

ISSN 0567-6576

Bulletin des Académie & Société Lorraines des Sciences

**ANCIENNE
SOCIÉTÉ DES SCIENCES DE NANCY**

fondée en 1828

Etablissement d'utilité publique
(Décret ministériel du 26 avril 1968)

BULLETIN TRIMESTRIEL

**TOME 30 NUMERO 3
1991**

AVIS AUX MEMBRES

COTISATIONS.

Les Membres des Académie & Société Lorraines des Sciences acquittent une cotisation annuelle. Celle-ci est fixée à 50 francs en 1988.

Le paiement de la cotisation ne donne pas droit au service du bulletin, mais permet de bénéficier d'un abonnement à tarif réduit. La remise accordée aux Membres des Académie & Société Lorraines des Sciences ne peut atteindre ou dépasser 50% du prix de vente de la publication. Son taux, proposé par le Conseil, est ratifié en simple Assemblée générale annuelle (Statuts, Titre I, Art. III).

Tout règlement est à adresser, de préférence par chèque, à l'ordre du Trésorier de l'Académie & Société Lorraines des Sciences, Biologie végétale 1er Cycle, BP 239, 54506 Vandoeuvre Cédex.

Chèque bancaire ou chèque postal au compte 45 24 V Nancy.

BULLETIN.

La vente de la publication trimestrielle "Bulletin de l'Académie & Société Lorraines des Sciences" se fait par abonnement annuel.

TARIF 1988 :

Non-Membre de l'A.S.L.S.	110 francs
Membre à jour de cotisation	60 francs

Pour la vente exceptionnelle de numéros isolés ou anciens s'adresser au Trésorier ou au Secrétaire Général, 8, rue des Magnolias, Parc Jolimont-Trinité, 54220 Malzéville.

SEANCES.

Les réunions ont lieu le deuxième jeudi de chaque mois, sauf vacances ou fêtes tombant ce jour, à 17 heures, Salle d'Honneur de l'Université, 13, place Carnot à Nancy.

Afin d'assurer une parution régulière du Bulletin, les Membres ayant présenté une communication sont invités à remettre leur manuscrit en fin de séance au Secrétaire Général. A défaut, ces manuscrits seront envoyés à son adresse ci-dessus, dans les quinze jours suivant la séance. Passé ce délai, la publication sera ajournée à une date indéterminée.

(suite 3° de couverture).

Le "Bulletin de l'Académie & Société lorraines des Sciences" est notamment indexé par : Publications bibliographiques du CDST (Pascal), Académie des Sciences d'URSS, Biological Abstracts, Chemical Abstracts, Microbiology Abstracts C.

BULLETIN

**des ACADEMIE & SOCIETE
LORRAINES DES SCIENCES**

(Ancienne Société des Sciences de Nancy)
(Fondée en 1828)

BIBLIOTHEQUE INTERUNIVERSITAIRE DE NANCY
SECTION SCIENCES

Rue du Jardin Botanique
54600 VILLERS-LES-NANCY
FRANCE

S O M M A I R E

GREFFE J.L.

-Henri POINCARÉ (1854-1912) "De la vérité d'une recherche à la recherche de la vérité".....99

LAURENS T., NICOLE D., MATLENGIEWICZ M., HENZEL N. et LAUER J.C.

-Analyse de mélanges complexes de la station de vapocraquage de Carling par résonance magnétique nucléaire du carbone-13 assistée par ordinateur.....127

FLICK J.

-La figure de la Terre.....137

HENRI POINCARÉ

1854 - 1912

"De la vérité d'une recherche à la recherche de la vérité"

par

*Jean-Louis GREFFE**

:-:-

Nul ne saurait parler avec exactitude d'Henri POINCARÉ qu'Henri POINCARÉ lui-même. Paul LANGEVIN disait de son ami : "il est comme un arbre dont le tronc est si large qu'il faudrait être quatre pour en faire le tour : un mathématicien, un astronome, un physicien, un philosophe". On a compté les feuilles de l'arbre : il y en a onze tomes de 500 feuilles chacun dont la moitié rédigée en formules mathématiques et sans compter les quatre ouvrages de philosophie des sciences.

Henri POINCARÉ fut rapidement distingué par son temps. Premier Prix au Concours Général, Major de l'Ecole Polytechnique à 19 ans, Ingénieur des Mines à 24 ans, Docteur ès Sciences la même année, Chargé de Cours à l'Université de CAEN à 25 ans, Maître de Conférences à la Sorbonne à 27 ans, Répétiteur puis Professeur à l'Ecole Polytechnique à 29 ans, Professeur à la Sorbonne à 31 ans, Membre de l'Académie des Sciences à 33 ans, Lauréat la même année d'un concours international de mathématiques organisé par le Roi de Suède - l'équivalent d'un Prix Nobel qui n'existait pas encore - Commandeur de la Légion d'Honneur au titre de l'Instruction Publique à 48 ans, élu à 54 ans à l'Académie Française à la succession de Marcellin BERTHELOT et au fauteuil de SULLY-PRUDHOMME ... Henri POINCARÉ fut reconnu par son temps.

Mais le propos de cette conférence n'est pas de rapporter les innombrables honneurs et reconnaissances qui lui furent légitimement apportés. Le temps d'une heure n'y suffirait pas et cela ne serait pas conforme à sa modestie et à son humilité, il nous paraît exister un plus grand hommage à rendre à l'illustre savant lorrain : celui de montrer comment et pourquoi il fut reconnu par son temps et celui de répondre à la question : est-il en 1991 encore d'actualité ? Dans tout travail rhétorique, comme cette conférence, il est convenable de suggérer les conclusions dans l'introduction. Je le ferai à travers ce mot d'Auguste COMTE : "L'Histoire de la Science est la Science elle-même". Je ne crois pas que cette affirmation puisse être plus vraie que pour Henri POINCARÉ.

Henri POINCARÉ est important parce qu'il a appartenu au XIX^{ème} siècle, au siècle du déterminisme et de l'intuitionnisme : sa culture en était profondément inspirée. Mais il a appartenu aussi au XX^{ème} siècle naissant, le siècle du symbolisme et du logicisme. Il s'est trouvé placé au centre du débat de l'induction contre la déduction comme moyens de recherche, de connaissance et de découverte scientifiques.

() Professeur à l'Institut National Polytechnique de Lorraine.
- Conférence tenue lors de la réunion du 16 mai 1991.*

Les contributions de POINCARÉ à la science furent fondamentales. On ne parle pas de formules de POINCARÉ, on parle de théories de POINCARÉ. Que ce soit en algèbre, en géométrie, en calcul des probabilités, en mécanique céleste ou en physique théorique les apports furent aussi variés qu'originaux. Ils n'étaient pas tous définitifs, mais tous ont contribué à l'avancement de ces sciences, Henri POINCARÉ laissant souvent à d'autres le soin de détailler les vastes perspectives qu'il ouvrait.

Mais il a aussi été un homme dont les travaux ont contribué à leur propre remise en cause. Il a été comme un homme qui marcherait sur une planche posée sur un rondin : c'est sa propre ascension, en solitaire d'ailleurs, qui a fait basculer la planche. Henri POINCARÉ n'est pas l'auteur de la théorie de la lumière - parce qu'un électron n'est pas une planète, mais la théorie des quantas ne serait pas apparue comme elle est apparue sans Henri POINCARÉ. Henri POINCARÉ n'est pas l'auteur de la relativité bien qu'auteur de travaux subtils sur la théorie des groupes laissant invariant l'espace-temps, mais peu s'en est fallu : une mort prématurée.

Henri POINCARÉ est important parce que cet intellectuel avait en science, sinon dans la vie, des idées pratiques. Il a écrit : "en devenant rigoureuse la science mathématique prend un caractère artificiel qui frappera le monde : elle oublie ses origines, on voit comment les questions peuvent se résoudre, on ne voit plus comment et pourquoi elles se posent" (1904).

Henri POINCARÉ est encore important parce qu'il a comparé la recherche scientifique à la création artistique et une démonstration mathématique à un bouquet de roses. Comme il ne croyait pas à l'erreur et à l'ignorance en mathématiques, toutes les fleurs ne pouvaient être que belles. Il a écrit qu'il avait ressenti des joies comparables à celles de l'artiste : "celles de la liberté, non celles de l'arbitraire".

Henri POINCARÉ est toujours important parce qu'il est l'un des rares scientifiques à être aussi un vrai philosophe. Pèlerin de la vérité, il se repéra fréquemment par rapport à KANT et sa démarche semble avoir vivement intéressé HEIDEGGER, le POINCARÉ de la Philosophie.

"De la vérité d'une recherche à la recherche de la vérité" ?

"De la vérité d'une recherche" parce qu'auteur d'une recherche authentique que nous montrerons inaliénée par le temps, POINCARÉ a expliqué comment il cherchait et comment et pourquoi il trouvait.

"A la recherche de la vérité", parce que POINCARÉ n'a jamais été en repos de la recherche, parce qu'il était convaincu de ce qu'il proclamait au Congrès International de Mathématiques de 1900 qu'il présidait : "A présent nous pouvons dire qu'on a atteint la rigueur parfaite" et qu'ensuite il a accepté au cours d'un des débats les plus passionnants et les plus passionnés de l'histoire des sciences une remise en cause de cette vérité. Autrement dit que la vérité en science n'est toujours qu'une partie d'une vérité absolue vers laquelle on tendrait. "La recherche de la vérité, écrit-il, doit être le but de notre activité, c'est la seule fin qui soit digne d'elle. Si nous voulons de plus en plus affranchir l'homme des soucis matériels, c'est pour qu'il puisse employer sa liberté reconquise à l'étude et à la contemplation de la vérité".

Nous examinons maintenant successivement :

- la vérité de l'homme ;
- la vérité du savant ;
- la vérité du philosophe.

Nous concluons en disant la contribution de POINCARÉ aux fondements des mathématiques et à l'expression de la vérité.

LA VERITE DE L'HOMME

Henri POINCARÉ naquit le 29 avril 1854, 2, rue de Guise à NANCY. De famille lorraine, son grand-père paternel, Jules-Nicolas, était pharmacien. Celui-ci eut deux fils : Léon, qui devint professeur à la Faculté de Médecine de NANCY - le père d'Henri - et Antoine, Inspecteur Général des Ponts et Chaussées qui était fixé à BAR-LE-DUC et qui fut le père de Raymond POINCARÉ, lui-même avocat, Président du Conseil, puis Président de la République de 1913 à 1920. Henri et Raymond POINCARÉ étaient donc cousins germains, le premier de 6 ans l'aîné du second.

Henri POINCARÉ avait une soeur qui, fort intelligente elle-même, devint Madame Emile BOUTROUX, épouse et collaboratrice d'un philosophe des sciences reconnu : BERGSON fut l'élève de BOUTROUX.

Le début de l'enfance de Henri POINCARÉ fut très heureux. Avec sa soeur il était choyé par une mère attentive. Mais à l'âge de cinq ans, il eut une mauvaise diphtérie qui le laissa muet pendant un an ; ses parents crurent le perdre. Il garda des séquelles de cette maladie, il était timide, maladroit en geste et en parole. Mais cette maladie lui donna aussi l'occasion et le goût de la lecture. Doté d'une mémoire prodigieuse, il retenait tout sans note. Il était aussi passionné de musique.

Il fut élève au Lycée de NANCY de 8 ans à 19 ans. Au début il n'y fut pas un bon élève : il était trop distrait et avait un cerveau qui fonctionnait hors des normes habituelles. C'est en quatrième que lui vint la passion des mathématiques. Son intelligence dans cette discipline fut telle qu'elle devint légendaire et ne lui laissait plus aucun soucis pour la suite de ses études (malgré une note éliminatoire au baccalauréat ... en mathématiques !) ELIOTT, son professeur de Mathématiques Spéciales écrivait : "J'ai dans ma classe à NANCY un monstre de mathématiques". Ce qui d'ailleurs n'était pas exact car il avait reçu aussi dans sa classe Paul APPELL, Alsacien, qui avait dû demander sa naturalisation pour entrer en Spéciales au Lycée de NANCY. En 1873, Paul APPELL entre major à l'Ecole Normale Supérieure et Henri POINCARÉ major à l'Ecole Polytechnique.

Ils étaient et restèrent d'excellents amis, Paul APPELL devenant l'un des biographes de référence d'Henri POINCARÉ. Il rapporte en particulier, l'anecdote suivante :

"Après le concours de l'Ecole Normale, nous revînmes à NANCY faire les compositions écrites pour l'Ecole Polytechnique du 4 au 6 août 1873. Nous trouvâmes la ville dans l'allégresse ; des drapeaux partout à toutes les maisons, à toutes les voitures, jusqu'aux charrettes des laitiers et des maraîchers ; les troupes allemandes venaient de partir, et précisément pendant une composition de dessin, l'avant-garde de l'armée française fit son entrée à NANCY. Jour de joie et de délivrance, bien mélancolique pour les Alsaciens, qui pensaient que la libération du territoire français allait s'arrêter, pour longtemps peut-être, aux Vosges. POINCARÉ rendu nerveux par l'émotion, avait particulièrement mal réussi son lavis, exercice auquel il n'excellait pas d'ailleurs ; il avait collé sa feuille de papier trop vite, puis étendu trop rapidement les couches d'encre de Chine successives avant que les précédentes fussent sèches. Il avait hâte de rejoindre à l'Hôtel de Ville, sa famille qui attendait l'arrivée des troupes françaises sur la place Stanislas".

Par son succès à l'X, Henri POINCARÉ quittait NANCY, mais il y revint souvent, très attaché à la Lorraine et à l'égal de son cousin, mais d'une façon différente, il fut un patriote exacerbé.

Du major de l'X, ses camarades de promotion disaient : "le grand cheval fou". POINCARÉ ne prenait aucune note et était toujours premier, sauf en dessin et en exercices militaires. Il se montra un camarade extrêmement généreux. Comme en taupé, il faisait passer ses camarades en interrogation avant les examens. Il fut un très grand major de l'X.

Il poursuivit des études très brillantes à l'Ecole des Mines où il prépara surtout un Doctorat ès Sciences. Ce Doctorat acquis, il obtint son détachement du Corps des Mines pour une charge d'enseignement à CAEN où il restera deux ans. Il y épousa Mlle POUILLAIN D'ANDECY, descendante de GEOFFROY SAINT-HILAIRE. Il eut quatre enfants : trois filles et un fils, lui-même brillant élève de l'Ecole Polytechnique. Mais son père n'en sut rien, il était déjà mort.

La vie d'Henri POINCARÉ ne comporte pas de faits très notables qui ne se confondent avec ses découvertes scientifiques dont nous parlerons dans un instant. Pour l'époque il fit des voyages fréquents en Autriche, en Russie et en Suède. Il était friand de la boutade suivante : à un interlocuteur il posait la question : quel est le comble pour un mathématicien ? La réponse était : c'est de s'appeler POINCARÉ, car un point n'est ni carré, ni rond, ni rectangle, ni triangle. Un point c'est tout. PAINLEVE lui au moins a un nom logique. POINCARÉ voulut d'ailleurs changer de nom et reprendre l'éthymologie vosgienne de son nom : Pont-Carré.

A partir de 1902, POINCARÉ produit trois livres de philosophie des sciences: la Science et l'Hypothèse, la Valeur de la Science et Science et Méthode. Ces ouvrages sont d'une clarté exemplaire. Le style allie l'économie des mots à la justesse de la pensée. Il fut traduit en 17 langues et il me paraît tout-à-fait incompréhensible que son élection à l'Académie Française où il fut reçu à une seule voix de majorité, fut discutée. Il y fut le successeur de SULLY-PRUDHOMME, maître de forges, poète et philosophe, premier Prix Nobel de Littérature à qui Henri POINCARÉ rendit un hommage vibrant, d'une poésie et d'une délicatesse recherchées.

A 58 ans, Henri POINCARÉ est atteint d'un cancer de l'intestin. Il est opéré avec succès le 9 juillet 1912, mais meurt d'une thrombose en se levant le 17 juillet suivant.

Deux jours après, paraît dans le journal la Dépêche de Rouen, l'éditorial suivant, dont la qualité m'oblige à vous en donner la quasi intégralité. Il est dû au philosophe normand ALAIN :

"Il faut rendre hommage à l'illustre POINCARÉ que la science vient de perdre. Mais comment faire ? Il est lumineux et profond dans ces livres à couverture rouge. Mais ses pensées intimes se développaient dans un autre plan. Il s'agit de ces raccourcis merveilleux comme disait LEIBNIZ, qui traduisent en formules les faits de l'expérience ... Ce sont des perspectives abstraites et des mondes de symboles , où s'exercent alors, comme pour d'autres dans le monde des objets, une rêverie ordonnée, une intuition, un pressentiment, une divination véritable. Genre de travail qui est propre au génie, et qui est justement plus nécessaire dans la Mathématique que partout ailleurs. Car s'il fallait essayer péniblement toutes les combinaisons possibles, on n'en finirait pas. Mais le génie, après un long travail d'apprentissage, aperçoit d'un coup d'oeil les développements féconds, comme un jardinier reconnaît la branche fertile, et supprime les autres ...

Je relisais ce matin les pages où le profond penseur, pour se délasser, a décrit les éclairs et les caprices de l'invention. La pensée construit toujours des ponts sur des abîmes. Il y a une rigueur des démonstrations que l'on admire maintenant dans la géométrie. Mais il faut savoir que ce travail de mise en place et, si je puis le dire, d'exploitation et de révision, est un travail de critique qui vient après l'invention proprement dite. Le beau moment, dans toute science, est celui où l'on devine par tous moyens, et sans être en mesure de prouver. Par exemple, quand NEWTON pensa que la lune était soumise à la pesanteur terrestre comme une pomme, il fut bien des années encore, par l'imperfection des mesures, avant de pouvoir mettre la chose en forme, et la communiquer aux autres. Mais l'étrange et l'insaisissable, c'est que ces anticipations soudaines s'exercent alors dans le champ de combinaisons abstraites, où les x , les y , les fractions, les radicaux, d'autres symboles encore gravitent selon leur propre définition.

Un de ces mondes prodigieux vient de finir avec son créateur".

Un an après la mort de POINCARÉ, un hommage lui est rendu à la Sorbonne, une série de témoignages est publiée dans la revue de Métaphysique et de Morale. Ses amis font publier un 4^{ème} ouvrage de philosophie scientifique intitulé "Les Dernières Pensées" et qui est un recueil de notes et d'articles. Une plaque est apposée sur la maison où il est né Rue de Guise. Une rue de NANCY porte son nom. Enfin le Lycée de Nancy devient le Lycée Henri-Poincaré. Le décret est signé du 8 juillet 1913 de Raymond POINCARÉ, Président du Conseil, de Lucien POINCARÉ, Directeur des enseignements secondaires et de Louis BARTHOU, alors Ministre de l'Instruction Publique et des Beaux Arts.

La mémoire d'Henri POINCARÉ connut ensuite une éclipse. C'est un fait étonnant mais réel, l'époque est aux bouleversements. C'est la guerre de 1914-1918. Ce sont en Mathématiques les développements rapides de la théorie des ensembles, de la métamathématique de D. HILBERT et les débuts de l'Ecole Française bourbakiste. C'est en astronomie la transition entre l'astronomie de position et l'astrophysique. Ce sont en physique les explosions que représentent la théorie des quanta, la relativité restreinte puis générale, la physique atomique et nucléaire.

Comme toute éclipse, elle eut une fin, et justice fut rendue à la mémoire d'Henri POINCARÉ à l'occasion du centenaire de sa naissance en 1954. Des célébrations importantes eurent lieu à PARIS et à NANCY. Une exposition se tint à l'Ecole Polytechnique. Une plaque fut apposée sur la maison qu'il habitait à PARIS, 63, rue Claude Bernard. L'édition complète de ses oeuvres commencée en 1913 est enfin achevée. Un timbre à l'effigie du grand savant fut émis. Un sous-marin, puis le bâtiment des recherches océanographiques de la Marine Nationale est baptisé Henri POINCARÉ ainsi que la 3^{ème} usine hydro-électrique du Rhône (après GENISSIAT et DONZERE-MONDRAGON).

Enfin le département de mathématiques de la Faculté des Sciences de l'Université de PARIS prend le nom d'Institut Henri Poincaré et est doté d'une des plus belles bibliothèques de mathématiques qui existent. Cet Institut reste à l'heure actuelle un Centre de Recherche Mathématique très important associé de multiples façons au CNRS. Il est doublé maintenant d'un Centre de Recherche de Pédagogie et d'Histoire des Mathématiques.

La vérité du savant

Henri POINCARÉ fut l'un des derniers savants universels. Son champ de création a couvert les mathématiques théoriques et appliquées, l'astronomie, la mécanique, différentes parties de la physique. Son éclectisme était évident, mais il est remarquable qu'il ait eu une réussite aussi universelle. En connaissance et en prise directe avec les problèmes scientifiques de son temps, il ne s'est pas créé des problèmes : il a résolu des problèmes du moment, leur faisant parcourir d'un trait de grandes enjambées. Il a d'ailleurs donné à certaines de ses découvertes scientifiques le nom des auteurs qui les avaient inspirées et initiées : il en est ainsi des groupes de KLEIN ou des fonctions de FUCHS. Ces savants de l'époque avaient créé de nouveaux êtres mathématiques qu'ils considéraient eux-mêmes comme "exotiques". Les connaissances et la perspicacité d'Henri POINCARÉ ont fait que ces nouveaux objets apparus dans le champ d'investigation des mathématiques et triés parmi beaucoup d'autres, loin d'être particuliers et exotiques, fournissaient de nouvelles bases intéressantes aux développements de l'algèbre ou de l'analyse. Et Henri POINCARÉ s'est attaché à ces développements.

Toujours très pragmatique et attaché aux conséquences tangibles, et même sociales, de ses découvertes, le grand savant lorrain a poussé jusque dans ses derniers retranchements sa recherche mathématique. Il a donc traversé l'astronomie, où la conjoncture lui a donné l'occasion d'une contribution majeure à cette science, pour arriver à la mécanique, à la mécanique des fluides, puis à la télégraphie sans fil pour retourner à la mécanique, si particulière, de l'électron ainsi qu'au comportement du photon, le laissant au bord de la découverte de la relativité restreinte : rappelons-le, une mort prématurée à 58 ans l'a empêché de rassembler les morceaux, il les avait pourtant tous en main.

Groupes de KLEIN-POINCARÉ (1881)

Considérons trois objets : A, B et R ; ainsi qu'une règle du jeu : on combine (x) chacun de ces objets avec eux-mêmes ou entre eux suivant la règle

(x)	R	A	B
R	R	A	B
A	A	B	R
B	B	R	A

On voit d'abord que la combinaison ou produit de deux objets redonne un objet connu (A, ou B ou R) et donc que le processus opérationnel peut être répété à l'infini. On voit ensuite que l'opération : "produit par R" est une opération neutre: elle redonne toujours l'objet dont on est parti. On voit enfin que chacune des lignes du tableau peut être déduite de la précédente par permutation circulaire, même lorsqu'ayant atteint la fin du tableau on recommence à la première ligne. Par ces trois objets et cette opération (commutative) on définit un groupe fini, cyclique, d'ordre trois. Henri POINCARÉ s'est alors aperçu que la règle de la permutation circulaire pouvait être violée à partir de l'ordre quatre et que l'on obtenait alors logiquement un nouveau jeu, déjà découvert par KLEIN.

La réalité dépasse souvent la fiction. La fiction sert parfois la réalité. Le conçoit Henri POINCARÉ fait dans la cour de l'Ecole Polytechnique des exercices

militaires : repos (R), à droite-droite (DD), demi-tour (DT), à gauche-gauche (GG). Il fait observer au gentil animateur que : droite-droite suivi d'un demi-tour était plus pénible qu'un seul gauche-gauche et revenait au même. Que de plus, faire un demi-tour puis un autre demi-tour, il valait mieux rester au repos, etc ... :

(x)	R	DD	DT	GG
R	R	DD	DT	GG
DD	DD	DT	GG	R
DT	DT	GG	R	DD
GG	GG	R	DD	DT

Ces observations n'ont pas valu au conscrit POINCARÉ une excellente note en exercices militaires mais l'ont conduit à formuler les choses suivant un "groupe cyclique commutatif d'ordre quatre", donc avec permutation circulaire, toujours comme dans une ronde. De quoi laisser "coi", mon adjudant!

Mais le conscrit POINCARÉ a d'autres problèmes, ceux-là d'ordre vestimentaire. Il a quatre façons de mettre ses chaussettes, la façon réglementaire (R), à l'envers (E), au mauvais pied (C, comme contraire), ou bien à l'envers et au mauvais pied (M, comme mélange). Et cela lui arrivait. Donc mettre ses chaussettes à l'envers (E), puis les changer de pied (C), c'est faire comme M : $E \times C = C \times E = M$. Mettre ses chaussettes à l'envers (E), puis de nouveau à l'envers (E), c'est les mettre de façon réglementaire (R), etc...

(x)	R	E	C	M
R	R	E	C	M
E	E	R	M	C
C	C	M	R	E
M	M	C	E	R

POINCARÉ définit ainsi un deuxième groupe fini et commutatif d'ordre quatre mais celui-ci n'est plus cyclique. Il démontre que c'est le seul autre qui puisse exister. Il reconnaît un groupe déjà décrit par KLEIN et généralise la génération de tels groupes à n'importe quel ordre.

Il trouve, de plus, l'ensemble des fonctions invariantes lorsqu'on opère sur les variables les opérations des groupes de KLEIN et les appelle fonctions kleinéennes. On peut, par exemple, déduire la main gauche de la main droite par une opération de groupe de KLEIN. Le volume de la main gauche est égal au volume de la main droite : la fonction volume est une fonction kleinéenne. Pour la petite histoire, le mathématicien allemand KLEIN est mort toujours impressionné d'avoir été immortalisé par celui qui était devenu son ami : POINCARÉ.

Fonctions Fuschiennes (1882)

Il existe des fonctions périodiques, c'est-à-dire des fonctions qui reprennent périodiquement les mêmes valeurs : l'heure est une fonction périodique du temps. Ces fonctions sont invariantes dans le groupe des translations sur le temps. On appelle période la plus petite durée au bout de laquelle une fonction reprend des valeurs identiques ; mais tout multiple de la période reste une période :

$$F(z + T) = F(z + 2T) = \dots = F(z + nT) = \dots = F(z)$$

(quelque soit z et n entier positif, négatif ou nul).

Le mathématicien allemand FUCHS propose une première généralisation des fonctions périodiques en montrant qu'il pouvait exister des fonctions doublement périodiques :

$$F(z + T_1) = F(z) \text{ et } F(z + T_2) = F(z)$$

avec : T_1 différent de T_2

Ces fonctions sont complexes. Leurs expressions algébriques ne sont pas en général simples.

POINCARÉ recherche alors la possibilité d'une éventuelle généralisation absolue de telles fonctions, invariantes par transformation de la variable de telle sorte que :

$$F(z) = F[f(z)] = F[f[f(z)]] = F[f[f[f(z)]]] = \dots,$$

des fonctions gigognes, en quelque sorte, POINCARÉ les appelle naturellement "automorphes". Il trouve leur seule forme possible :

$$f(z) = \frac{az + b}{cz + d}$$

et démontre qu'il existe une infinité dénombrable de quartets a, b, c, d , réels ou complexes, tels que : $ad - bc = 1$, qui les font répondre à la question. On retrouve alors une suite d'objets qui forme un groupe. POINCARÉ lui donne le nom de groupe de FUCHS, et démontre qu'il s'agit bien de la généralisation maximum des fonctions "périodiques". Il démontre encore que tout point d'une courbe algébrique (c'est-à-dire paramétrable) peut s'exprimer au moyen de fonctions automorphes.

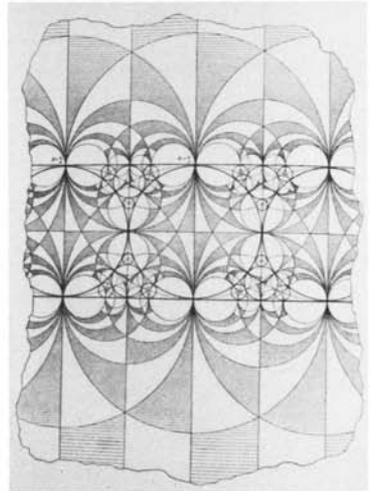
POINCARÉ s'intéresse encore aux transformations géométriques associées au groupe défini plus haut et montre qu'aux générations successives des fonctions automorphes, correspond un pavage sans lacune ni chevauchement du plan. Ce résultat, qui est en réalité extrêmement puissant, est à l'origine d'une nouvelle géométrie non euclidienne, la géométrie de POINCARÉ, dans laquelle, par un point, il passe deux droites parallèles à une droite donnée, ou encore dans laquelle la somme des angles d'un triangle est inférieure à deux droits. Plus que cette géométrie anecdotique, la théorie développée par POINCARÉ sur les groupes de FUCHS est à l'origine de toute une nouvelle science : la topologie algébrique qui est la science-pont entre l'algèbre ou théorie des nombres et l'analyse ou étude et théorie des fonctions. Jusqu'à POINCARÉ, algèbre et analyse avaient grandi indépendamment, devenant chacune de plus en plus spécialisée. A partir de POINCARÉ, un pont est donc établi entre les notions de nombres, de suites de nombres et celle de continuité qui est la base de l'analyse.



Henri POINCARÉ



Paul APPELL



*Graphes des fonctions
automorphes*

Le "Grand Théorème" de POINCARÉ (1891)

De l'algèbre, on passe donc à l'analyse et le problème majeur qui apparaît à l'époque et qui ne cesse d'occuper les mathématiciens, aujourd'hui encore, est la résolution des équations différentielles à coefficients non constants, ou bien non linéaires. Les équations de la cinétique chimique sont de telles équations.

Soit par exemple, l'équation du second ordre :

$$y''(x) + f_1(x)y'(x) + f_2(x)y(x) = g(x)$$

avec les conditions initiales indispensables à sa complète résolution :

$$y(x_0) = y_0, \text{ et } y'(x_0) = y'_0$$

POINCARÉ démontre que, sous certaines conditions (toujours réalisées dans la réalité physique), la solution de l'équation différentielle (qu'on ne sait peut-être pas expliciter, en tout cas analytiquement) possède les mêmes singularités que celles des coefficients $f_1(x)$ et $f_2(x)$ et n'en possède pas d'autres. Ce qu'il y a de crucial pour un système physico-chimique, biologique ou économique, c'est de savoir déjà s'il va mourir ou au contraire diverger. Ensuite, vient seulement le détail. Le théorème de POINCARÉ répond justement à cette question et, ce qu'il y a de remarquable : pas sur la solution mais sur l'énoncé du problème. C'est probablement l'un des plus grands théorèmes des mathématiques en attendant, peut-être, ceux donnant les solutions effectives des équations différentielles difficiles. Et celles de la chimie le sont.

Le problème des trois corps (1889)

En 1889, l'astronomie de position était une science aux succès déjà nombreux : on savait prédire le mouvement des astres, les éclipses, les marées, bien d'autres phénomènes encore, grâce à la loi de la gravitation universelle de NEWTON, et aux célèbres travaux de KEPLER (loi des aires). LE VERRIER avait même prévu l'existence de Neptune par le calcul.

Néanmoins, certaines observations échappaient à l'interprétation, celle-ci se faisait le plus souvent en extrapolant des données déjà consignées (pour les marées ou les éclipses par exemple). La force de certaines grandes marées demeurait inexpiquée, comme l'étaient certains mouvements de la lune, certaines occultations des satellites de Jupiter. Les lois de KEPLER, appliquées à deux seuls corps en présence étaient un modèle suffisant pour expliquer beaucoup de phénomènes, mais pas tous les phénomènes observés. Il était nécessaire de tenir compte des éventuelles perturbations dues aux autres corps célestes en présence.

Le Roi OSCAR II, Roi de Suède, mécène, fort cultivé en mathématiques, marin et régnant sur une grande puissance maritime, ouvrit en 1884, un concours international accessible à n'importe quel mathématicien ou astronome sur le problème de n corps en interaction. Conseillé par le premier mathématicien de Suède, M. MITTAG-LEFFLER, pour l'énoncé du problème, il précisa qu'il ne s'agissait pas forcément de résoudre complètement le problème, ce qui était probablement impossible (et ce qui reste analytiquement impossible en 1991), mais au moins de dire s'il y a une ou plusieurs solutions et d'avancer dans des techniques de résolution, au moins partielles, du problème.

Henri POINCARÉ, qui remporta brillamment le concours, comme il sera montré plus loin, indiqua d'emblée qu'un grand pas serait franchi si l'on arrivait déjà à résoudre le problème des trois corps. Il posa donc : connaissant les positions

(P_1, P_2 et P_3) et les vitesses (\bar{V}_1, \bar{V}_2 et \bar{V}_3) de trois corps (de masse m_1, m_2 et m_3) à un instant donné, reconstituer les trajectoires passées et prévoir les trajectoires à venir des trois corps.

L'équation du problème est celle de l'attraction universelle pour trois corps :

$$\frac{d^2 \overline{OP_i}}{dt^2} = m_i \sum_{j=1}^3 k m_j \frac{\overline{P_i P_j}}{|\overline{P_i P_j}|^3}, \quad i = 1, 2, 3$$

(k est la constante de l'attraction universelle).

Il s'agit en réalité, d'un système de neuf équations différentielles scalaires du second ordre, couplées, non linéaires, à coefficients non constants. La variable temps n'est pas explicite dans les équations. Pour résoudre ce problème, il faut effectuer dix-huit intégrations à partir de dix-huits conditions initiales. POINCARÉ a donné les dix intégrations analytiquement possibles et a démontré qu'il ne pouvait pas y en avoir d'autres explicites. Parmi ces dix intégrations, six expriment la non-accélération ou décélération du centre de gravité des masses, trois la conservation du moment cinétique de l'ensemble, et une, la conservation de son énergie. Pour les autres intégrations, impossibles analytiquement, POINCARÉ a proposé des solutions approchées à l'aide d'une de ses inventions : une fonction perturbatrice, elle-même définie à l'aide d'une série dont les termes sont d'abord convergents et ensuite divergents. Il est le premier mathématicien à avoir mis en évidence et s'être servi d'une telle série.

POINCARÉ retrouve naturellement la solution de KEPLER lorsqu'une des masses devient nulle et résout aussi le problème d'un corps très lourd en interaction avec une infinité de corps relativement légers (Saturne et ses anneaux).

Les candidats concourraient de façon anonyme. Leur dossier était identifié par une épigraphe. POINCARÉ choisit :

"Numquam praescriptos transibunt sidera fines" (les astres ne dépasseront jamais les limites prédites).

Il retrouvera, concourant avec lui, son excellent camarade de taupe : Paul APPELL.

"Procès-verbal dressé par devant S.M. le Roi au Palais de Stockholm, le 20 janvier 1889, en présence de S. Exc. M. le Comte EHRENSVARD, Ministre des Affaires Etrangères, M.G. WENNENERBERG, Ministre des Cultes et de l'Instruction Publique, M.R.-O. SCHJOTT, Ministre Norvégien et de M. G. MITTAG-LEFFLER, Professeur à l'Université de Stockholm.

§1. La Commission nommée par S. M. le Roi, en date du 25 novembre 1884, pour examiner des mémoires ayant concouru pour le prix en mathématiques offert par sa Majesté, et composée de M. Carl WEIERTRASS, Professeur à l'Université de Berlin, M. Charles HERMITE (*), Professeur à la Sorbonne à Paris, et M. Gosta MITTAG-LEFFLER, Professeur à l'Université de Stockholm, ayant terminé ses travaux, le rapport de la commission fut soumis au Roi.

(*) Charles HERMITE, Lorrain, né à Dieuze en 1822, mort à Paris en 1901

Il ressort de ce rapport que la commission a été de l'opinion unanime.

- que le mémoire qui est intitulé, sur le problème des trois corps et les équations de la dynamique avec la devise : "Numquam praescriptos transibunt sidera fines", est l'oeuvre profonde et originale d'un génie mathématique, dont la place est marquée parmi les grands géomètres du siècle. Les plus importantes et les plus difficiles questions, comme la stabilité du système du monde, l'expression analytique des coordonnées des planètes par des séries de sinus et de cosinus, des multiples du temps, puis l'étude, on ne peut plus remarquable des mouvements asymptotiques, la découverte de formes de mouvements où les distances des corps restant comprises entre des limites fixes, on ne peut cependant exprimer leurs coordonnées par des séries trigonométriques, d'autres sujets encore, que nous n'indiquons point, sont traités par des méthodes qui ouvrent, il n'est que juste de le dire, une époque nouvelle dans la mécanique céleste. Les notions analytiques inconnues de LAGRANGE et de LAPLACE qui n'ont été acquises que de notre temps, ont un rôle essentiel dans ces questions si difficiles où le talent de l'auteur se montre dans tout son éclat. Une fois de plus, se trouve ainsi confirmée cette observation que les plus grands progrès de l'astronomie, de la physique et des découvertes qui étendent le domaine des mathématiques abstraites, se produisent simultanément, comme s'ils étaient appelés à se seconder en concourant au même but.

- et que la commission a de même été unanime dans l'opinion,
- que l'auteur du mémoire qui porte pour titre :

"Sur les intégrales des fonctions à multiplicateurs et leurs applications au développement des fonctions abéliennes en séries trigonométriques et a pour devise :

"Nous devons l'unique science
Que l'homme puisse conquérir
Aux chercheurs dont la patience
En a laissé les fruits mûrir",

a montré un talent mathématique du premier ordre,

- et que son mémoire est extrêmement digne de l'attention des géomètres.

§2. S.M. le Roi daigna décerner :

-le prix offert par sa Majesté et composé d'une médaille en or évaluée à environ 1 000 F, ainsi que la somme de 2 500 couronnes, à l'auteur du mémoire, muni de l'épigraphe : "Numquam praescriptos transibunt sidera fines" et :

- un exemplaire de la médaille à l'effigie de Sa Majesté et portant l'inscription : "in sui memoriam" à l'auteur du mémoire portant l'épigraphe :

"Nous devons l'unique science
Que l'homme puisse conquérir
Aux chercheurs dont la patience
En a laissé les fruits mûrir".

§3. S.M. le Roi ayant ensuite ouvert les bulletins accompagnant les dit mémoires, il a été constaté que le bulletin à l'épigraphe : "Numquam praescriptos transibunt sidera fines", portait le nom de M. H. POINCARÉ, PARIS.

et celui de l'épigraphe :

"Nous devons l'unique science
Que l'homme puisse conquérir
Aux chercheurs dont la patience
En a laissé les fruits mûrir"

le nom de Paul APPELL, PARIS.

Ainsi passé,
Au Château de Stockholm, le 20 janvier 1889

Oscar

M.B. EHRENSVARD
P.O. SCHJOTT

G. WENNENERBERG
G. MITTAG-LEFFLER

Otto PRINTZ-SKOLD"

Théorie des marées (1900)

Ce très grand succès remporté au Concours de Suède, l'équivalent d'un prix Nobel actuel, encouragea POINCARÉ dans d'autres voies de la mécanique céleste. Il fit la théorie de la forme d'une masse fluide en rotation uniforme dans un champ de pesanteur et montra qu'à faible vitesse de rotation, la forme était oblongue et stable, qu'à plus grande vitesse la forme oblongue s'accuse dans le même sens et sa stabilité diminue ; qu'à vitesse encore supérieure, la figure devient instable, prend une forme de poire, et le corps a tendance à se partager en deux corps sphériques. Certains (dont POINCARÉ) ont vu là une origine possible du système Terre-Lune. Cette hypothèse n'est plus retenue actuellement car la composition chimique de la Lune, en pourcentage en éléments, est notablement différente de celle de la Terre. A moins qu'au moment du partage, il y ait eu une ségrégation des masses.

A partir de ce modèle d'une masse fluide en rotation, POINCARÉ établit une théorie mathématique des marées qui tient compte des forces de cohésion de l'eau et de la présence des continents.

Les théories physiques

POINCARÉ, mathématicien de haute classe, esprit pénétrant et critique, était particulièrement désigné pour s'occuper avec fruit de Physique mathématique. Il rédigea d'abord des traités, ce que d'autres savants (LANGEVIN, LORENTZ, MICHELSON ...) ne faisaient pas.

Ce travail didactique était sources d'éclaircissement, de mises au point, d'idées nouvelles. Ensuite, notamment dans les domaines de l'Optique et de l'Electromagnétisme, il a su lui-même faire oeuvre de théoricien en découvrant des idées et des interprétations nouvelles. Il avait beaucoup réfléchi à la question du mouvement absolu et du mouvement relatif. Il ne croyait pas au mouvement absolu et n'avait été nullement surpris par le résultat négatif de l'expérience de MICHELSON.

Il avait approfondi toutes les difficultés de l'Electrodynamique des électrons en mouvement, et il connaissait les artifices introduits successivement sous le nom de temps local de LORENTZ ou de contraction de FITZGERALD, pour tenir compte de l'invariance étonnante des équations de l'Electromagnétisme et du résultat de l'expérience de MICHELSON. Dans un célèbre mémoire présenté à l'Université de Palerme, il avait donné les formules de la cinématique relativiste,

prenant pleinement à son compte que la masse de l'électron, dépendait de sa vitesse. Pourquoi POINCARÉ n'est-il pas l'auteur de la Relativité Restreinte ? Probablement par ce qu'il était trop mathématicien. Cette question sera abordée dans la troisième partie de la Conférence.

Des théories physiques, POINCARÉ, ne reniant jamais sa formation d'ingénieur et la vocation socialement immédiate de son oeuvre, s'est penché sur de nombreux problèmes techniques souvent insoupçonnés. Appelé en expert pour décider entre différentes interprétations et suggérer des expériences nouvelles ou bien, entraîné par le propre déroulement de sa pensée, il fit avancer de nombreuses techniques de façon déterminante. Il s'occupa de machines électriques, d'induction unipolaire, d'anneaux de collecteurs, de coefficient de mutuelle induction. Il s'occupa de diffraction d'ondes hertziennes, d'énergie électromagnétique, de propriétés diélectriques et magnétiques de milieux déformables, de capillarité, enfin de nombreuses questions relatives à la télégraphie sans fil que lui suggérait un cours qu'il avait accepté de donner à l'école, qui devait devenir l'actuelle Ecole des Télécommunications.

En terme de conclusion, il faut reconnaître qu'en 1991, la plupart des découvertes d'Henri POINCARÉ ne reste enseignée que dans des cours spécialisés. Cela prouve d'abord la justesse et ensuite l'anticipation de ses travaux. L'auteur de ces lignes reste intimement persuadé qu'il pourrait arriver que l'on redécouvre en 1991, des résultats qui dorment dans les cartons d'Henri POINCARÉ ou qui en sont des conséquences immédiates : les recherches bibliographiques ne remontent pas si loin. C'est certainement une erreur en ce qui concerne Henri POINCARÉ car, en employant une terminologie contemporaine, il a été "généialement pluridisciplinaire".

La vérité du philosophe

Dans la maturité de sa création scientifique, Henri POINCARÉ eut envie de dire ce qu'était pour lui la science, ce qu'il en pensait, ce qu'il pensait de son avenir. Il hésita beaucoup à le faire, pensant soustraire à sa réflexion mathématique, alors que tous autour de lui attendaient, lui-même aussi d'ailleurs, le temps d'un arrêt, le temps d'une réflexion philosophique. Il était autodidacte en philosophie, et pourtant s'il a heurté certains philosophes ayant pignon sur amphithéâtre, il fut reconnu par la plupart d'entre eux comme un très grand penseur de la science. Des rééditions contemporaines de ses oeuvres philosophiques aussi bien en France qu'à l'étranger prouvent la qualité et la perspicacité des réponses proposées par POINCARÉ aux questions que se posent les scientifiques, comme les non-scientifiques, sur la science, ses méthodes, sa valeur et sur l'éventuelle question de ses limites.

L'oeuvre philosophique de POINCARÉ est fixée dans quatre volumes : La Science et l'Hypothèse (1902), La Valeur de la Science (1905), Science et Méthode (1908), dernières Pensées (1913). Le premier volume eut une célébrité immédiate par son caractère inhabituel, par l'intelligence de sa vulgarisation : il dit ce qu'il avait à dire à ceux à qui il avait à le dire dans un langage approprié, alliant l'économie des mots à la justesse de la pensée. Il écrivit net et ferme, il montra une supériorité nouvelle mais ne daigna point s'en apercevoir. Deux ouvrages suivirent, complétant le premier. Ils sont plus "sentimentaux", en ce sens qu'ils sont des témoignages sur les itinéraires tortueux ou imprévus de la recherche et sur les opportunités fatales de la science. Le dernier ouvrage est posthume : il contient divers articles ou textes de conférences rassemblés par les successeurs de POINCARÉ, en son hommage, et pour pérenniser une présence prématurément otée à la science. Nous examinons maintenant quelques aspects saillants de l'oeuvre philosophique d'Henri POINCARÉ en commençant par citer ces vers de la Légende des Siècles de Victor Hugo :

*"Il n'est point de brouillards comme il
n'est point d'algèbres
Qui résistent au fond des nombres et des
cieux
A la fixité calme et sereine des yeux".*

La Science et l'Hypothèse (1902)

C'est le premier ouvrage philosophique d'Henri POINCARÉ. Il eut un très grand succès, succès qui demeure aujourd'hui par une réédition de l'oeuvre en 1968. Au conventionnalisme systématique et généralisé des savants de l'époque, POINCARÉ répond par une étude critique du rôle et des limites des conventions en science. Il le fait en quatre chapitres principaux.

Le premier traite du nombre et de la grandeur. Il y montre l'efficacité de la représentation d'une sensation plus ou moins confuse par un nombre : en mathématiques, par celle du nombre entier ; en physique, par celle d'un nombre relatif à une unité. Il fonde le raisonnement dit "par récurrence", qui sera détaillé plus loin, et qui représente pour les démonstrations mathématiques, l'éclair par rapport à une suite fastidieuse de propositions élémentaires et répétitives. Il fait de la mathématique dans la logique avant que ses successeurs ne fassent l'inverse. Le second chapitre traite de l'espace. Il pose immédiatement la question de sa relativité, question qui commençait à préoccuper les géomètres et les physiciens. POINCARÉ décrit les géométries non-euclidiennes et, au passage, en crée une nouvelle, qui s'avère en 1991 pleine de promesses encore. Le troisième chapitre traite de la force et de sa représentation mathématique, dont il est facile de dire aujourd'hui qu'elle est vectorielle. Il distingue le mouvement relatif du mouvement

absolu d'une façon remarquablement pédagogique, façon qui lui sera reprochée plus tard en grossissant les inévitables simplifications, alors qu'il avait très probablement déjà dans l'esprit les bouleversantes idées de la relativité restreinte. Le quatrième et dernier chapitre traite de la nature, c'est-à-dire de la nature qui nous est sensible, donc des échelles d'hypothèses nécessaires pour la décrire et tenter de l'expliquer.

De cette Science et Hypothèse dont la densité a probablement été rarement égalée dans cet exercice de style, il faut retenir trois idées maîtresses. D'abord l'importance de l'expression et du langage. Le langage suit l'intuition dont il est indépendant et précède la logique pour laquelle il est indispensable. Il est, par ailleurs, à l'origine de paradoxes, dont certains seront donnés plus loin, et qui sont en mesure de désespérer ceux qui descendent aux assises des mathématiques jusqu'au symbolisme inévitable des signes et des lettres et de leurs conventions dites encore avec des signes et des lettres. N'atteint-on pas un cercle vicieux ?

La seconde idée maîtresse est la défense de l'esprit, celle de la faculté de création intellectuelle : elle possède une cohérence interne, celle de "l'induction complète" qui procède de ses propres instruments pour se construire à partir d'un ensemble de propositions acceptées dans un langage accepté : les axiomes. Ensuite l'esprit fonde un ensemble de déductions qui n'appartiennent pas sérieusement au sens commun sans être des théorèmes. Le raisonnement par récurrence en est un exemple. La troisième idée maîtresse est la parente de l'induction mathématique avec l'invention physique. Cette invention est fondée sur des hypothèses : les hypothèses naturelles comme le principe de symétrie (la nature fait et fait son contraire) ; les hypothèses de continuité (la nature fera toujours pareil, les constantes universelles ne varient pas dans le temps) ; enfin les hypothèses probabilistes (le calcul des probabilités de LAPLACE est connu et utilisé par les physiciens).

La publication de la Science et l'Hypothèse a connu le succès mérité d'un chef-d'oeuvre par son originalité, par la clarté de son exposition, par sa qualité philosophique. Elle fut néanmoins critiquée surtout par RUSSELL qui donnait une prééminence à la logique sur l'expérience commune, ou du "logicisme" sur le "pragmatisme".

RUSSELL objectait à POINCARÉ que les expériences ne prouvaient pas les lois : il en faudrait une infinité. L'expérience ne fait que sélectionner la loi parmi d'autres possibles, par exemple les lois plus générales découvertes postérieurement. La controverse fixée dans un ensemble d'échanges de lettres fut très vive !

Les paradoxes

"Je mens". Je mens en disant que je mens, donc je dis la vérité.

Le barbier rase tous ceux qui ne se rasent pas eux-mêmes et ne rase pas ceux qui se rasent eux-mêmes. Doit-il se raser ? S'il ne le fait pas, il le doit ; s'il le fait, il ne le doit pas.

Il existe deux sortes d'ensembles : ceux qui sont éléments d'eux-mêmes, comme les volumes ou les couleurs : un ensemble de volumes est un volume, un ensemble de bleus est bleu, etc... ; et les ensembles qui ne sont pas éléments d'eux-mêmes : un paquet de cartes n'est pas une carte, une population n'est pas un individu, etc... Les ensembles ainsi définis sont à l'origine du paradoxe suivant : si l'ensemble ne se contient pas, il appartient à l'ensemble des ensembles qui ne se contiennent pas, donc il se contient ; si l'ensemble se contient, il n'appartient pas à l'ensemble des ensembles qui ne se contiennent pas, donc il ne se contient pas.

Ce genre de paradoxes se rencontre lorsqu'on cherche à fonder les mathématiques sur les mots et c'est Henri POINCARÉ qui, parmi les premiers, a diagnostiqué la source des paradoxes. Il peut y avoir paradoxe chaque fois qu'on définit un objet en termes d'une famille d'objets qui inclut l'objet à définir. En réalité, on ne le définit pas, on ne peut pas le définir de l'intérieur, et on peut retourner sa pseudo-définition contre elle-même.

Démontrer que deux et deux font quatre et le raisonnement par récurrence

En 1700, LEIBNITZ tenta de démontrer que deux et deux font quatre. C'est difficile, car il s'agit de trouver jusqu'où remonter dans la réduction axiomatique pour que le résultat bien connu devienne la conséquence inattaquable d'un raisonnement mathématique. Pour deux et deux font quatre, la stratégie paraît dérisoire ; pour d'autres problèmes mathématiques elle est indispensable.

On suppose connu le nombre 1, et "j'ajoute 1". On appelle :

$$1 + 1 = 2 \text{ (a)}$$

$$2 + 1 = 3 \text{ (b)}$$

$$3 + 1 = 4 \text{ (c)}$$

$$\text{et } x + 2 = (x + 1) + 1, \text{ pour } x = 1, 2 \text{ ou } 3 \text{ (d)}$$

Il ne s'agit pour l'instant que d'un apprentissage d'écriture. On en déduit :

$$2 + 2 = (2 + 1) + 1 \text{ (de a et de d)}$$

$$(2 + 1) + 1 = 3 + 1 \text{ (de b)}$$

$$3 + 1 = 4 \text{ (de c)}$$

$$\text{Conclusions : } 2 + 2 = 4$$

Il s'agit plutôt d'une vérification que d'une véritable démonstration. Il n'en est pas de même dans le raisonnement par récurrence.

"On établit d'abord un théorème pour $n = 1$ (par exemple : $a + 1 = 1 + a$ est vrai pour $a = 1$). On montre ensuite que s'il est vrai de 1, il est vrai de 2. Comme il est vrai de 1, il est donc vrai de 2, etc... On montre ensuite que s'il est vrai de $n - 1$, alors il est vrai de n . Mais il est vrai de $n - 1$ par application des $n - 1$ syllogismes à partir de 1. Il est donc vrai de n et on en conclut qu'il est vrai par tous les nombres entiers.

Cette suite de syllogismes qui ne finirait jamais se trouve ainsi réduite à une phrase de quelques lignes.

Pourquoi ce jugement s'impose-t-il à nous avec une irrésistible évidence ? C'est qu'il n'est que l'affirmation de la puissance de l'esprit qui se sait capable de concevoir la répétition indéfinie d'un même acte dès que cet acte est une fois possible. L'esprit a de cette puissance une intuition directe et l'expérience ne peut être pour lui qu'une occasion d'en prendre connaissance.

Mais dira-t-on, si l'expérience brute ne peut légitimer le raisonnement par récurrence, en est-il de même de l'expérience aidée de l'induction ? Nous voyons successivement qu'un théorème est vrai du nombre 1, du nombre 2, du nombre 3, et ainsi de suite, la loi est manifeste, disons-nous, et elle l'est au même titre que toute loi physique appuyée sur des observations dont le nombre est très grand, mais limité.

On ne saurait méconnaître qu'il y a là une analogie frappante avec les procédés habituels de l'induction. Mais une différence essentielle subsiste. L'induction, appliquée aux sciences physique, est toujours incertaine, parce qu'elle repose sur la croyance à un ordre général de l'univers, ordre qui est en dehors de nous. L'induction mathématique, c'est-à-dire la démonstration par récurrence, s'impose au contraire nécessairement, parce qu'elle n'est que l'affirmation d'une propriété de l'esprit lui-même.

Nous ne pouvons nous élever que par induction mathématique, qui seule peut nous apprendre quelque chose de nouveau. Sans l'aide de cette induction différente à certains égards de l'induction physique, mais féconde comme elle, la construction serait impuissante à créer la science.

Observons en terminant que cette induction n'est possible que si une même opération peut se répéter indéfiniment. C'est pour cela que la théorie du jeu d'échec ne pourra jamais devenir une science, puisque les différents coups d'une même partie ne se ressemblent pas.

La valeur de la Science (1905) et Science et Méthode (1908)

"La Recherche de la vérité doit être le but de notre activité ; c'est la seule fin qui soit digne d'elle. Sans doute nous devons d'abord nous efforcer de soulager les souffrances humaines, mais pourquoi ? Ne pas souffrir est un idéal négatif et qui serait plus sûrement atteint par l'anéantissement du monde. Si nous voulons de plus en plus affranchir l'homme des soucis matériels, c'est pour qu'il puisse employer sa liberté reconquise à l'étude et à la contemplation de la vérité.

"J'ai déjà eu l'occasion d'insister sur la place que doit garder l'intuition dans l'enseignement des sciences mathématiques. Sans elle, les jeunes esprits ne sauraient s'initier à l'intelligence des mathématiques ; ils n'apprendraient pas à les aimer et n'y verraient qu'une vaine logomachie ; sans elle surtout, ils ne deviendraient jamais capables de les appliquer.

"Les faits les plus intéressants sont ceux qui peuvent servir plusieurs fois : ce sont ceux qui ont chance de se renouveler. Les faits les plus simples sont en même temps les plus beaux. Le souci du beau nous conduit aux mêmes choix des faits que celui de l'utile.

"Inventer, c'est discerner, c'est choisir,

"Le vrai est ce qu'il peut : il n'a pas à se préoccuper de savoir s'il est bienfaisant, salutaire ou moral.

"La genèse d'une découverte mathématique est un problème qui devrait intéresser au plus haut point les psychologues, car c'est l'activité dans laquelle l'esprit humain paraît le moins emprunter au monde extérieur, et si nous arrivons à comprendre la formation de la pensée mathématique, nous pouvons arriver aux tréfonds de l'esprit humain.

"Le rôle de la science est de produire l'économie de pensée, de même que la machine produit l'économie de l'effort".

Poincaré et le fondement des mathématiques

Avant 1850, les mathématiques avaient connu un développement assez anarchique en dehors du monument jusque-là parfait des ELEMENTS d'EUCLIDE. Les mathématiques apparaissaient comme un corps de vérités incontestables puisant leur cohérence dans leur faculté à décrire ou à prévoir

certains phénomènes naturels comme les éclipses. Elles étaient un mélange d'intuitions, de suppositions et de règles opératoires tout-à-fait sûres et vérifiées.

Mais en 1850, les mathématiques sont ébranlées dans leur plus profonde assise : elles subissent le choc des géométries non euclidiennes. "Une partie du sol paraissait solide et voilà qu'elle se trouve marécageuse" (HILBERT). "On peut appliquer avec succès les nouvelles géométries en physique, mais elles sont mutuellement contradictoires. Qu'est-il donc vrai de l'espace physique ? Qu'est-il donc vrai des géométries ?" (GAUSS). Et ce n'était pas tout : les mathématiques voient apparaître aussi des êtres bizarres : des fonctions continues sans dérivée (K. WEIERSTRASS), des courbes remplissant une surface (PEANO), des nouveaux nombres dont on ignore s'ils sont irrationnels ou transcendants,".

Vers les années 1890, POINCARÉ en relation avec les meilleurs mathématiciens mondiaux tente de mettre de l'ordre dans la maison.

Il s'attaque à la base, c'est-à-dire à l'axiomatique. Il éclaire le rôle que cette dernière joue dans les géométries non-euclidiennes et par là explique leurs apparentes contradictions, et le rôle qu'elle joue en théorie des ensembles et par là explique la genèse des paradoxes. Provoquant le premier Congrès mondial de mathématiques qu'il préside en 1900 à Paris, POINCARÉ affirme : "à présent on peut dire qu'on a atteint la rigueur parfaite". Seulement il s'aperçoit rapidement avec d'autres que si une théorie comporte n -axiomes, si elle n'est pas consistante, c'est-à-dire que si l'on ne rajoute pas un axiome ou un postulat supplémentaire, il y a dans la théorie des contradictions ou bien des propositions dont on ne peut pas dire si elles sont vraies ou fausses, et ainsi de suite pour n grandissant. Et POINCARÉ de dire au Congrès de 1908 : "Nous avons enclos notre troupeau, mais peut-être y a-t-il déjà des loups dans la bergerie ?".

La situation divise alors les mathématiciens en trois écoles :

1. Le Formalisme (HILBERT, 1904) : la logique est le langage des signes qui nous permet de traduire les énoncés mathématiques en formules et les raisonnements en procédés formels : mais elle n'est pas la mathématique elle-même.

2. Le Logicisme (RUSSEL, WHITEHEAD, 1910) : la logique formelle est incontestablement consistante. C'est sur elle que doivent se fonder les mathématiques qui n'en sont que des prolongements. Cette école connut des opposants farouches notamment H. WEYL : "le logicisme affaiblit notre foi comme les doctrines des Pères de l'Eglise ou la scolastique médiévale". Cette école fit néanmoins faire des progrès importants à la logique formelle.

3. L'Intuitionnisme (BROUWER, POINCARÉ, WEYL, 1908) : les idées mathématiques sont indépendantes du vêtement que leur offre le langage et, en fait, elles le dépassent en richesse. "L'intuitionnisme montre combien les mathématiques classiques, appuyées sur une croyance en un absolu transcendant toutes les possibilités de réalisation des hommes, dépassent les énoncés qui peuvent prétendre à un sens réel et à une vérité fondée sur l'évidence" (BROUWER). La logique repose sur les mathématiques et non l'inverse.

Ce n'est qu'à partir de 1931 avec GODEL et le théorème des indécidables en théorie des ensembles que les points de vue se sont mutuellement éclaircis et rapprochés et ont conduit, en particulier, à la fondation du mouvement bourbakiste et du grand traité français de mathématiques qu'il publie.

POINCARÉ et la vérité scientifique

Lorsque, confronté au problème du fondement des mathématiques, POINCARÉ commença à philosopher, son esprit universel ne manqua pas de constater que la vérité scientifique était une notion évolutive et en bouleversement. Il fut en relation épistolaire suivie avec KANT sur le sujet. Avant KANT, deux idées présidaient à la conception de la vérité scientifique : il existe une vérité absolue que l'on ne connaît pas, mais qui intervient dans la nature. Ce sont les "Idées" de PLATON ou la "Véracité Divine" de DESCARTES. La seconde idée est résumée par la formule "Adequatio rei et intellectus", la réalité et l'esprit sont face à face : la vérité absolue est témoin de leur accord admirable mais inexplicable. Intervient alors KANT : la vérité cesse de se définir par un parallélisme entre les idées de l'observateur et les réalités de la nature. C'est une "connexion" entre une forme, on dirait aujourd'hui un modèle, qui n'est rien si ne lui est offerte l'occasion de s'appliquer, et une manière qui ne commence à exister qu'à partir du moment où elle a satisfait à la condition de cohérence, c'est-à-dire de répétabilité, d'universalité, de se prêter à l'expérience. L'absolu de vérité reste l'apanage de contenus intrinsèques à l'esprit : l'espace euclidien qui engendre la géométrie euclidienne, la logique qui engendre la cohérence d'une preuve.

KANT explique l'adequatio, reconnaît l'apport de l'intellectus à la res, mais ne parvient pas à la réciprocité. POINCARÉ milite pour l'intuitionnisme : les choses créent l'instrument, l'observation crée la théorie. En cela, il s'oppose au logicisme de RUSSEL : la théorie précède la vérification, l'instrument doit s'imposer aux choses.

Et pourtant : comment découvre-t-on ?

"Depuis quinze jours, je m'efforçais de démontrer qu'il ne pouvait exister aucune fonction analogue à ce que j'ai appelé depuis les fonctions fuchsienues ; j'étais alors fort ignorant ; tous les jours, je m'asseyais à ma table de travail, j'y passais une heure ou deux, j'essayais un grand nombre de combinaisons et je n'arrivais à aucun résultat. Un soir, je pris du café noir, contrairement à mon habitude, je ne pus m'endormir : les idées surgissaient en foule ; je les sentais comme se heurter, jusqu'à ce que deux d'entre elles s'accrochassent, pour ainsi dire, pour former une combinaison stable. Le matin, j'avais établi l'existence d'une classe de fonctions fuchsienues, celles qui dérivent de la série hypergéométrique ; je n'eus plus qu'à rédiger les résultats, ce qui ne me prit que quelques heures.

Je voulus ensuite représenter ces fonctions par le quotient de deux séries ; cette idée fut parfaitement consciente et réfléchie ; l'analogie avec les fonctions elliptiques me guidait. Je me demandais quelles devaient être les propriétés de ces séries, si elles existaient, et j'arrivai sans difficulté à former les séries que j'ai appelées thêtafuchsienues.

A ce moment, je quittai Caen, où j'habitais alors, pour prendre part à une course géologique entreprise par l'Ecole des Mines. Les péripéties du voyage me firent oublier mes travaux mathématiques ; arrivés à Coutances, nous montâmes dans un omnibus pour je ne sais quelle promenade ; au moment où je mettais le pied sur le marche-pied, l'idée me vint, sans que rien dans mes pensées antérieures parût m'y avoir préparé, que les transformations dont j'avais fait usage pour définir les fonctions fuchsienues étaient identiques à celles de la géométrie non-euclidienne. Je ne fis pas la vérification ; je n'en aurais pas eu le temps, puisque, à peine assis dans l'omnibus, je repris la conversation commencée, mais j'eus tout de suite une entière certitude. De retour à Caen, je vérifiai le résultat à tête reposée pour l'acquit de ma conscience.

Je me mis alors à étudier des questions d'arithmétique sans grand résultat apparent et sans soupçonner que cela pût avoir le moindre rapport avec mes recherches antérieures. Dégoûté de mon insuccès, j'allai passer quelques jours au bord de la mer, et je pensai à tout autre chose. Un jour, en me promenant sur la falaise, l'idée me vint, toujours avec les mêmes caractères de brièveté, de soudaineté et de certitude immédiate, que les transformations arithmétiques des formes quadratiques ternaires indéfinies étaient identiques à celles de la géométrie non-euclidienne.

Etant revenu à Caen, je réfléchis sur ce résultat, et j'en tirai les conséquences ; l'exemple des formes quadratiques me montrait qu'il y avait des groupes fuchsien autres que ceux qui correspondent à la série hypergéométrique ; je vis que je pouvais leur appliquer la théorie des séries thêtafuchiennes et que, par conséquent, il existait des fonctions fuchiennes autres que celles qui dérivent de la série hypergéométrique, les seules que je connusse jusqu'alors. Je me proposai naturellement de former toutes ces fonctions ; j'en fis un siège systématique et j'enlevai l'un après l'autre tous les ouvrages avancés ; il y en avait un cependant qui tenait encore et dont la chute devait entraîner celle du corps de place. Mais tous mes efforts ne servirent d'abord qu'à me mieux faire connaître la difficulté, ce qui était déjà quelque chose. Tout ce travail fut parfaitement conscient.

Là-dessus, je partis pour le Mont-Valérien, où je devais faire mon service militaire ; j'eus donc des préoccupations très différentes. Un jour, en traversant le boulevard, la solution de la difficulté qui m'avait arrêté m'apparut tout à coup. Je ne cherchai pas à l'approfondir immédiatement, et ce fut seulement après mon service que je repris la question. J'avais tous les éléments, je n'avais qu'à les rassembler et à les ordonner. Je rédigeai donc mon mémoire définitif d'un trait et sans aucune peine.

(Science et Méthode, 1908)

Si l'on demandait aujourd'hui aux chercheurs du CNRS ce qu'est la vérité scientifique, il est très probable que la réponse moyenne serait une certitude dans la méthode et dans les moyens scientifiques et une espérance dans des finalités acquises au bonheur des hommes. Mais la recherche est longue et l'instant est bref, comme le disait Paul VALÉRY dans le Cimetière Marin :

"Zénon, cruel Zénon, Zénon d'Elée !
M'as-tu percé de cette flèche ailée
Qui vibre, vole et qui ne vole pas ?
Quelle ombre pour l'âme, Achille immobile à grands pas".

Beaucoup avant POINCARÉ avaient dit la joie d'aimer. POINCARÉ a dit la joie de chercher, la joie de trouver. Je crois avoir dit pourquoi POINCARÉ est, et demeure, un exemple pour les chercheurs scientifiques, tout-à-fait digne d'une connaissance, d'un souvenir et d'une affection particulière des Lorrains?

Mort à la veille du premier conflit mondial, Henri POINCARÉ s'était battu par l'esprit et pour l'esprit.

J.L. GREFFE

HENRI POINCARÉ

Nancy (29 avril 1854) - Paris (17 juillet 1912)

Eléments de Biographie

- . Elève au Lycée de Nancy : Octobre 1862 - Août 1873
- . Admis premier à l'Ecole Polytechnique : 14 Octobre 1873
- . Ingénieur ordinaire des Mines : 26 Mars 1879
- . Docteur ès Sciences Mathématiques : 1er Août 1879
- . Chargé du Cours d'Analyse à l'Université de Caen : 1er Décembre 1879
- . Fonctions fuchsiennes : 1881
- . Masse d'un fluide en rotation : 1885
- . Professeur de Physique mathématique et de calcul des probabilités à la Faculté des Sciences de l'Université de Paris : 22 Août 1886
- . Membre de l'Académie des Sciences (Géométrie) : 31 Janvier 1887
- . Prix du Roi de Suède (Problème des trois corps) : 21 Janvier 1889
- . Analysis situs : 1895
- . Professeur d'Astronomie mathématique et de mécanique céleste à la Faculté des Sciences de l'Université de Paris : 5 Novembre 1896
- . Professeur d'Astronomie générale à l'Ecole Polytechnique : 1er Octobre 1904
- . Membre de l'Académie Française : 5 Mars 1908
- . Décret de nomination du Lycée de Nancy : Lycée Henri Poincaré 8 juillet 1913
- . Institut Henri Poincaré à Paris : 1954

Eléments de Bibliographie de Henri Poincaré

- . Oeuvres complètes de Henri POINCARÉ, Gauthier-Villars, 1956
- . La Science et l'Hypothèse, Coll. Champs. FLAMMARION, 1968
- . La Valeur de la Science, FLAMMARION, 1918
- . Science et Méthode, FLAMMARION, 1918
- . Dernières Pensées, FLAMMARION, 1963

Eléments de Bibliographie sur H. Poincaré et sur son oeuvre

- . P. APPELL, Henri Poincaré, PLON 1925
- . M. BERGER, Géométrie, 5 tomes CEDIC, F. NATHAN CNRS, 1977
- . N. BOURBAKI, Eléments d'Histoire des Mathématiques, HERMANN, 1970
- . R. CARNAP, Les Fondements Philosophiques de la Physique, A. COLIN (U) 1973
- . J. CAVAILLES, Philosophie Mathématique, HERMANN, 1962
- . J. DIEUDONNE, Agrégé d'Histoire des Mathématiques, HERMANN, 1978
- . E. LEBON, Henri Poincaré, Gauthier-Villars, 1909
- . J.J.A. MOOIJ, La Philosophie des Mathématiques de Henri Poincaré, GAUTHIER-VILLARS 1966
- . A.F. SCHMID, Une philosophie de Savant : H. Poincaré et la logique mathématique, F. MASPERO, 1978
- . M.A. TONNELAT, Histoire du Principe de Relativité, FLAMMARION, 1971
- . J. ULLMO, La Pensée Scientifique Moderne, FLAMMARION, 1958
- . L. VON BERTALANFFY, Théorie Générale des Systèmes, DUNOD, 1973
- . Bibliothèque de la Pléiade, Astronomie - Histoire de la Philosophie - Histoire des Sciences.

Résumé:

Une méthode d'analyse par RMN ^{13}C assistée par ordinateur, combinant à la fois l'analyse statistique et la détermination de composés individuels de mélanges complexes, primitivement testée sur un mélange synthétique, a été appliquée à des essences issues du procédé de vapocraquage du naphta.

Abstract:

A method of computer aided analysis of ^{13}C NMR spectra, combining statistical analysis and determination of individual compounds in complex mixtures, already tested for a synthetic mixture, has been applied to the gasolines obtained from the products of steam cracking of naphtha.

INTRODUCTION

La transformation des hydrocarbures, qu'ils proviennent de la conversion du pétrole, charbon, schistes ou grés bitumineux, demande la mise en oeuvre de méthodes d'analyse rapides et significatives. A cet effet, la Résonance Magnétique Nucléaire (RMN) du proton et du carbone-13 est une méthode de choix, puisque quantitative et non destructive, pour analyser les liquides bruts ou les différentes fractions issus de ces procédés industriels en fonction des conditions opératoires (température, pression, catalyseur). Jusqu'à présent cette technique était surtout utilisée pour caractériser les fractions lourdes à l'aide de paramètres structuraux faisant intervenir les proportions des différents types d'atomes rencontrés, sans rechercher une formule moléculaire précise: analyse statistique (Gillet et coll., 1981, Part. 2). Cependant, à l'aide de la puissance de l'outil informatique, il s'avère que la RMN peut apporter une aide appréciable à la Chromatographie Gazeuse couplée à la Spectrométrie de Masse (CG-SM) pour déterminer rapidement les composés individuels de mélanges complexes (Matlengiewicz et coll., 1991; Laude et Wilkins, 1987). Une telle méthode, basée sur l'établissement d'une bibliothèque de produits purs, peut alors être appliquée aux essences légères issues du procédé de vapocraquage du naphta.

MATERIELS ET METHODES

Echantillons

Les essences proviennent du procédé classique de vapocraquage du naphta à 800°C en présence de vapeur d'eau et en l'absence de catalyseur (Plate Forme Pétrochimique de Carling). Après élimination des gaz dans un séparateur froid, le liquide résultant est fractionné en plusieurs coupes. Schématiquement, on obtient une essence légère (C_5-C_8), lourde (C_7-C_{11}) et des huiles ($>C_{11}$). Les produits légers, après plusieurs opérations ultérieures (hydrostabilisation, hydrodésulfuration, hydrodéalkylation) sont commercialisés comme carburant ou produits chimiques de base (benzène). L'essence lourde, qui contient des proportions importantes de

composés polymérisables comme le styrène, est utilisée pour la fabrication des résines et des polymères alors que les huiles sont réutilisées en tant que combustibles complémentaires pour le chauffage des fours du vapocraqueur.

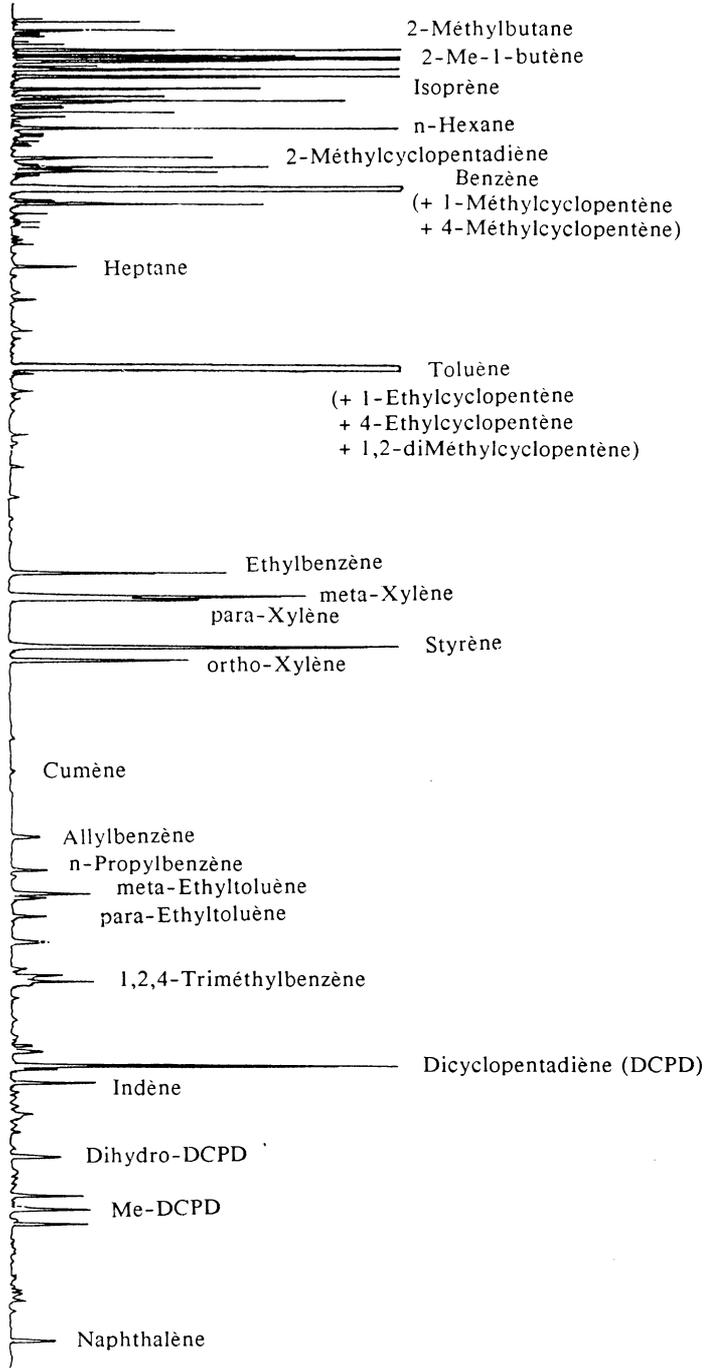
Spectroscopie de Résonance Magnétique Nucléaire (RMN)

Les spectres RMN ^{13}C sont enregistrés à 100,62 MHz sur un spectromètre Bruker AM 400 équipé d'un ordinateur Aspect 3000. La méthode qui permet d'obtenir des spectres quantitatifs a déjà été définie dans de précédentes publications (Gillet et coll., 1980; Gillet et coll., 1981, Part. 1). Elle consiste à ajouter au solvant deutéré (CDCl_3) un agent de relaxation (acétylacétonate de Fer) qui permet d'accélérer la cadence des enregistrements cumulés impliqués dans la spectrographie avec transformation de Fourier; le temps d'attente entre deux impulsions successives est alors de 35s. Nous avons ensuite montré que les déplacements chimiques des carbones des produits purs étaient pratiquement constants à partir d'une concentration de 10^{-1} mol/l et que l'ajout de $\sim 10^{-2}$ mol/l de $\text{Fe}(\text{acac})_3$ ne modifiait pas ces déplacements chimiques. A cette concentration, l'agent de relaxation a une contribution de 0.5 Hz sur la largeur de raie. La largeur de raie naturelle des pics a été diminuée jusqu'à 0.2 Hz en thermostatant le flux d'air qui permet de refroidir l'échantillon lors du découplage protonique (Allerhand et Maple, 1987). La largeur de raie, W , ainsi obtenue ($\sim 0,7$ Hz) est alors suffisante pour éviter les problèmes de troncature des signaux qui apparaissent lorsque la résolution digitale, r , est telle que $W/r < 5$ (Daubenfeld, Thèse Nancy, 1984).

Chromatographie Gazeuse et Spectrométrie de Masse

Les analyses sont effectuées au "Centre de Recherches ATOCHEM" à Forbach, France. Les essences, notamment l'essence E1 (Figure 1), sont analysées par CG-SM et également par CG seule avec détecteur FID pour obtenir des résultats quantitatifs, en utilisant une colonne capillaire de type HPI (polymethylsiloxane): longueur - 50m, diamètre - 220 microns, épaisseur du film - 0,5 micron, gaz porteur - hélium, pression - 1,4 bar, splitting - 1/100. La température d'injection est de 150°C et la

Figure 1: Chromatogramme de l'essence E1. Seuls les pics principaux sont indiqués.



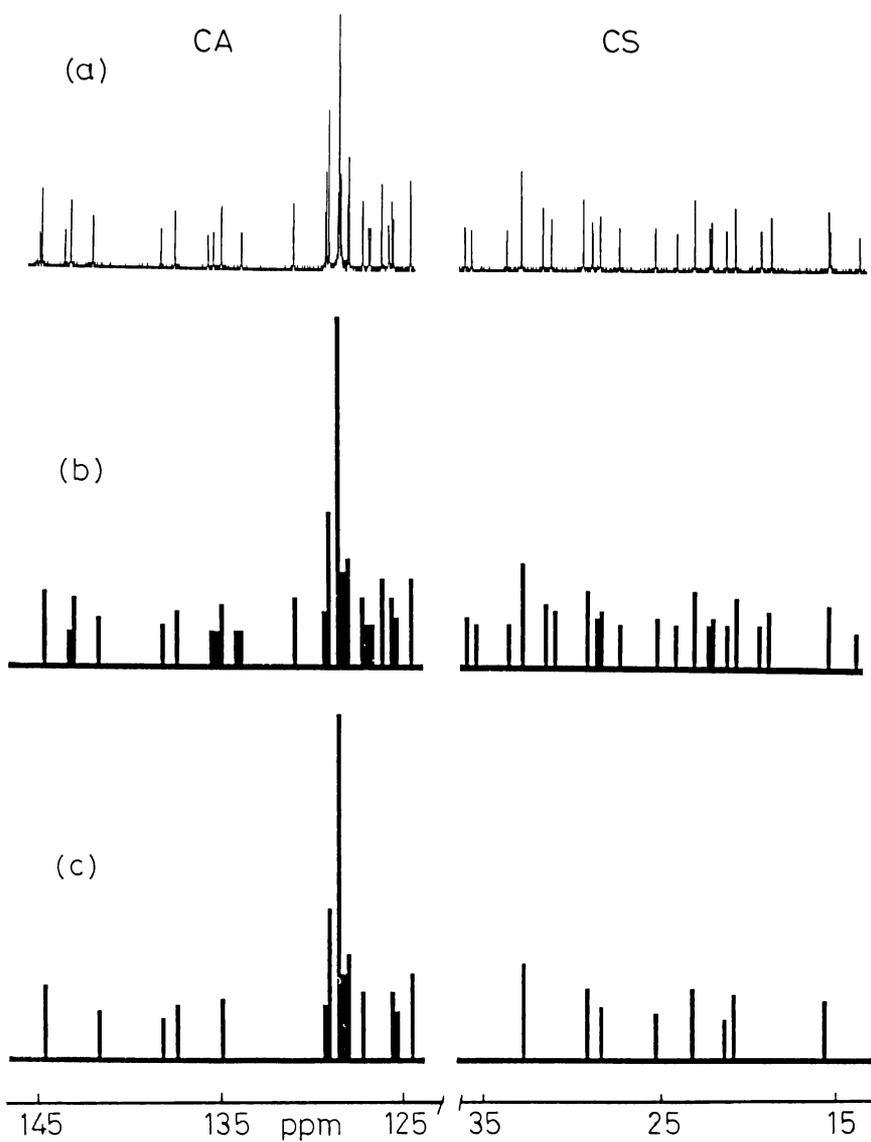


Figure 2: (a) Spectre 100,62 MHz RMN ^{13}C d'un mélange synthétique constitué de 10 produits purs monoaromatiques dérivés du benzène, de la tétraline et de l'indane (b) spectre bâton, (c) spectre bâton après soustraction sans déconvolution des raies de trois produits.

température du détecteur 250°C; la montée en température est programmée. Les mesures CG-SM sont effectuées dans les mêmes conditions chromatographiques au moyen d'un spectromètre de masse Finnigan MAT 95 Q (impact électronique, 70eV; température de la source, 235°C).

Programme Informatique

Le logiciel développé pour l'analyse des coupes pétrolières repose sur l'établissement d'une bibliothèque de produits purs et a été primitivement testé sur un mélange synthétique (Figure 2). Les spectres expérimentaux sont tout d'abord transférés sur un ordinateur compatible IBM PC. Le programme, écrit en langage C, permet ensuite de résoudre les problèmes de quantitativité qui résultent du traitement digital des signaux (correction de ligne de base et réduction du bruit de fond). Puis, à l'aide de l'algorithme de Marquardt (1986), les raies du spectre sont déconvoluées (Matlengiewicz et coll., 1991, Part. 2). Le spectre réel est alors transformé en spectre bâton où chaque bâton représente l'aire de chaque pic. L'analyse manuelle est réalisée par l'utilisateur, sur la base des données de la bibliothèque de spectres des substances pures. C'est lui-même qui décide de l'existence (ou non) des produits dans le mélange compte tenu de l'incertitude sur les déplacements chimiques et de l'aire (ou de la hauteur) relative des pics des différents carbones. Une fois le composé identifié, celui-ci peut alors être soustrait du spectre total et l'analyse peut alors continuer.

Enfin, à partir du spectre réel, un programme performant d'intégration a été mis au point afin de pouvoir calculer la composition du mélange par rapport à une référence (dioxane) ajoutée à la solution

RESULTATS

Bibliothèque de produits purs

L'établissement d'une bibliothèque est réalisée naturellement à partir de produits purs commercialisés. L'attribution des carbones de ces composés se fait à partir d'expériences de RMN bidimensionnelle: COSY, corrélation ^{13}C - ^1H hétéronucléaire,

INADEQUATE (Derome, 1987), et de séquences d'impulsions complexes: GASPE, DEPT. C'est par exemple le cas du dicyclopentadiène (Figure 3) où la séquence INADEQUATE, par l'observation des couplages entre deux carbones-13 consécutifs, permet de déterminer le squelette carboné de la molécule (Laurens et coll., 1991).

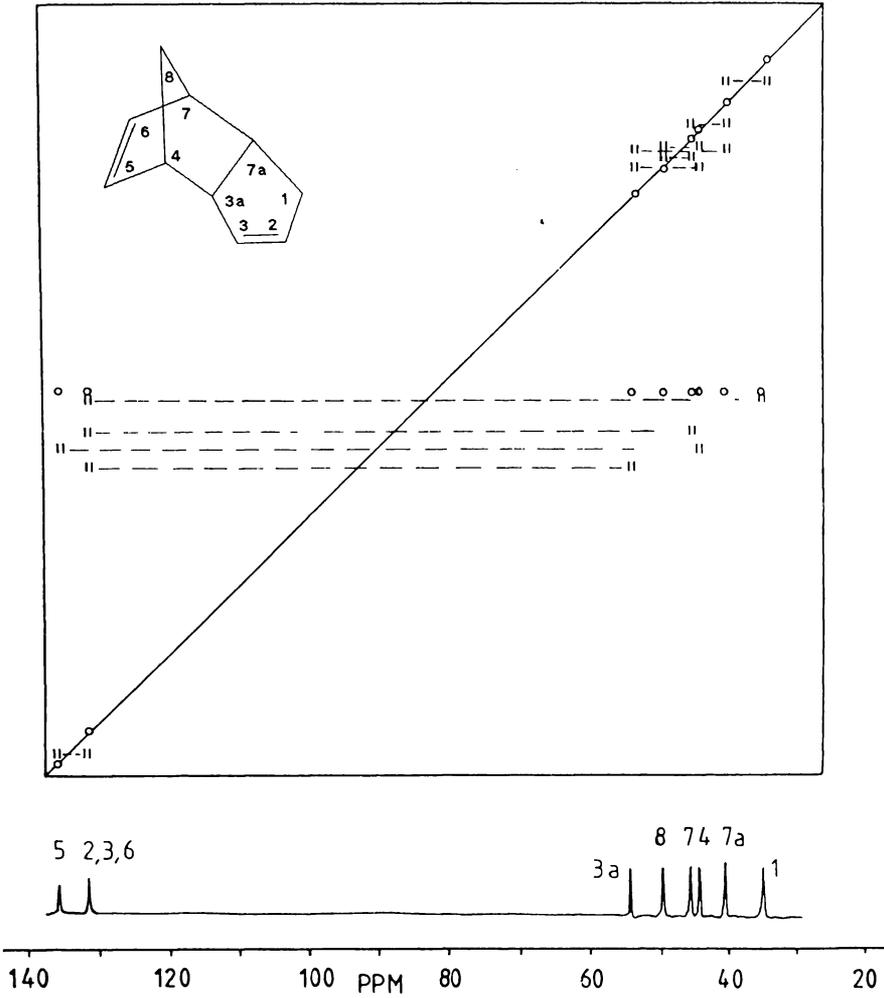


Figure 3: Spectre INADEQUATE de l'endo-dicyclopentadiène

Les mêmes expériences permettent également d'attribuer les raies de chaque composé d'une même famille directement dans le mélange, sans séparation chromatographique préalable. C'est le cas des dérivés méthylés du cyclopentadiène dimère formés à partir des dérivés monomères par une réaction de Diels-Alder.

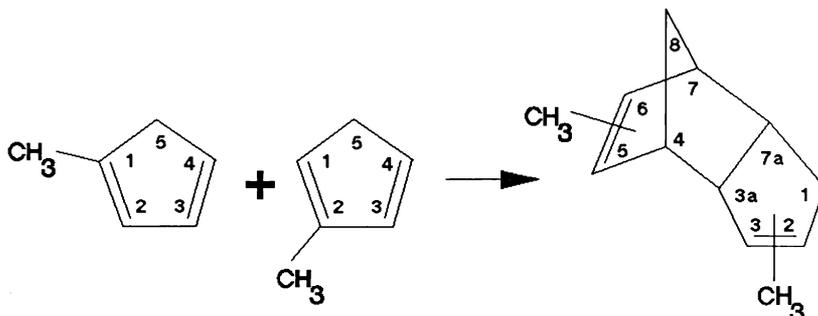


Schéma 1

Dans cet exemple, la réaction entre le 1-Méthylcyclopentadiène et le 2-Méthylcyclopentadiène conduit à la formation de huit isomères qui peuvent être identifiés sans ambiguïté. Une telle stratégie permet donc de construire une bibliothèque complète de produits oléfiniques et aromatiques (dérivés du benzène, de la tétraline et de l'indane) qui sont présents dans les liquides issus des procédés de transformation du pétrole et du charbon.

Analyse statistique

Il est possible de caractériser les coupes moyennes et lourdes issues des procédés de transformation du pétrole et du charbon, non pas en déterminant les signaux de chaque composé individuel, mais à l'aide de paramètres structuraux faisant intervenir les proportions des différents types d'atomes rencontrés selon la nature de leur environnement local, sans rechercher de formule moléculaire précise: par exemple pourcentage de carbones aromatiques (facteur d'aromaticité $FA=CA/C$), ou internes, c'est à dire situés à la jonction de deux ou trois cycles aromatiques (facteur de

compacité $FC=CAI/C$). Une telle exploitation a été rendue possible par une compilation critique des données spectrales et l'établissement de cartes de déplacements chimiques de carbone-13 à partir de la bibliothèque des produits purs.

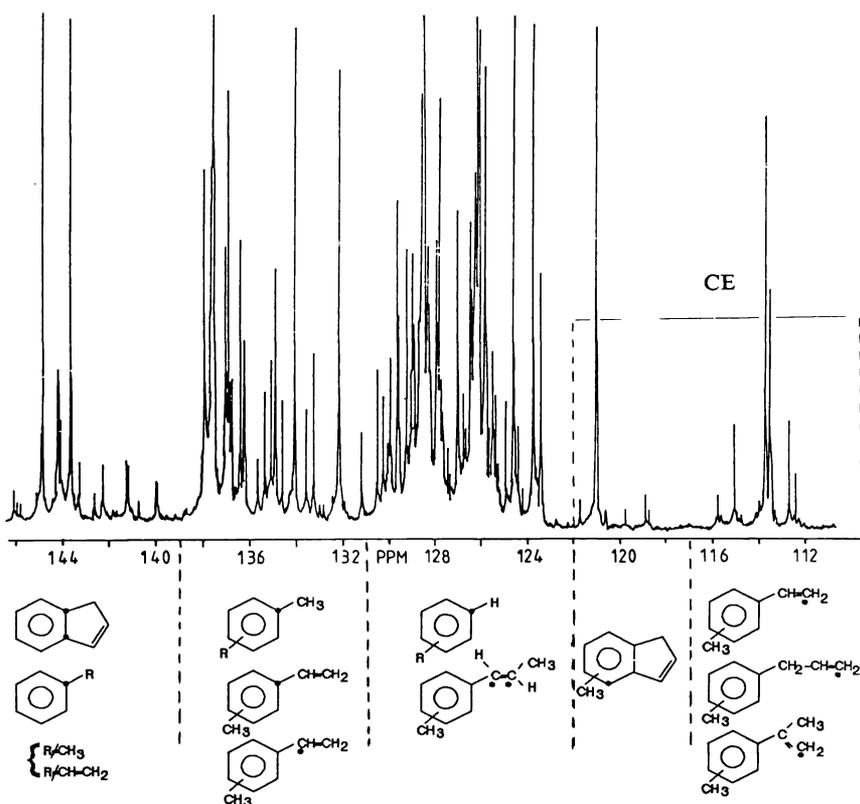


Figure 4: Partie aromatique du spectre RMN ^{13}C à 100,62 MHz de la coupe C9

Une telle méthode peut donc être appliquée à l'essence lourde C_9 qui contient deux familles de produits. D'une part des composés aromatiques (dérivés du benzène et du toluène) d'autre part des composés polymérisables qui contiennent une double liaison éthylénique: ce sont principalement des dérivés du styrène, de l'allylbenzène, de l'isoprénylbenzène et de l'indène. La Figure 4 montre alors les zones de déplacements chimiques où sont situés les différents types de carbones selon leur environnement local. En particulier, on peut remarquer que certains carbones

éthyléniques (CE) appartenant aux composés polymérisables sont situés dans une région comprise entre 110 et 122 ppm (cas par exemple des carbones éthyléniques de type =CH₂ du styrène). Il est alors possible de définir un nouveau paramètre structural, le facteur de polymérisation comme FP=CE/C et de le calculer à l'aide du logiciel par intégration de la région ainsi définie par rapport au carbone total (FP=6,23%). Ce paramètre qui fournit une indication rapide de la teneur en composés polymérisables peut être transformé en pourcentage en poids et comparé au résultat obtenu par chromatographie gazeuse (54,95% contre 53,21%, respectivement).

Une telle méthode a également été appliquée à des fractions pétrolières de plus en plus lourdes (Delpuech et coll., 1985) et issues d'un même brut (gaz oil, distillat sous vide, résidu sous vide, asphaltène et asphalte) ainsi qu'à des huiles issues d'un pilote d'hydroliquéfaction du charbon (Delpuech et coll., 1986). Dans le cas de coupes très lourdes, les pourcentages atomiques des différents types de carbones précédemment définis peuvent être convertis en nombre de carbones (et de protons en utilisant le spectre ¹H) par molécule moyenne, connaissant la masse moléculaire moyenne par Osmométrie, et enfin par Unité Structurale de Base représentative de la fraction (Schéma 2).

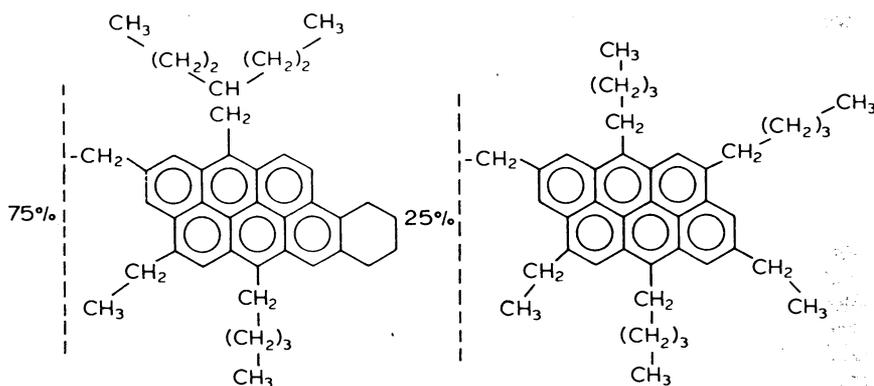


Schéma 2

Analyse individuelle

La détermination des composés individuels par RMN ^{13}C assistée par ordinateur s'applique particulièrement bien aux essences légères (coupe $\text{C}_5\text{-C}_8$, notée E1) afin de déterminer leur teneur en composés polymérisables, notamment les dioléfines. L'analyse CG-SM préalable montre que ces essences contiennent trois familles de composés : saturés (10%), aromatiques (65%) et oléfines (mono- et dioléfines, 25%). Ces dioléfines doivent être hydrogénées dans une opération ultérieure (hydrostabilisation) car elles conduiraient à la formation nuisible de gommages par polymérisation lors de leur utilisation comme carburant.

Les carbones éthyléniques représentant ces composés polymérisables occupent, comme pour l'essence lourde C_9 , des zones spécifiques de déplacement chimiques. Deux d'entre elles sont particulièrement importantes (Figure 5). D'une part la région comprise entre 54-62 ppm représentant le cyclopentadiène dimère et ses dérivés méthylés, les composés monomères étant obtenus à 41,62; 44,90 et 41,45 ppm pour le cyclopentadiène, 1- et 2-Méthylcyclopentadiène, respectivement. D'autre part la région comprise entre 100-120 ppm contenant les carbones de type $=\text{CH}_2$ des dioléfines comme l'isoprène ou ceux des dérivés styréniques. Cependant, cette région contient également les carbones de composés indésirables comme ceux, de même type, des monooléfines. Après correction de la ligne de base et réduction du bruit de fond, le logiciel procède alors à la déconvolution des raies enchevêtrées des zones spécifiques (Figure 6). Les résultats obtenus pour les raies individuelles permettent alors de calculer la composition des différents composés par rapport au dioxane puis de comparer ces valeurs avec ceux de la chromatographie. Enfin, dans un dernier temps, les raies des monooléfines identifiées peuvent alors être soustraites du spectre et le contenu en composés polymérisables calculé. Une telle méthode s'avère plus rapide que celle effectuée par CG-SM et beaucoup plus précise que celle jusqu'alors utilisée dans le procédé industriel (détermination de la Valeur en Anhydride Maleique de l'essence qui est seulement applicable aux dioléfines conjuguées).

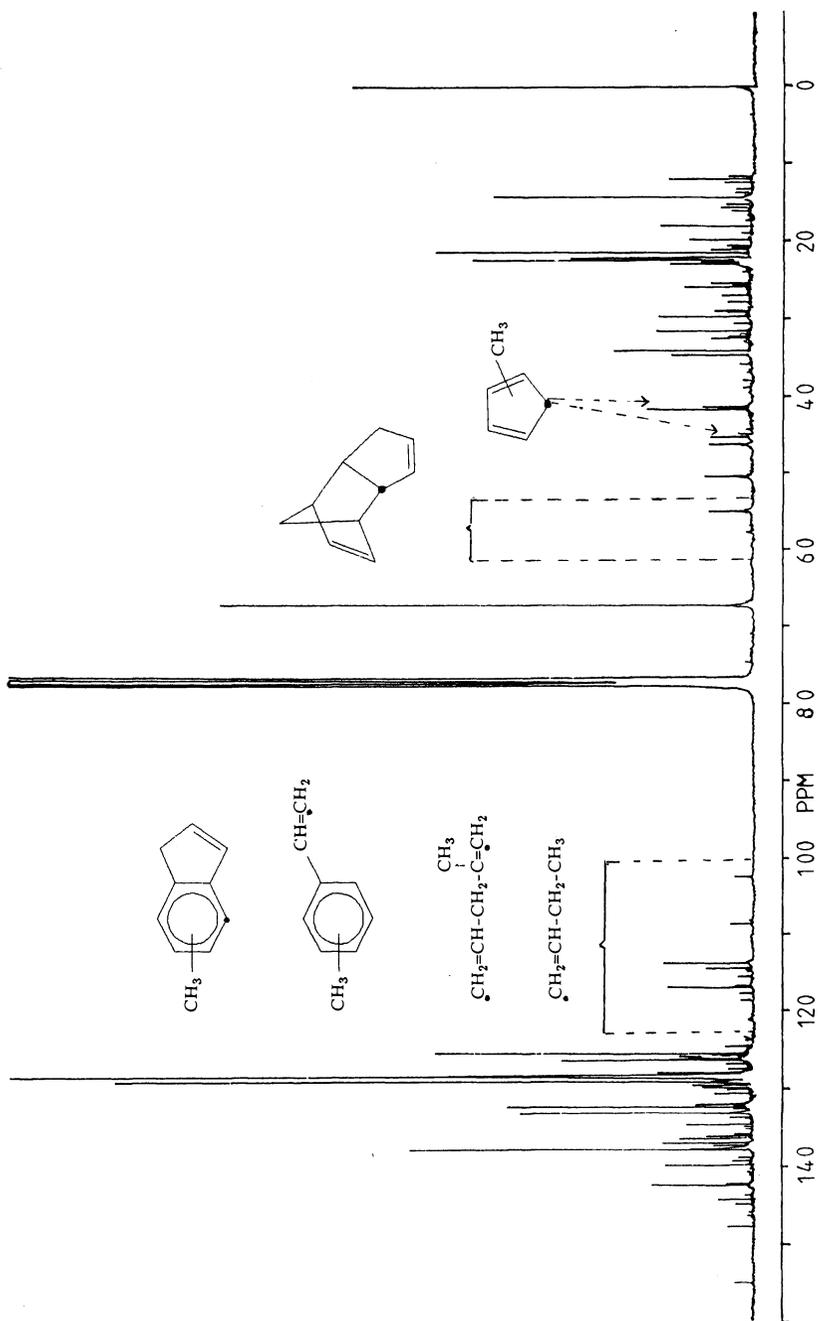


Figure 5: Spectre RMN ^{13}C à 100,62 MHz de l'essence E1

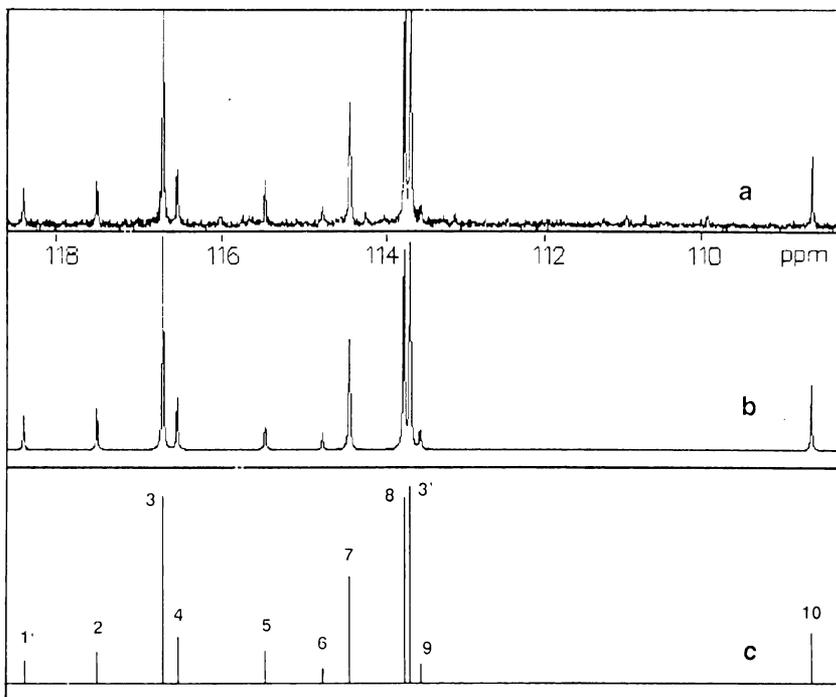


Figure 6: (a) Spectre RMN ^{13}C à 100,62 MHz de la région représentant les carbones éthyleniques de type $=\text{CH}_2$ (b) spectre simulé, (c) spectre bâton

CONCLUSION

Ces travaux peuvent donc être orientés suivant deux directions. La première, qui est présentée dans ce travail, concerne le dosage automatique de composés préalablement connus dans un mélange quelconque. L'analyse statistique doit donc être couplée à l'analyse des composés individuels pour que la méthode soit applicable industriellement. La seconde concerne l'analyse automatique, c'est à dire la détermination de tous les composés d'un mélange inconnu à partir de la bibliothèque. Cette partie n'est pas encore terminée et nécessite la déconvolution totale du spectre par tranches successives ainsi qu'un algorithme sophistiqué de déconvolution, notamment lorsque des raies intenses et des raies de faible intensité sont enchevêtrées. Par ailleurs, la reconnaissance automatique des différents pics nécessite également la mise au point d'algorithmes faisant intervenir les systèmes experts.

BIBLIOGRAPHIE

- ALLERHAND, A. et MAPLE, S.R. - 1987 - Ultra-high resolution NMR. *Anal. Chem.*, **59**, 441A et références suivantes.
- DAUBENFELD, J.M. - 1984 - Thèse de Docteur-Ingénieur, Nancy.
- DELPUECH, J.J., NICOLE, D., DAUBENFELD, J.M. et BOUBEL, J.C.- 1985 - A method to evaluate benzonaphthenic carbons and donatable hydrogens in fossil fuels. *Fuel*, **64**, 325.
- DELPUECH, J.J., NICOLE, D., Le ROUX, M., CHICHE, P. et PREGERMAIN, S. - 1986 - Coal liquefaction solvents: an NMR analysis of a recycle oil over successive passes. *Fuel*, **65**, 1600.
- DEROME, A.M. - 1987 - Modern NMR Techniques for Chemistry Research. Pergamon Press.
- GILLET, S., DELPUECH, J.J., VALENTIN, P., et ESCALIER, J.C., - 1980 - Optimum conditions for crude oil and petroleum product analysis by carbon-13 Nuclear Magnetic Resonance Spectroscopy. *Anal. Chem.*, **52**, 813.
- GILLET, S., RUBINI, P., DELPUECH, J.J., ESCALIER, J.C., et VALENTIN, P., - 1981 - Quantitative carbon-13 and proton Nuclear Magnetic Resonance Spectroscopy of crude oil and petroleum products. 1. Some rules for obtaining a set of reliable structural parameters. *Fuel*, **60**, 220.
- GILLET, S., RUBINI, P., DELPUECH, J.J., ESCALIER, J.C., et VALENTIN, P., - 1981 - Quantitative carbon-13 and proton Nuclear Magnetic Resonance Spectroscopy of crude oil and petroleum products. 2. Average structure parameters of representative samples. *Fuel*, **60**, 226.
- LAUDE, D.A., Jr. et Wilkins, C.L. - 1987 - Identification of organic mixture components without separation: quantitative and edited carbon-13 nuclear magnetic resonance spectrometry data from the analysis of petroleum distillates. *Anal. Chem.* **59**, 576.

- LAURENS, T., NICOLE, D., RUBINI, P., LAUER, J.C., MATLENGIEWICZ, M. et HENZEL, N. - 1991 - Characterization of methyl derivatives of cyclopentadiene monomer and dimer by ^{13}C NMR spectroscopy. *Magn. Reson. Chem.*, soumis à publication.
- MARQUARDT, D.W. - 1963 - An algorithm for least-squares estimation of nonlinear parameters. *J. Soc. Industr. Appl. Math.*, 11(2), 431.
- MATLENGIEWICZ, M., HENZEL, N., LAURENS, T., NICOLE, D., RUBINI P. et RODEHÜSER, L. - 1991 - Computer aided analysis of ^{13}C n.m.r. spectra of multicomponent mixtures. 1. Analysis of individual components in a synthetic mixture of monoaromatic hydrocarbons. *Analisis*, 19, 13.
- MATLENGIEWICZ, M., HENZEL, N., LAUER, J.C., LAURENS, T., NICOLE, D. et RUBINI P. - 1991 - Computer aided analysis of ^{13}C n.m.r. spectra of multicomponent mixtures. 2. Determination of polymerizable hydrocarbons in a light gasoline. *Analyst*, soumis à publication.

La figure de la Terre *

par

J. FLICK **

Depuis 3 siècles l'évolution scientifique, théorique et instrumentale en matière de sciences de la Terre s'est fait remarquer par un processus de performance de plus en plus accéléré. Ceci est vrai pour une grande partie des sciences en général.

Pour déterminer la figure de la Terre l'homme a eu recours à la géodésie géométrique. Pour les petites surfaces allant de 1 à 1000 km² la géométrie plane fournit toutes les méthodes suffisamment exactes. Pour faire un assemblage plus vaste en étendue, comme la surface de la France ou de tout un continent jusqu'aux bords des océans, la géodésie doit utiliser la géométrie de l'espace. Après avoir reconnu au XVIII^e siècle que la forme de la Terre n'était pas sphérique mais aplatie aux pôles (mesures des rayons de courbures le long des méridiens au Pérou et en Laponie ou la détermination théorique géophysique par Isaac Newton) les méthodes de mensuration et de calcul géodésiques devenaient de plus en plus compliquées mais aussi de beaucoup plus exactes. L'application la plus avantageuse a été le perfectionnement de la cartographie topographique à l'avantage du génie militaire et océanographique pour la navigation maritime. Le développement de la photogrammétrie a apporté une multitude d'améliorations dans les détails, surtout des surfaces difficilement accessibles à l'homme, comme les hautes montagnes et leurs glaciers, les forêts vierges, les déserts, les grands lacs, les régions marécageuses. Tout ceci fait partie de la géodésie Terrestre.

*. Conférence donnée lors de la séance du 11 avril 1991.

** . Ingénieur en Géodésie. Responsable du Laboratoire souterrain de Géodynamique et de sismologie de Walfenlange (Grand Duché de Luxembourg).

La détermination de la position et de l'orbite de la planète Terre et des coordonnées de référence (latitudes) à sa surface se pratique depuis la disponibilité des instruments de mesure suffisamment exacts (théodolite universel) et des fondements mathématiques établis par Pierre-Simon LAPLACE (1749 - 1827) et par Carl-Friedrich GAUSS (1777 - 1855). Ces travaux font partie de la Géodésie-astronomique.

Le 4 octobre 1957 Sputnik -satellite russe - faisait ses premières rondes autour de la Terre. Une partie de sa vie intérieure se déclara par émission de coups de sifflet. C'était le début fantastique de l'ouverture de l'ère spatiale qui allait bouleverser une grande partie des sciences établies et de la vie quotidienne, grâce aux applications en météorologie, en télécommunication, en étude de la Terre entière, cartographie de précision par satellite-photogrammétrique (voir guerre du Golfe) puis en navigation, en écologie à l'échelle de continents, en matière de catastrophes naturelles et technologiques majeures, etc.

Dès que les géodésiens se sont aperçus des multiples sources d'information par satellites, chacun en orbite stable autour de la Terre, ils ont compris qu'ils pouvaient les considérer entre autres comme des mires à miroirs réflecteurs circulant à plusieurs centaines de km d'altitude et ajoutant une dimension entière à la triangulation classique Terrestre. Le réseau géodésique mondial devenait réalité grâce au développement rapide de la géodésie par satellites. Sur terre les bases géodésiques ont été soumises en même temps à un contrôle extrêmement rigoureux par l'invention des instruments mesurant les distances par faisceaux lumineux à quelques mm sur plusieurs km (télémétrie électronique). A partir de 1964 furent installées les stations d'observation par laser (Light amplification by simultaneous emission of radiation). Cette méthode d'observation par tir sur satellite réflecteur avec vitesse de propagation égale à celle de la lumière permettait à la géodésie spatiale de se passer désormais des méthodes habituelles au sol et de déterminer la position de points sur Terre de façon totalement indépendante. Depuis quelques années l'application du système GPS (Global Positioning System) gagne en importance.

L'étude de la Terre comme planète à une lune tournant autour du soleil avec le centre de gravité - TERRE - LUNE - sur l'orbite elliptique en 365 jours, la Terre accomplissant un tour autour de son axe de rotation en 24 heures, présente non seulement l'étude d'une surface extérieure garnie de montagnes et d'océans, mais aussi celle d'une constitution intérieure complexe dont le manteau est solide (élastico-visqueux) et le noyau liquide. Cette planète au rayon de son grand axe équatorial défini à 6.378 km présente un axe de rotation qui est incliné d'un angle de 23,5° au plan équatorial du soleil. Elle est soumise aux influences des phénomènes géodynamiques des marées Terrestres, de la précession-nutation et des mouvements du pôle, des séismes, de la dérive des continents, des mouvements verticaux, "up-lift", etc. La lune aussi bien que le soleil exercent sur chaque particule de la Terre une force d'attraction dite accélération d'autant plus grande que la particule est plus proche

de la lune. Au cours du dernier quart de siècle nous avons mesuré en un grand nombre de points sur Terre et au fond des océans que le champ gravitationnel de la Terre n'est pas du tout homogène et uniforme. Ce qui explique les irrégularités observées sur les orbites des différents satellites. Notre Terre n'est donc pas seulement aplatie et on sait maintenant qu'elle présente de nombreuses obscurités, tant dans sa forme de géoïde que dans sa structure.

L'étude de l'intérieur de la planète est surtout poursuivie par la séismologie, département de la géophysique. Nous savons de cette multitude énorme de mesures faites sur les tremblements de Terre que l'intérieur de la Terre se présente sous forme de différentes coques sphériques toutes concentriques au centre du globe Terrestre, inégales en épaisseur, en densité, en unités de pression et de température.

Effectuer des mesures précises dans l'ensemble des phénomènes sismiques parcourant en mouvements ondulatoires l'espace terrestre dans le temps s'intitule la géodésie dynamique, aussi la géophysique.

Elle doit prendre en compte aussi les forces perturbatrices suffisamment bien modélisées comme les forces d'attraction de la Lune et du Soleil, les forces dues aux marées créées par ces corps, le frottement atmosphérique, la pression de radiation solaire directe et rediffusée par la Terre. Ces derniers temps de nombreux efforts ont été consacrés à expliquer les anomalies du champ de gravité observées en fonction des anomalies de masse - ou contrastes de densité - situées dans telle ou telle couche interne du globe. La séismologie a pour but de définir de plus en plus exactement la profondeur de ces couches. Sur ceci repose aussi l'étude de la tectonique des plaques, partie de l'enveloppe rigide de la Terre, nommée la lithosphère. Elle présente une épaisseur d'environ 100 km sous les océans et "nage" sous forme de multiples pièces fragmentées sur une couche plus chaude du manteau Terre partiellement fondue ou en état élastico-visqueux, nommée l'asténosphère, qui s'étend jusqu'à environ 200 km de profondeur. Si les plaques continentales s'effondrent, des fossés deviennent visibles à la surface; si elles entrent en collision entre-elles des dorsales de montagnes se dressent verticalement en hauteur et en profondeur, s'alignant souvent sur des centaines à des milliers de km. L'activité des volcans est liée en ligne directe à ces forces souterraines mais peut aussi se manifester sous forme de points chauds loin des bords des plaques; ces points chauds éjectent le magma provenant du manteau par des cheminées étroites. Les endroits où les plaques se rencontrent ou se séparent se distinguent surtout par une forte activité sismique. Les séismes en profondeur résultent du déclenchement des énergies emmagasinées, accumulées p.ex. par les forces de collision, aux endroits où l'une des plaques s'enfonce dans le manteau tandis que l'autre bloque tout mouvement. Les épicentres profonds associés aux zones de subduction peuvent atteindre une profondeur d'environ 700 km. Le grand nombre de séismes se manifestant sur les instruments de mesures a lieu à des profondeurs allant de quelques-uns jusqu'à 120 km.

Les premiers essais de mesures gravimétriques et clinométriques de l'effet de la marée Terre sur la croûte ont été faits à partir du 12 mars 1963 dans les casemates du St Esprit de l'ancienne forteresse et dans un tunnel de canalisation de la Ville, les deux taillés dans le grès de Luxembourg, couche géologique assez homogène; les résultats relatifs à ces premiers essais furent partiellement satisfaisants. Il s'est avéré plus raisonnable de déménager à un endroit plus prometteur. A partir de 1967/68 un laboratoire souterrain de géodynamique a été établi à Luxembourg-Walferdange dans une galerie latérale d'une mine de gypse qui présente les avantages suivants: absence d'eau, humidité réduite due à la présence du gypse; température stable à 1/100 de degré Celsius; calme microséismique convenable, situé à 700 m de l'entrée de la mine à une profondeur géologique de 80 m. L'engagement du Grand-Duché de Luxembourg, en collaboration étroite avec l'Observatoire Royal de Belgique, suite à l'initiative du Professeur Paul Melchior (aujourd'hui directeur honoraire de l'Observatoire) se limite à des études principales des phénomènes géodynamiques à savoir

- 1) les marées terrestres
- 2) les tremblements de terre

Ce qui frappe le plus dans notre système solaire c'est la régularité du mouvement de toutes les planètes. Ainsi le système Terre-Lune produit-il des forces de marées régularisées en périodes stables de 12 et de 24 heures; donc la Terre se déforme dans ce rythme sous l'effet de l'attraction de la Lune en produisant sur l'axe Terre-Lune en A et B deux bourrelets à la surface de la Terre diamétralement opposés. Il en est de même sur la Lune. Les bourrelets sont le résultat des accélérations de même grandeur subies par rapport au centre de la Terre ou de la Lune. Puisque la Terre tourne 1 fois en 24 heures une déformation maximale aux mêmes endroits se produit toutes les 12 heures, conforme au raisonnement de Newton. Connaissant les marées visibles aux bords des océans, nous sommes bien conscients de mesurer au laboratoire souterrain les marées relatives aux déformations globales du manteau terrestre.

Le dépouillement des mesures des marées terrestres mène à la détermination

- 1) des paramètres élastiques d'un modèle de Terre sphérique, les nombres de LOVE, qui sont

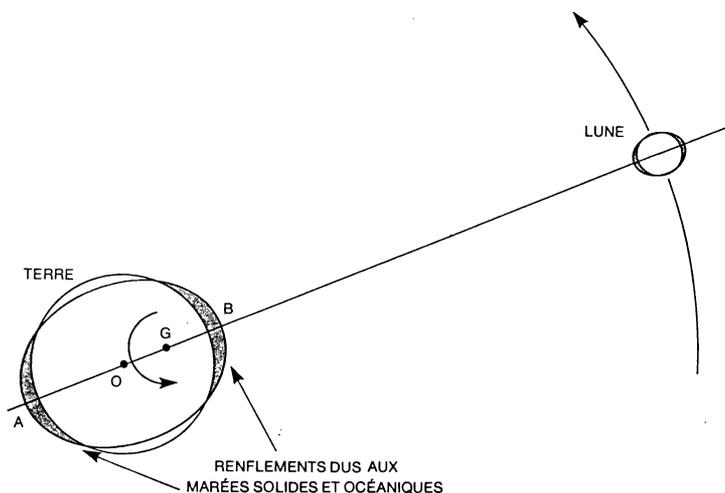
h = déformation radiale
 k = perturbation du potentiel
 l = déformation horizontale

- 2) du paramètre de viscosité (déphasage dû au retard des ondes de marée)

Pour chaque onde, l'amplitude observée mesurée à l'aide des instruments, est divisée par l'amplitude théorique calculée; de cette façon nous trouvons les expressions

amplitude	$\left\{ \begin{array}{l} \gamma = 1 + k - h \\ \delta = 1 + h - 3/2 k \\ \eta = ah' + 2h \end{array} \right.$	angle d'inclinaison de la
<u>observée</u>		croûte mesuré par clinomètre
amplitude		amplitude vert. mesurée par
théorique		gravimètre
		extensomètre horiz. et vertic.

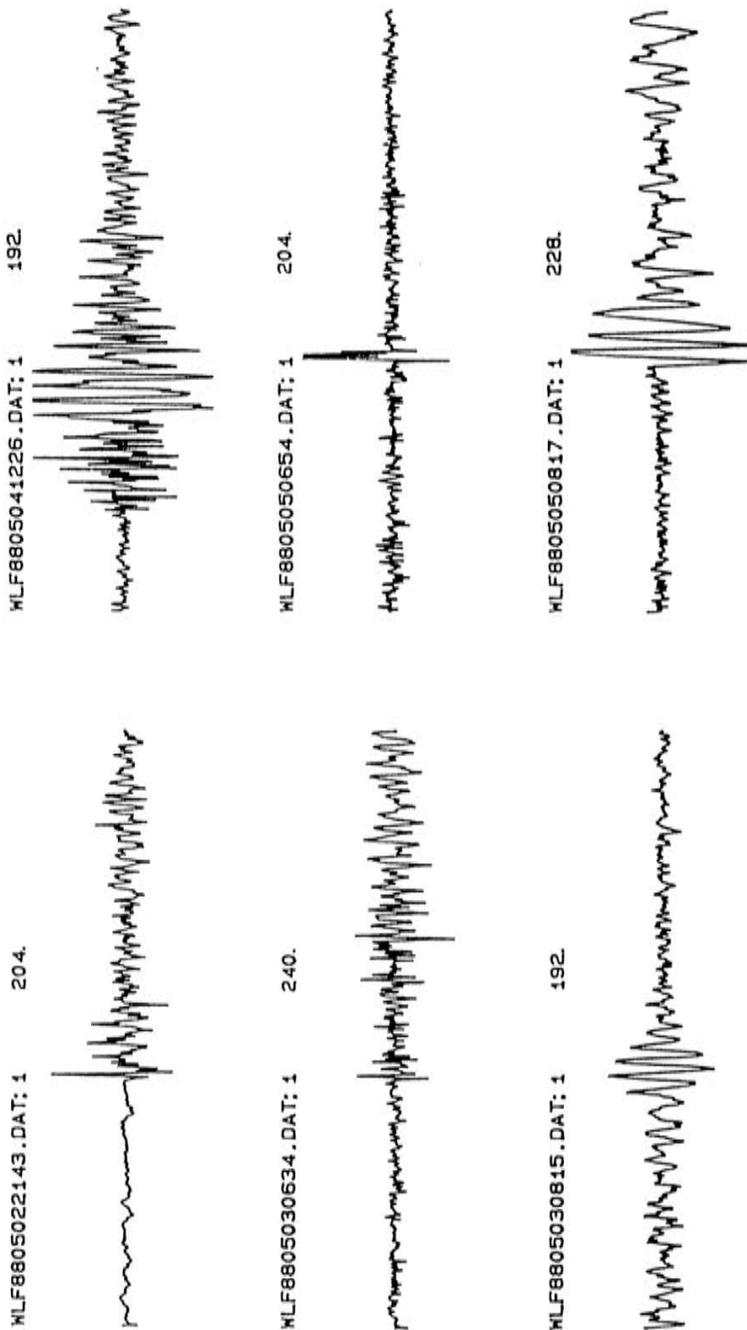
Les ondes semi-diurnes (~12 h) sont celles qui provoquent un freinage de la rotation de la Terre et sont désignées par M_2 et N_2 (ondes lunaires) et S_2 (onde solaire). Les ondes diurnes (~24 h) créent les couples des forces qui provoquent la précession et les nutations astronomiques; elles sont désignées par K_1 (luni-solaire); P_1 (solaire); O_1 (lunaire). Les calculs permettent aussi de déterminer les grandeurs correspondant aux effets dynamiques du noyau liquide de la Terre



ad 1) LA TERRE ET LA LUNE

sur les ondes diurnes de marée p.ex. pour K_1 qui correspond en astronomie à la précession nous avons pour Walferdange une expression de $0''0071$ en seconde d'arc et de 40 microgal. Ce sont les longues séries d'observation et les analyses des multiples valeurs fournies par le réseau mondial des stations d'observation qui réussiront à concrétiser les dimensions globales du phénomène. Après 28 ans de mesures faites (avec une seule interruption assez courte) à Luxembourg la longueur des séries d'observation est déjà très appréciable, comparée au reste du monde. Les mesures au laboratoire qui portent, sur initiative du département de la recherche du Conseil de l'Europe, le nom de: CENTRE EUROPÉEN DE GÉODYNAMIQUE ET DE SÉISMOLOGIE depuis 1988 s'effectuent avec le concours de toute une famille d'instruments:

PERIODE DU 27/04/88



Secousses telluriques enregistrées à Walfendange par sismomètres à courte période.

- 3 gravimètres (mesure de la composante verticale)
- 8 clinomètres (6 pendules horizontaux en quartz et 2 systèmes de vases communiquants (water-tube))
- 3 extensomètres (2 verticaux et 1 horizontal)
- 2 niveaux astronomiques pour les longues ondes semi-annuelles et annuelles.

S'y associent les mesures à haute précision de la température et de la pression atmosphérique. Tous les résultats obtenus à Luxembourg/Walferdange sont analysés et calculés à l'Observatoire Royal de Belgique qui occupe depuis les années soixante le centre international des marées terrestres. Le centre offre aux autres pays la possibilité d'installer leurs instruments pour des raisons de comparaison et d'étalonnage; cette offre est souvent acceptée grâce aux excellents résultats obtenus à Walferdange.

2. En séismologie le Luxembourg occupe aussi un point d'observation intermédiaire entre ceux des centres universitaires ou observatoires de Belgique, de l'Allemagne et de la France. Sont observées les secousses telluriques à grande et à faible énergie. La sensibilité des différents séismomètres est étalonnée de façon à enregistrer les ondes parcourant tout le globe en provenance des régions à forte sismicité et aussi à capter les moindres effets d'explosion ou d'activité des failles géologiques régionales. Les régions proches de nous ayant envoyé des ondes séismiques enregistrées par nos instruments sont les Vosges (Remiremont) et la région ardennaise belge et allemande au nom de Eifel, le fossé du Rhin et de Hohenzollern. Au terrain ardennais luxembourgeois une secousse de 1.9 sur l'échelle Richter fut enregistrée en décembre 1987. Les résultats sont analysés surtout à Bruxelles mais entrent aussi dans le réseau des communications rapides entre les pays de l'Europe intéressés. Les séismomètres acquis par le Gouvernement luxembourgeois à partir de 1975 sont:

en 3 composantes: des SPRENGNETHER (USA) à longues et moyennes périodes

en 2 x 3 composantes: des LENNARTZ (R.F.A.) à courtes périodes, dont 1 set est installé à Vianden au château.

Tous les enregistrements sont captés sur bande magnétique dotée des tops horaires par minutes.

Les travaux de maintenance et d'entretien sont à charge du Grand-Duché, le Musée d'Histoire Naturelle et de la Belgique, l'Observatoire Royal d'Uccle.

Les journées luxembourgeoises de géodynamique sont de petits symposiums créés en faveur de jeunes chercheurs européens et aussi des autres continents intéressés à collationner leurs résultats et à en faire, si possible un amalgame de valeur stable internationale. Elles fonctionnent depuis 1970 déjà pour la 71^e fois. Le Conseil de l'Europe s'est montré fort intéressé à ces rencontres qui ont assuré dès le début une accélération remarquable des projets européens pour satellites et pour les grands profils gravimétriques et sismologiques européens. Depuis 1988 le Conseil de l'Europe a réussi à subventionner un réseau européen de plusieurs centres d'observation par la création de l'accord partiel ouvert en matière de recherche et de secours à l'encontre des catastrophes naturelles et technologiques majeures. Ceci nous permet d'organiser des workshops avec le but d'intensifier davantage les travaux d'un nombre de projets internationaux et nationaux bien définis en avance. Les condensés de nos travaux sont imprimés à Luxembourg et diffusés à raison de plusieurs centaines dans les universités de l'Europe et des pays intéressés par le monde. Les pays en collaboration directe avec l'équipe belgo-luxembourgeoise au Centre européen de géodynamique à Walferdange sont l'USA, le Japon, l'Allemagne, la France, la Suisse, l'Angleterre, la Finlande, l'Islande, l'Espagne, la Chine, l'URSS. De part ce destin, le petit Grand-Duché peut courageusement poursuivre son rôle de coordinateur qui lui incombait si souvent après 1945, bien sûr dans notre cas, dans un domaine limité mais très intéressant des sciences de la Terre. Pour les chercheurs engagés dans les sciences de la Terre la déclaration de Voltaire à l'adresse de l'ingénieur-mathématicien Maupertuis (1698 -1759) est encore valable aujourd'hui: "Ton sort est de fixer la figure du monde, de lui plaire et de l'éclairer".