu'inventeur du calcul différentiel (la méthode des fluxions), Newton n'en fit pas ouvertement usage dans son ouvrage. Il ne publia aucune preuve de la note explicative 35 (scolie) du livre II, traitant de la surface (de révolution) de moindre résistance (dans les fluides) : question que Newton pensait ne pas être inutile dans la construction des navires ; conclusion qu'il aurait atteinte par un raisonnement résultant du calcul différentiel. Newton augmenta beaucoup et modifia la seconde édition (1713) et ajouta de légers changements à la troisième (1726) sur laquelle est basée la version anglaise [1].

L'ouvrage fut divisé en 3 tomes. Le premier, commençant avec les Définitions et les Lois du mouvement, analyse les mouvements des corps attirés vers un point central. Par-là, Newton construit la théorie fondamentale du mouvement sur une orbite et fournit les moyens de rattacher les observations des astronomes aux Lois du mouvement ; il prouve que, avec une loi de force en inverse carré (de la distance), l'orbite appartiendra à la famille des coniques.

Le livre II traite des mouvements des corps dans les fluides et de l'écoulement des fluides. Il démontre la trajectoire approximative du mouvement d'une balle dans l'air ; la vitesse du son dans l'air est calculée à partir des premiers principes (1667 : environ 1000 pieds[2] par seconde) ; les tourbillons célestes[3] sont démontrés impossibles. Après les applications des principes mathématiques à la Physique dans le tome II, Newton continue dans le tome III avec leur application à l'astronomie (les planètes, les comètes, la précession des équinoxes) et à la Terre (mouvement des marées causé par la gravitation conjointe Soleil lune ; forme aplatie de la Terre). 074

Tout ceci prouve que la gravitation est une propriété universelle de la matière, partout proportionnelle aux masses concernées et inversement proportionnelle au carré de la distance entre elles.

---

(1) Le texte intégral fut écrit en latin
(2) Un pied = 30,48 cm
(3) Tourbillons célestes ou "cortex" (théorie de Descartes) voir texte de la revue n° 47

CONTENT AND ARGUMENT OF PRINCIPIA

Because of the concision of its argument Newton's *Mathematical principles of natural philosophy* has been reckoned one of the most difficult books ever written ; at Cambridge its first sections only were studied by Tripos candidates down to the middle of last century.

Yet its mathematical methods could have been grasped by the great geometers of antiquity such as Apollonios and Archimedes. Although an inventor of the calculus (the method of fluxions) Newton made no open use of it in his book. He published no proof of Book II, Scholium to Prop. 35, treating of the solid of least resistance (which Newton thought not unuseful in the building of ships), for he had reached his conclusion by a (surviving) fluxional argument. Newton much enlarged and altered the second edition (1713) and added slight changes to the third (1726) on which the English translation is based.

The work is divided into three books. The first, opening with Definitions and the Laws of Motion, analyses the motions of bodies attracted towards a centre.

Here Newton constructs the fundamental mechanical theory of motion in an orbit, and provides the means for relating the observations of astronomers to the Laws of Motion ; he proves that with an inverse-square law of force, the orbit will be a conic section.

Book I deals with the motions of bodies in fluids, and the flow of fluids.

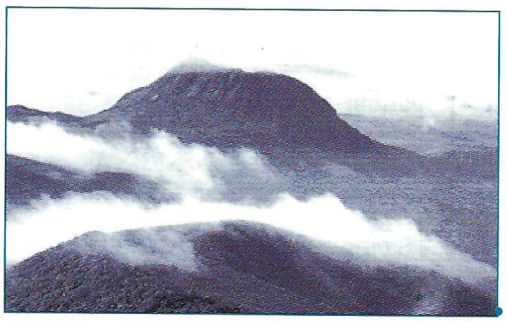
A trajectory approximating to the movement of a bullet in air is resolved ; the speed of sound in air is calculated from first principles (1687: about 1000 ft/sec) ; aetherial vortices are proved impossible. After the applications of mathematical principles to physics in Book II, Newton continues in Book III with their application to astronomy (planets, comets, the procession of the equinoxes) and to the Earth (tidal motion caused by joint soli-lunar gravitation, oblate shape of the Earth), all of which proves that gravitation is a universal property of matter, everywhere proportionate to the masses concerned and the inverse-square of the distance between them.

Dossier

Nuages, Pollution et Climat

Nadine CHAUMERLIAC

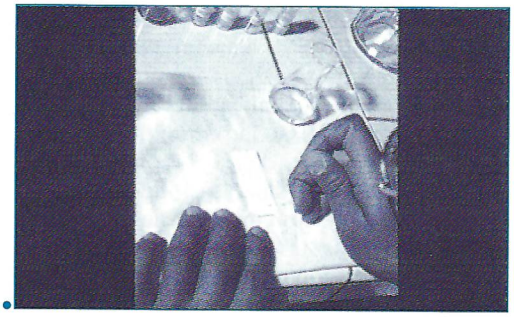
Directeur de Recherche au CNRS

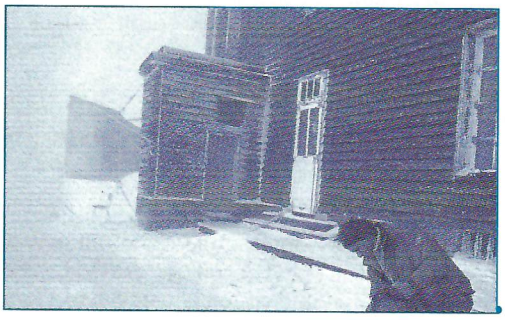


Le rôle des nuages et de leur composition chimique dans l'évolution du climat ou encore dans l'estimation de l'effet de serre est encore difficile à quantifier. Cela nécessite la connaissance de la quantité de produits redistribués par les nuages après transport, lessivage, dépôt et photolyse perturbée par les interactions nuage/rayonnement. Tous ces processus sont fortement dépendants des caractéristiques fines relatives au nombre et à la taille des particules de nuages et des aérosols.

Pour appréhender ces nombreux processus on entrevoit la nécessité de procéder à des mises en œuvre expérimentales sophistiquées.

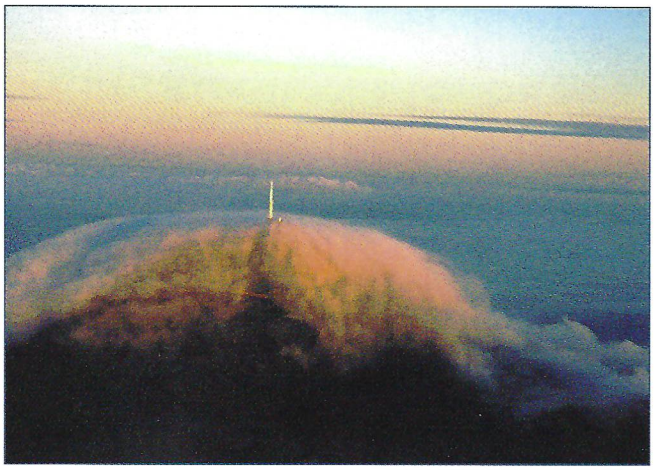
En laboratoire, il s'agit de reproduire la réalité atmosphérique où les échanges entre phases et les nombreuses réactions chimiques sont fort éloignés de leur état d'équilibre (prise en compte de cycles de condensation/évaporation successifs, écarts à la loi de Henry, dépendance à la taille variable des gouttes, à la géométrie des cristaux) et où de nombreux composés sont encore non identifiés (composés carbonylés, par exemple).





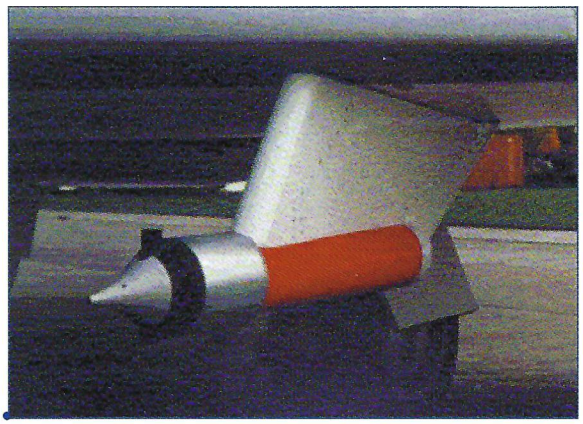
Sur le terrain, l'objectif principal va être d'effectuer au sol et en altitude des mesures chimiques et microphysiques simultanées, de chercher à séparer la fraction interstitielle (composition de l'air entre les gouttes et les cristaux) de la fraction condensée de l'échantillon nuageux, de rendre compte de la granulométrie et des propriétés optiques des nuages et des aérosols.

En télédétection spatiale, des études se développent sur la prise en compte des effets d'hétérogénéité des nuages et des particules non sphériques sur le bilan radiatif et sur la détermination des caractéristiques des nuages. De nouvelles méthodes mathématiques et physiques doivent permettre la restitution non seulement de l'épaisseur optique des nuages, du rayon effectif et du type de nuages mais aussi de l'hétérogénéité des nuages, de leur couverture fractionnaire et de la forme des cristaux.
La quantification de l'impact de la chimie des nuages aboutira in fine à l'amélioration de leur prise en compte dans les modèles de climat et dans les modèles de pollution.



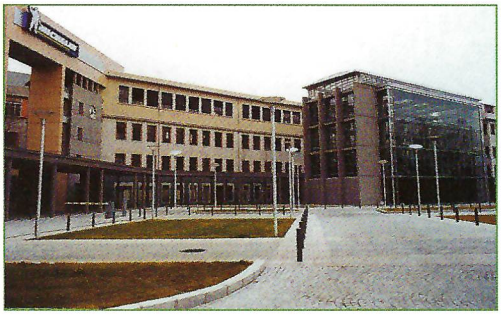
C'est dans ce contexte que travaille le Laboratoire Associé de Météorologie Physique (LaMP) de l'Université Blaise Pascal, du CNRS et de l'Observatoire de Physique du Globe de Clermont-Ferrand. Les thèmes de recherche du laboratoire concernent l'étude des nuages et de leur impact sur deux processus atmosphériques de la première importance pour la problématique du climat : les processus radiatifs et les processus physicochimiques. L'étude des nuages est un domaine de recherche particulièrement délicat, du fait du caractère multiéchelle des processus nuageux et de la complexité de leurs interactions avec d'autres processus radiatifs, diabatiques, dynamiques. physicochimiques et photochimiques. Ces thèmes sont abordés grâce à une approche théorique et numérique de modélisation sur une large gamme d'échelles spatio-temporelles et à une approche expérimentale originale couplant les aspects microphysiques et physicochimiques.

Ils s'organisent autour de quatre équipes: l'équipe **Nuage/rayonnement** qui poursuit des études sur la prise en compte des effets d'hétérogénéité des nuages et des particules non sphériques sur le bilan radiatif et sur la détermination des caractéristiques des nuages à partir de données satellitaires, l'équipe **Observations et Instrumentation** qui conçoit et développe des instruments de laboratoire et embarquables sur avions pour étudier en détail les propriétés microphysiques et radiatives des nuages, l'équipe **Processus physico-chimiques** des nuages qui étudie et paramétrise différents processus physico-chimiques : les interactions aérosol-nuage-rayonnement, la formation et la modification des précipitations, le lessivage des gaz et des particules, la physico-chimie des nuages glacés, l'équipe **Physico-chimie des systèmes nuageux** qui s'intéresse à la simulation d'épisodes de pollution à grande échelle à l'aide du modèle météorologique RAMS.



Un projet transversal aux différentes équipes est la station de chimie hétérogène du Puy de Dôme, station d'accueil pour des programmes de recherche et site d'observations continues dans le cadre de réseaux de surveillance au plan national et international.

Pour accéder à une présentation plus complète du LaMP, consultez son site web wwwobs.univ-bpclermont.fr/atmos

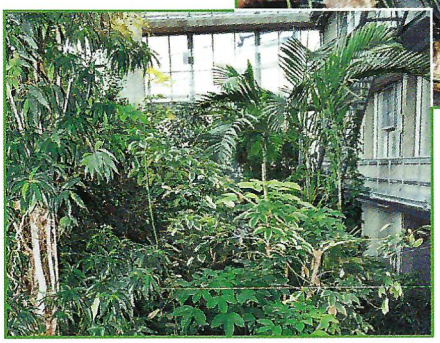


UNE SERRE TROPICALE DANS LES LOCAUX MICHELIN DE LA PLACE DES CARMES

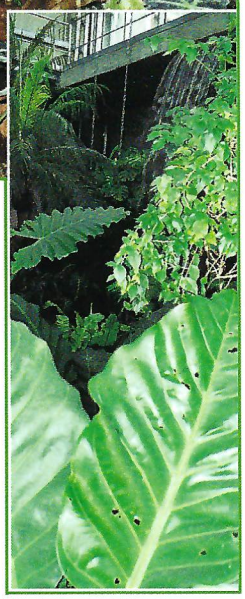
Le 31 janvier dernier un petit groupe d'adhérents ADASTA se présentait place des Carmes pour visiter, sous la conduite d'un guide, la serre tropicale de la Manufacture Michelin.

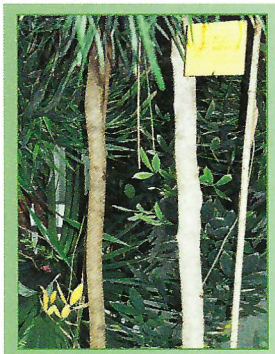
La visite commence par un petit espace aménagé en trois modules qui présentent la forêt tropicale humide, l'histoire du caoutchouc naturel, l'hévéaculture et la transformation du caoutchouc. On y apprend que c'est Charles-Marie de la Condamine, géodésien et naturaliste de Louis XV, qui découvre en 1736 une résine élastique provenant d'un arbre appelé heve par les indigènes. Les Indiens Maya nomment la résine qu'ils en tirent "cachutchu" c'est à dire l'arbre qui pleure.

Actuellement Michelin possède 6 plantations d'hévéas, dont 4 au Nigéria, et 2 au Brésil. Pour extraire le latex, il faut attendre 7 ans. L'arbre produit pendant 25 ans de 5 à 7 kg de latex par an. Le latex n'est pas la sève de l'arbre ; il est produit par des cellules particulières, les tissus laticifères, situés dans l'écorce tendre sous l'écorce dure externe, alors que la sève est transportée par des vaisseaux intérieurs de l'arbre.



La serre est un hommage rendu à la nature tropicale par Clermont-Ferrand, capitale du pneu. Elle recrée un environnement proche de celui de la forêt tropicale, notamment pour ce qui concerne la température et le degré hygrométrique. Un sol artificiel a été reconstitué sur une épaisseur de 2 mètres. Les hévéas ne sont pas les seuls représentés dans la serre. Citons, parmi de nombreuses plantes, fougères arborescentes, litchi sinensis, coffea arabica, philodendron xanadou, anturium andreanum, ananas bracteatus striatus…
On a en effet reconstitué un couvert végétal en trois niveaux : de grands arbres dont font partie les hévéas, des arbustes de sous-bois, et un niveau de plantes basses. Les plantes ont été choisies pour leurs qualités esthétiques et pour montrer quelques exemples des grandes familles de plantes tropicales qui, souvent, ont une grande importance économique.





HEVEA BRASILIENSIS

Arbre originaire d'Amérique du Sud tropicale.

Habitat naturel :
forêts tropicales humides

Hauteur maxi :
20 à 30 m.

- ***Usages :***
Parmi toutes les plantes tropicales dont les cellules contiennent du latex (1 000 espèces de 80 genres) et dont on peut obtenir du caoutchouc, l'hévéa du Brésil est le seul à avoir acquis une importance industrielle à l'époque moderne.

Particularités :
Le latex de l'hévéa est obtenu en pratiquant dans le tronc des incisions dont la profondeur ne doit pas blesser la zone cambiale entre le bois et l'écorce. La majeure partie du latex est coagulée sur place par addition d'acide formique, puis laminée, pressée pour former des balles et exportée sous cette forme.
Sa culture connut des épisodes de prospérité fabuleuses, mais également de déclin. Aujourd'hui, des débouchés dans l'avenir existent, car le caoutchouc naturel est de nouveau privilégié dans la fabrication des pneus pour automobiles.

d'après document Michelin

Jocelyne ALLEE

Photos : JP GARCIA et JC CAPELANI