AUVERGNE

N°82 - DÉCEMBRE 2013

CHACES

la fluorescence
l'histoire du calcul numérique
pouvoirs et mystères du cerveau
la réfraction astronomique
visite des laboratoires MSD
visite de la zone humide d'Aydat

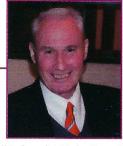


Revue de l'ADASTA

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



E D I T O R I A L



Voici le dernier numéro de la revue «Auvergne-Sciences» de l'année 2013. Il révèle à nouveau toute la diversité et le niveau des activités de l'Adasta : les conférences, les visites et la revue. Malheureusement les animations auprès des scolaires n'ont pas pu être reconduites cette année comme nous l'aurions souhaité, par manque d'animateurs.

Les conférences organisées par Georges Anton ont connu un succès hors du commun. Le choix des sujets et le niveau des conférenciers n'ont pas échappé aux membres et à la communauté scientifique de sorte que la participation fut massive. Ainsi pour la conférence du professeur Chazal sur le cerveau, les quelque 160 participants étaient pour la première fois à l'étroit dans la salle de Bien Assis. De même la conférence du professeur Vazeille sur le boson de Higgs fut également un succès remarquable.

Après la visite de MSD cet été, relatée dans cette revue, Jean-Claude Capelani, à présent en charge des visites, a organisé un voyage en décembre à Genève pour découvrir les installations du CERN et en particulier celles qui ont permis à François Englert et Peter Higgs d'obtenir le prix Nobel de physique 2013.

De nombreux membres de l'Adasta seront du voyage qui fera l'objet d'un compte-rendu dans la prochaine revue.

Un numéro spécial entièrement consacré à l'exploration du monde infiniment petit des particules élémentaires paraîtra au début de l'année 2014. Il a été rédigé à la suite d'un long travail de synthèse par le professeur Louis Avan l'un des plus éminent et des plus respecté membre de l'Adasta. Tous les adhérents de notre association ont eu l'occasion d'apprécier l'étendue des connaissances et les grandes qualités humaines de Louis Avan qui est à l'origine, avec son épouse, de la création, à Clermont, d'un laboratoire qui est aujourd'hui devenu le LPC

CLERMONT
COMMUNAUTE

VILLE DE

CLERMONT
FERRAND

CENTRE FRANCE

CONSEILEGIONAL
AUVERGNE

Comité de rédaction de la Revue Auvergne-Sciences

Rédacteur en chef : Philippe Choisel

Membres: Georges Anton, Gérard Baillet, Vincent Barra,

Henri Bouffard, Jean-Claude Capelani,

Jean Chandezon, Roland Fustier, Michel Gendraud,

Paul-Louis Hennequin, André Schneider

(Laboratoire de Physique Corpusculaire) de l'Université Blaise Pascal.

Vous serez informés des autres actions de l'ADASTA lors de l'Assemblée Générale qui se déroulera début février 2014.

A propos du Prix Nobel de Physique

Le Prix Nobel de Physique 2013 a été attribué aux 2 théoriciens François Englert et Peter Higgs pour la découverte du «boson de Higgs», nouvelle particule élémentaire d'une importance capitale en physique corpusculaire.

En apprenant cette nomination, les scientifiques du Laboratoire clermontois de Physique Corpusculaire de l'Université Blaise Pascal se sont réjouis car la confirmation de la théorie est venue des expérimentateurs du laboratoire clermontois qui avec les chercheurs et les techniciens ont conçu, élaboré et actionné le détecteur du grand collisionneur du CERN à Genève. Cette expérimentation était indispensable pour détecter le boson de Higgs.

Ce Nobel est un peu le vôtre a déclaré Jacques Martinot directeur de l'Institut dédié (IN2P13) du CERN qui a souligné l'action déterminante des physiciens, techniciens et expérimentateurs clermontois, propos cautionnés par un physicien clermontois Jean Orloff, jadis thésard sous la responsabilité de François Englert.

Jean Orloff a regretté que les acteurs clermontois qui ont joué un rôle si important dans la découverte du boson, n'aient pas été associés au prix.

Le titre de Docteur «Honoris causa» à été décerné à François Englert au cours d'une cérémonie officielle aux Cézeaux .

L'ADASTA tient à féliciter les personnels du laboratoire de physique corpusculaire de Clermont et s'associe à ce magnifique succès collectif.

Le Président Henri Bouffard

S O M M A I R E

Editorial2 de couverture
La fluorescence1
L'histoire du calcul numérique5
Pouvoirs et mystères du cerveau14
La réfraction astronomique17
Conférence prévues pour le 1er semestre 201421
Visite des laboratoires MSD22
Visite de la zone humide d'Aydat24
Histoires de plantes et autres4 de couverture



Photo de couverture : réfraction astronomique, photo de Gérard Baillet voir explications p 21

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



LA FLUORESCENCE IN SITU DE LA CHLOROPHYLLE ET LES APPLICATIONS LIÉES A SA MESURE

MICHEL GENDRAUD

Agrégé de Physiologic-Biochimie Professeur honoraire de Physiologie végétale de l'Université Blaise Pascal Membre de l'ADASTA

INTRODUCTION

La chlorophylle (du grec ancien $\chi\lambda\omega\rho\delta\varsigma$ / khlôrós «vert» et $\phi\delta\lambda\lambda$ ov/phúllon «feuille» est le principal pigment assimilateur des végétaux. Elle absorbe la lumière bleue et rouge et pas le vert, ce par quoi les végétaux apparaissent verts à notre œil. En fait, il existe plusieurs chlorophylles qui se distinguent par des détails de structure ayant peu de rapports avec leurs propriétés photo-réceptrices. Dans la suite de cette présentation, il ne sera question que de la chlorophylle a (figure 1), principale molécule concernée par le phénomène étudié.

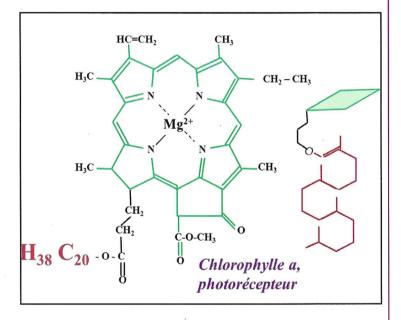


Fig. 1.- La chlorophylle a, molécule en deux parties, l'une plane (en vert), résonante par ses 11 doubles liaisons conjuguées et son ion magnésium central, et apte à absorber des radiations lumineuses visibles, l'autre (en brun), de nature lipidique, qui assure son ancrage fonctionnel dans la membrane.

La chlorophylle a possède une partie plane, résonante, responsable de la photo-réception (et de la fluorescence), et une partie lipidique (apolaire) qui permet à la chlorophylle de s'insérer dans la membrane, elle-même lipidique, où elle officiera. A l'automne, il suffit que le lien entre les deux soit rompu (hydrolyse au niveau de la partie noire) pour que le photorécepteur soit dégradé et qu'apparaissent les couleurs automnales de la feuille. La chlorophylle a absorbe le bleu (vers $\lambda = 430$ nm) et le rouge (vers $\lambda = 660$ nm). Excitée par ces radiations, elle peut se désexciter de diverses manières (figure 2) notamment en fluoresçant (au-delà de $\lambda = 700$ nm).

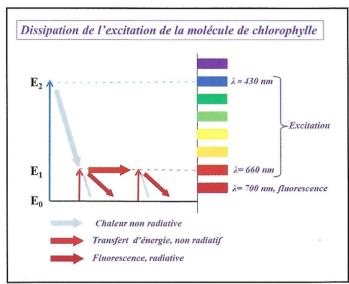


Fig. 2.- La chlorophylle, dans son état fondamental E_0 , excitée par la lumière bleue, passe au niveau E_2 et, par désexcitation rejoint le niveau E_1 qu'elle atteint aussi suite à une excitation par la lumière rouge. Les transferts d'énergie importants pour la photosynthèse sont entre E_1 et E_0 .

Pour sa fonction physiologique, la chlorophylle a est intégrée à deux photosystèmes, PS I et PS II, numérotés ainsi, dans l'ordre de leur découverte (figure 3), et clés de la phase claire de la photosynthèse, celle de la collecte de l'énergie lumineuse. Ces photosystèmes fixés à la membrane lipidique du thylacoïde, la traversent de part en part. Ils sont organisés en deux parties, centre réactionnel et antenne collectrice de lumière, faites de protéines associées à des pigments dont la chlorophylle. Sur la membrane du thylacoïde, PS I et PS II fonctionnent en série (figure 3). Ainsi l'ensemble peut extraire des électrons de faible énergie de l'eau et, grâce à l'énergie lumineuse captée par la chlorophylle, augmenter leur niveau énergétique pour produire le NADPH; ce réducteur entraine alors l'énergie vers la phase sombre de la photosynthèse, celle de la synthèse des sucres.

Les propriétés de la chlorophylle a au sein des photosystèmes dépendent de son environnement, donc de la nature du photosystème. C'est ainsi que seule la fluorescence de la chlorophylle a du PS II est détectable sur la feuille intacte. De même, l'importance relative des voies de désexcitation de la chlorophylle a dépend de cet environnement, modulé par la physiologie de la photosynthèse. Là se trouve l'intérêt des mesures de la fluorescence *in situ* de la chlorophylle a.

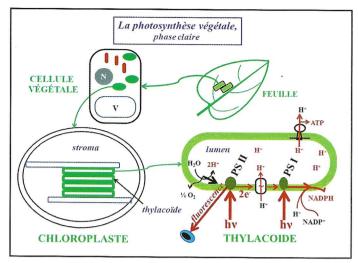


Fig. 3.- Localisation des photosystèmes PS I et PS II dans l'appareil photosynthétique. La feuille, est constituée de cellules dotées de chloroplastes, sièges de la photosynthèse. Ces chloroplastes, descendants «domestiqués» de cyanobactéries, renferment des empilements de thylacoïdes en charge de la phase claire de la photosynthèse, dépendante de la lumière. L'énergie (hV) des photons absorbés par la chlorophylle des photosystèmes est communiquée à des électrons venus de l'eau.

LES FLUX D'ÉNERGIE AU NIVEÂU DU PHOTOSYSTÈME II

Les flux d'énergie au niveau du PS II sont présentés en figure 4. L'énergie incidente arrivant sous la forme de photons au niveau de l'antenne collectrice de lumière est dissipée selon 4 voies désignées par leur constante de vitesse k. La plus importante, dans les conditions normales de fonctionnement, rejoint la «photochimie», manière de désigner la voie (k_p) qui, en énergisant par la lumière (photo-) les électrons venus de l'eau, produit le NADPH et conduit aux sucres (-chimie).

Les autres voies, physiques, sont la dissipation thermique (k_D) , le transfert direct éventuel de l'excitation au PS I (k_T) , et la fluorescence (k_F) . En d'autres termes, la fluorescence représente une fraction de l'énergie collectée qui n'est pas convertie en flux d'électrons. Elle peut être mesurée et utilisée pour étudier le fonctionnement du PS II, et comme l'ensemble des processus élémentaires de la photosynthèse sont interdépendants, elle peut servir d'outil d'analyse $in\ situ$ de la photosynthèse dans la feuille intacte.

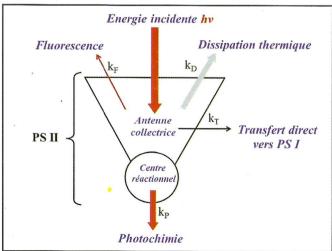


Fig. 4.- Représentation schématique des différentes voies d'utilisation de l'énergie reçue par le PS II. Le triangle représente l'antenne collectrice d'énergie lumineuse et le cercle le centre réactionnel du PS II. $k_F,\,k_D,\,k_T$ et k_P sont les constantes de vitesse des processus de dissipation de l'énergie hors du photosystème.

MESURES DE LA FLUORESCENCE FOLIAIRE

Le dispositif expérimental

Les appareils de terrain se présentent comme des pinces qui enserrent la feuille de manière à l'appliquer contre la section d'un faisceau de fibres optiques qui acheminent diverses lumières excitatrices d'une part, et d'autre part, la réponse fluorescente de la chlorophylle foliaire jusqu'à un détecteur (figure 5). Les lumières excitatrices peuvent être celle d'une diode électro-luminescente (LED) délivrant un très faible flux de photons, (FP : 0,1 μ mole. $m^{-2}.s^{-1}$), pour mesurer la fluorescence minimale (F0), ou celle d'une lampe flash halogène à très fort FP (4000 μ mole. $m^{-2}.s^{-1}$) pour mesurer la fluorescence maximale (Fm), ou encore celle d'une lampe halogène actinique continue assurant un FP de l'ordre de grandeur de la lumière solaire (FP : 220 μ mole. $m^{-2}.s^{-1}$).

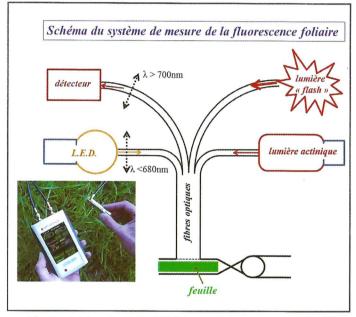


Fig. 5.- Schéma du dispositif de mesure de fluorescence *in situ* de la chlorophylle. Via des fibres optiques, la feuille peut être irradiée par la lumière très faible d'une diode électro-luminescente (LED), par un flash extrêmement intense ou par une lumière actinique propre à assurer la photosynthèse. Dans tous les cas et toujours par fibre optique, la fluorescence émise par la chlorophylle de PS II est envoyée vers un détecteur qui en mesure l'intensité.

ADASTA

Adhésions et Abonnements Adhésions à titre individuel : 30 € Adhésions à titre collectif : 80 €

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

Permanences - elles sont assurées par les bénévoles: lundi de 14h à 17h, mercredi de 9h à 12h En cas d'absence laisser un message sur répondeur ou E-mail.

Adresser le courrier: ADASTA, Centre Riche-Lieu 13 rue Richelieu - 63400 Chamalières

Siège social : 10 rue de Bien-Assis 63000 Clermont-Ferrand Tél. 04 73 92 12 24 E-mail : adasta@wanadoo.fr

Site internet: www.adasta.fr

Dépôt légal décembre 2013 - N° ISSN - 1166-5904

Le centre réactionnel du PS II

Le centre réactionnel du photosystème II assure le transfert de l'énergie lumineuse incidente aux électrons venus de l'eau ; il peut être ouvert ou fermé (figure 6). Le centre est ouvert lorsqu'il est en capacité d'absorber l'énergie lumineuse pour énergiser un électron. Cet électron quitte le centre réactionnel qui alors, ne peut répondre à un nouvel apport d'énergie, n'ayant plus d'électron à énergiser. **Fermé**, le centre réactionnel «rejettera» ce nouvel apport d'énergie sous la forme de fluorescence de la chlorophylle. C'est la venue d'un électron de l'eau qui permettra la **réouverture** du centre réactionnel qui se retrouve alors dans son état initial.

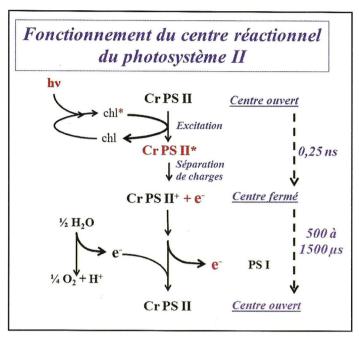


Fig. 6.- Noté CrPS II, le centre réactionnel ouvert passe dans un état excité (*) suite à l'absorption d'énergie lumineuse ($h\nu$). Un électron quitte alors le centre qui devient cationique et oxydé, incapable de traiter un nouvel apport d'énergie lumineuse : le centre est fermé. Sa réouverture, beaucoup plus lente que sa fermeture, se fera après l'arrivée d'un nouvel électron venu de l'eau.

Etude d'une cinétique d'induction de fluorescence.

Elle est représentée à la figure 7 qui permet d'identifier les divers paramètres mesurés. Hors régime actinique, ce sont $\mathbf{F_0}$, la fluorescence minimale et $\mathbf{F_m}$, la fluorescence maximale et, en régime actinique $\mathbf{F'}$, $\mathbf{F'_m}$ et $\mathbf{F'_0}$, respectivement la fluorescence, la fluorescence maximale et la fluorescence minimale.

Ces mesures sont à mettre en rapport avec l'état des centres réactionnels de la feuille. Au départ, dans la feuille placée à l'obscurité, tous les centres réactionnels sont ouverts. Ils restent en l'état lors de l'illumination par L_m qui provoque leur fluorescence minimale ${\bf F_0}$. Le flash L_s de lumière saturante, les ferme tous et, dans cette situation, c'est ${\bf F_m}$ fluorescence maximale de la feuille qui est accessible, à la suite de quoi ils se rouvrent tous, revenant à ${\bf F_0}$. L'allumage de L_a lumière actinique continue, non saturante, enclenche le processus de photosynthèse : tous les centres étant ouverts au départ, L_a ferme une partie d'entre eux, provoquant un pic de fluorescence inférieur à ${\bf F_m}$, car une fraction de l'énergie incidente s'engage dans la voie photochimique, éteignant d'autant la fluorescence. Le processus se poursuit, la voie photochimique s'installe et la fluorescence diminue jusqu'à l'état stationnaire d'équilibre entre centres ouverts et fermés, caractérisé par ${\bf F}$ '.

Si, pendant ce régime, un flash de lumière saturante L_s est appliqué, il ne peut fermer que les centres ouverts au moment (actuellement) d'où une fluorescence maximale $\mathbf{F'}_{\mathbf{m}}$ inférieure à $\mathbf{F}_{\mathbf{m}}$.

A l'extinction de la lumière actinique, alors que des centres fermés par leur engagement dans la photosynthèse se rouvrent, la fluorescence minimale devient transitoirement $\mathbf{F'_0}$, inférieure à $\mathbf{F_0}$.

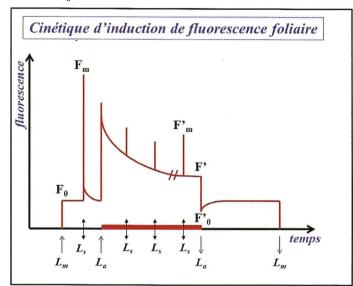


Fig. 7.- La portion de feuille analysée, adaptée à l'obscurité, est illuminée par le très faible flux de photons $(0,1\ \mu \text{mole.}\ \text{m}^2.\text{s}^1)\ L_m$ d'une diode électroluminescente pour mesurer la fluorescence minimale F $_0$. Puis un flash de lumière blanche saturante L_S (4000 μ mole. $m^2.\text{s}^1$ pendant 0,7s), ferme tous les centres réactionnels pour mesurer la fluorescence maximale F $_m$. Alors, une lampe actinique La est allumée (portion rouge de l'abscisse), qui émet un flux de photons de l'ordre de 220 μ mole. $m^2.\text{s}^{-1}$ afin que la feuille fasse sa photosynthèse. L'addition d'un flash saturant L_S à l'équilibre F' permet la mesure de F' $_m$ en régime photosynthétique. Après l'extinction de la lumière actinique, le niveau de fluorescence minimale F' $_0$ est déterminé. Les flèches orientées vers le haut indiquent l'allumage des sources lumineuses, les flèches orientées vers le bas indiquent leur extinction et les flèches à double sens correspondent aux flashes lumineux.

POUR MIEUX CONNAITRE LA PHASE CLAIRE DE LA PHOTOSYNTHÈSE.

Hors lumière actinique, l'efficience photochimique maximale du PSII.

L'efficience photochimique Φ_P du PS II n'est autre que le rendement quantique de l'acte photochimique de ce photosystème soit le rapport de la voie photochimique de désexcitation photochimique k_p à la somme de toutes les autres voies de désexcitations (figure 4):

$$\Phi_{P} = k_{P}/k_{P} + k_{F} + k_{D} + k_{T}$$

On démontre (encadré) que l'efficience photochimique maximale Φ_{Pmax} du PS II, lorsque tous les centres sont ouverts et aptes à être fermés par un flash de lumière saturante, est :

$$\Phi_{\text{Pmax}} = F_{\text{m}} - F_{\text{0}} / F_{\text{m}}$$

 Φ_{Pmax} est un rapport de fluorescences, grandeur sans dimension. Pour toutes les espèces végétales, les mesures donnent Φ_{Pmax} = 0,834 ± 0,004. Ceci indique d'une part que le dispositif est probablement unique et, comme disent les évolutionnistes, très conservé. Cette constance permet de s'assurer, par une mesure de routine, du bon état des centres réactionnels d'une pièce foliaire.

Sous lumière actinique, efficience photochimique actuelle, efficience photochimique des centres ouverts, quenching photochimique.

Sous lumière actinique les mesures de F', F' $_{m}$ et F' $_{0}$ permettent de calculer:

- Φ_{Pact} = F'_m F'/F'_m , efficience photochimique «actuelle» du PS II au moment du flash de lumière saturante,
- Φ_{Pouv} = F'_m F'_0 / F'_m , efficience photochimique des systèmes ouverts à l'arrêt de la lumière actinique.
- Φ_{Pact} = q_P x Φ_{Pouv} , le coefficient de proportionnalité q_P est le quenching photochimique, grandeur sans dimension qui représente, sous lumière actinique, l'extinction de fluorescence due à l'écoulement d'une part de l'énergie lumineuse incidente vers PS I, le NADPH et le sucre.

Sa mesure renseigne sur le fonctionnement de PS II dans les conditions physiologiques de photosynthèse.

- le calcul montre que $q_P = F{'}_m$ - $F{'}/F{'}_m$ - $F{'}_0$, rapport des centres ouverts au moment du flash de lumière saturante à la totalité des centres pouvant être ouverts dans l'échantillon, en d'autres termes, c'est la proportion de centres ouverts, sous lumière actinique, paramètre nommé B dans l'encadré, dans l'hypothèse où chaque unité PS II est indépendante des autres.

POUR COLLECTER DES DONNÉES SUR L'ÉTAT DE SANTÉ DU VÉGÉTAL

La mesure de Φ_{Pmax} renseigne sur le **bon état du PS II** en lui-même. Quand sa valeur, «constante universelle» du monde végétal s'abaisse bien au-dessous de 0, 834, c'est l'indice d'une altération de PS II qui augure mal de l'aptitude à faire des sucres de l'organe foliaire analysé. Voici quelques années, une étudiante clermontoise en master professionnel effectua son stage de fin d'études au Québec pour y mesurer Φ_{Pmax} de PS II de sépales de fraises en barquettes en vue de déceler le cultivar qui aurait le PSII dans le meilleur état pour entreprendre le voyage du producteur au consommateur.

La mesure du quenching photochimique q_p donne, pour l'organe étudié, l'importance de la voie photochimique de dissipation de l'énergie par PS II, c'est-à-dire la voie qui conduit l'énergie aux sucres. Dans ce domaine, de nombreuses études ont porté et portent sur l'effet de la sécheresse sur le q_D de plantes à la base de l'élaboration et de la production végétale : ainsi pour les fourrages, les céréales, la vigne, l'olivier, les arbres fruitiers (poirier, pommier, pêcher...) et forestiers (chênes, peuplier, eucalyptus, hévéa...). Dans la plupart des cas, Φ_{Pmax} n'est pas affecté par la sécheresse, mais q_P chute au-delà de 40% de perte en eau du système foliaire, et indique un dysfonctionnement plus ou moins rapide et complet de la voie photochimique. L'objectif de cette recherche est, naturellement, de repérer les cultivars les plus résistants, mais aussi d'acquérir des données pour faire face au réchauffement climatique.

Enfin, la mesure de la fluorescence de la chlorophylle prend d'autres dimensions quand elle s'effectue d'un avion ou d'un satellite artificiel. Certes il ne s'agit pour le moment que d'une simple quantification du photorécepteur dans un lac, une mer ou un couvert végétal. Les données physiologiques ne sont pas accessibles.... mais le secteur est actif.

BIBLIOGRAPHIE SOMMAIRE

Bolgrien D.W., Granin N.G. et Levin L., 1995.- Surface temperature of lake Baïkal observed fron AVHRR images, Photogrammetric engineering and remote sensing, 61

Daumard F., 2010.- Contribution à l'analyse de la lumière réfléchie par la végétation pour la télédétection de la fluorescence chlorophyllienne. Thèse Ecole Polytechnique.

Dulamsuren C., Hauk M., Bader M., Oyungerel S., Osokhjaral D. Nyambayar S. et Leuschner C., 2009.- The different strategies of Pinus sylvestris and Larix sibirica to deal with summer drought in a northern Mongolian forest-steppe ecotone suggest a future superiority in a warming climate. Canadian Journal of Forest Research 39 (12).

Epron D. et Dryer E., 1990.- Stomatal and non-stomatal limitations of photosynthesis by leaf water deficits in three oaks species: a comparison of gas exchange and chlorophyll a fluorescence data. Annales des Sciences Forestières, 47.

Gover J. et King S., 2004.- Satellite fluorescence as a measure of ocean surface Chlorophyll, Gayana, 68(2).

Kasraoui M.F. et al., 2006.- Effet du déficit hydrique au niveau de la phase photochimique du PSII chez deux variétés d'olivier. C. R. Biologies 329

Methy M., Damesin C. et Rambal S., 1996.- Drought and photosystem II activity in two Mediterranean oaks. Annales des Sciences Forestières, 53.

Modélisation de la fluorescence du PS II

L'intensité de fluorescence F est donnée par le produit de l'intensité du flux de photons incidents I par le rendement de fluorescence Φ_F , soit $F = I.\Phi_F$.

L'énergie d'excitation peut quitter la chlorophylle par 4 voies différentes, la fluorescence, la photochimie pour la synthèse des sucres, la chaleur, une transmission aux chlorophylles du PS I. Les taux respectifs de ces voies sont notés :

- k_F, taux de fluorescence,
- $k_P^{}$, voie photochimique, transfert d'électrons vers la synthèse de sucres
 - **k**_D, dissipation thermique,
 - k_T, transfert de l'excitation au PS I,

Le rendement de fluorescence Φ_F devient le rapport du taux de fluorescence à la somme de tous les taux de désexcitation de la chlorophylle $\Phi_F = k_F / k_F + k_P + k_D + k_T$ et l'intensité de fluorescence est :

 $F = I. (k_F / k_F + k_P + k_D + k_T)$ pour un centre PS II ouvert (1)

 $F = I. (k_F / k_F + k_D + k_T)$ pour un centre fermé, car alors $k_P = 0$ (2)

Dans une feuille où cohabitent une fraction B de centres ouverts et une fraction (1-B) de centres fermés,

 $\textbf{F}=\textbf{I}.~[\textbf{B}.~\textbf{k}_F~/~\textbf{k}_F+\textbf{k}_D+\textbf{k}_D+\textbf{k}_T)+(\textbf{1-B}).~\textbf{k}_F~/~\textbf{k}_F+\textbf{k}_D+\textbf{k}_T)],$ en admettant que chaque unité PS II est indépendante des autres. Lorsqué tous les centres sont ouverts, B=1, et pour la feuille la fluorescence répond à l'équation (1), elle est minimale et égale à $\textbf{F}_0.~\textbf{A}$ l'inverse lorsque tous les centres sont fermés, la fluorescence est maximale \textbf{F}_m et répond à l'équation (2). Et donc :

 $F_m - F_0 / F_m = [I. k_F / (k_F + k_D + k_T) - I. k_F / (k_F + k_D + k_T)] \times [(k_F + k_D + k_T) / I. k_F]$

soit, en simplifiant:

 F_m - F_0/F_m = k_p / (k_F + k_P + k_D + k_T) qui n'est autre que Φ_{pmax} efficience photochimique maximale du PS II.



L'HISTOIRE DU CALCUL NUMÉRIQUE 2^{ème} PARTIE : DU 18^{ème} AU 21^{ème} SIÈCLE

FRANCIS ASPORD

Ancien élève de l'Ecole Centrale de Paris, Membre de l'ADASTA, Retraité SNCF, Ingénieur Conseil

18ème siècle :

1715 Brook Taylor, et 1742 Colin Maclaurin

Le développement de Taylor / Maclaurin permet d'approcher une fonction compliquée par une suite de puissances de x qui se calcule aisément. C'est une excellente façon de tabuler les fonctions.

Exemple : Pour un angle x de $30^\circ = \pi/6 = 0,5236$ radian: Cos x = 1 - $x^2/2$! + $x^4/4$!... puissances paires, factorielles [1] identiques, signes alternés

Sin $x = x - x^3/3 + x^5/5 \dots$ puissances impaires et idem Tan $x = \sin x / \cos x$. Pas de formule simple pour cette fonction.

Les différents termes décroissent rapidement et on obtient cos = 0,8660; sin = 0,5000; tan = 0,5774.

Il existe une formule simple pour la fonction inverse de tan : $ArcTan(x) = x - x^3/3 + x^5/5...$ puissances impaires, dénominateurs identiques, signes alternés.

Pour x = 0.5774 on trouve ArcTan = 0.5236 radians, c'està-dire l'angle de départ. La boucle est bien bouclée.

Exemple de calcul d'un logarithme «ln» pour logarithme naturel de Néper et «log» pour logarithme décimal de Briggs. Les 2 sont proportionnels et $\log(x) = \ln(x) / \ln(10)$.

 $ln(1+x) = x - x^2/2 + x^3/3...$ puissances entières, dénominateurs identiques, signes alternés, x limité à l'intervalle (-1:+1).

Pour x = -0.5 on trouve -0.69315 qui est le «logarithme népérien» de 0.5. Inverser un nombre change le signe du logarithme. Donc $\ln(2) = 0.69315$. On fait pareil pour x = -0.9, d'où $\ln(0.1) = -2.30259$ et $\ln(10) = 2.30259$, d'où, enfin, $\log(2) = \ln(2) / \ln(10) = 0.30103$.

La formule de Taylor / Maclaurin est une vraie mine d'or pour le calcul des fonctions.

1717 James Stirling s'intéresse à la fonction «factorielle» et en donne une approximation pour les grands nombres. Cette fonction s'introduit naturellement lorsque l'on cherche à calculer le nombre de permutations de N objets. Exemple : le carré 3x3 que l'on remplit à l'aide des 9 chiffres 1, 2...8, 9. Pour la première place j'ai 9 possibilités. Pour la deuxième place je n'en ai que 8 car je m'interdis de répéter un chiffre. Et ainsi de suite, il manque toujours un chiffre à chaque fois. Le nombre est donc 9x8x7x6x5x4x3x2x1 = 9 ! = 362.880. C'est le nombre de tours que va faire votre programme pour trouver tous les carrés latins 3x3. Si on s'autorisait à reprendre chaque chiffre on obtiendrait 9x9x9x9x9x9x9x9x9 = 99 = 387.420.489 ce qui est beaucoup plus. On peut en déduire le nombre de grilles distinctes au SUDOKU.

Vous êtes voyageur de commerce et vous cherchez, parmi toutes les tournées possibles en France, la moins coûteuse en carburant ? Vous vous limitez aux 23 régions administratives ? Verdict 23! ~ 10²² cas à étudier. Vous voulez affiner aux 90 départements ? Verdict 90! ~ 10¹³⁸ cas à étudier. Vous devez remonter le temple du Baphuon à Angkor (Cambodge) et vous avez un puzzle de 300.000 pierres à remettre dans le bon ordre ? Verdict 300.000! ~10^{3.483.468}

On touche là à «l'explosion combinatoire». Cela signifie que même les ordinateurs les plus puissants mettraient des millénaires à résoudre certains problèmes. Il a donc fallu trouver une parade (cf. XXème siècle).

1742 La conjecture [2] de Goldbach dit que tout nombre pair supérieur à 2 est la somme de 2 nombres premiers [3]. Un prix d'un million de dollars est promis à celle ou celui qui la démontrera. A vos crayons ! Elle a été testée par ordinateur jusqu'à 4x10¹⁴ en 2000. Une autre conjecture prétend que les nombres premiers jumeaux [4] sont en nombre infini. Il y a de nombreuses conjectures célèbres. Certaines finissent par être démontrées au bout de plusieurs siècles, comme celle des 4 couleurs qui suffisent pour colorier une carte plane.

1760 Euler s'intéresse aux différentes balades possibles sur les 7 ponts de la ville de Königsberg (aujourd'hui Kaliningrad, enclave russe en Europe). Intérêt ? Il vient d'inventer la «théorie des graphes». Qu'est-ce qu'un graphe ? Un ensemble de points reliés par des traits. Mais ça sert à quoi ? Si les points sont des villes et les traits des routes, cela permet à votre GPS de vous donner, en quelques secondes, le meilleur itinéraire possible. Attention à ne pas trop mettre «itinéraire le plus court», sinon gare aux chemins vicinaux et aux pistes en latérite.

Euler a laissé son nom à des dizaines de formules. Mais, pour mon propos, il en est une qui est vraiment intéressante. Il est le premier à donner une solution approchée d'une équation différentielle.

Exemple : v(t) = -y(t) avec y(0)=1. Votre vitesse v est égale à l'opposé de votre altitude y. Au bout de combien de temps serez-vous descendu de la moitié de votre hauteur initiale ?

Euler applique quelques idées simples et ça va marcher :

- la vitesse n'est qu'une différence d'altitude divisée par une différence de temps v = dv/dt.

- dt étant le «pas de temps» dont avance le chronomètre à chaque calcul, cet intervalle est faible si on veut une bonne précision et donc on peut considérer l'altitude comme quasi constante à chaque pas.

- L'altitude de départ est connue = 1 dans mon exemple.

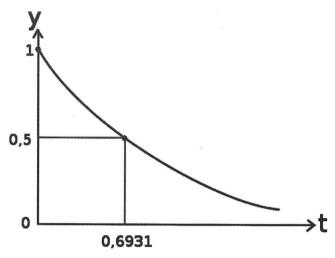
A partir de ces simples lois, on calcule la solution comme on monte un tricot : maille après maille.

Pour t = 0 on a $y_0 = 1$. Pour $t = \varepsilon$ on a y = quoi?

 $(y-y_0)/\epsilon = -y_0$. D'où $y = y_0-y_0\epsilon$. On repasse y sur y_0 et on fait «une maille de plus » jusqu'à ce que y finisse par passer en dessous de 0,5. On en déduit le temps nécessaire. Bien sûr le résultat dépend de la valeur ϵ choisie. Trop grande il n'y a pas de précision. Trop petite les calculs sont très longs. Alors on choisit comment ? On commence par une valeur de ϵ «pas trop bête» à partir du problème physique étudié. Ensuite on recommence le calcul en divisant ϵ par 2 (toujours la dichotomie) jusqu'à ce que le temps final soit le même à la précision souhaitée.

Résultats:

- $-\varepsilon = 0.1000 \rightarrow x = 0.6592$ en 7 itérations
- $-\varepsilon = 0.0500 \rightarrow x = 0.6760 \text{ en } 14 \text{ itérations.}$



Avec de la patience et des milliers de mailles on trouve x = 0,6931. En effet la méthode d'Euler converge très lentement. Mais rassurez-vous on trouvera mieux au XX^{ème} siècle.

1762 Lagrange invente la méthode des perturbations. Très souvent, en physique, il existe une configuration particulière dont la solution théorique est simple et parfaitement connue. Exemples :

- le triangle équilatéral possède une symétrie telle que tous les points intéressants [5] se trouvent au même endroit.
- autour d'une planète il existe une orbite simple qui est circulaire et parcourue à vitesse constante.
- une planète sphérique attire comme si toute sa masse était ponctuelle et concentrée au centre.

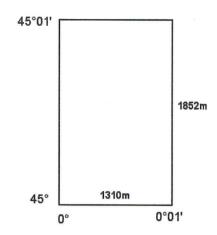
L'idée de Lagrange est alors de bouger un peu les valeurs et de voir ce qui change. On généralise l'idée de Raphson-Newton. On introduit une variation ϵ et on néglige son carré qui est petit. Le problème devient linéaire et on sait assez facilement le résoudre.

On voit ainsi que l'orbite circulaire à vitesse constante devient une ellipse à vitesse variable, on retrouve la loi de Képler $T^2 = R^3$. La Terre n'étant pas une sphère parfaite à cause de son bourrelet équatorial on découvre la dérive du périgée des satellites. C'est souvent une bonne façon théorique de dégrossir un problème avant de l'attaquer avec des ordinateurs, ce que Lagrange ne pouvait pas faire.

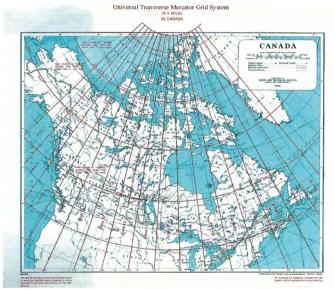
1790 Jacquard a l'idée de piloter les métiers à tisser par des cartes perforées, ce qui lui cause bien des ennuis avec les ouvriers soyeux lyonnais de la Croix-Rousse.

. 1795 Le 07/04/1795 le système métrique est adopté en France. Finis les toises, pieds, pouces, lignes, coudées, lieues (1h de marche à pied). Cependant la marine résiste toujours avec l'encablure qui vaut 120 brasses soit 200 m environ.

Quant au mile marin ou mile nautique, ou tout simplement «nautique» il est fixé à 1.852 m. Pourquoi ? Parce qu'il correspond à 1 minute d'angle en latitude et que toutes les cartes marines sont quadrillées en degrés. Cela n'est donc pas près de changer. Pour la longitude c'est un peu plus compliqué. Comme le rayon d'un parallèle décroît de l'équateur au pôle, où il est nul, 1 minute d'angle en longitude correspond à 1.852 m x cos(latitude), ce qui ne fait que 1.310 m à la latitude de 45°.



Une carte marine n'est donc pas vraiment quadrillée par des carrés, mais «rectangularisée» par des rectangles. C'est la raison pour laquelle l'armée américaine a mis au point le «quadrillage kilométrique UTM» qui, lui, est bien carré. Il apparaît en bleu sur les cartes IGN au 1/25.000 (série bleue) estampillées «GPS» en orange. C'est très pratique en randonnée.

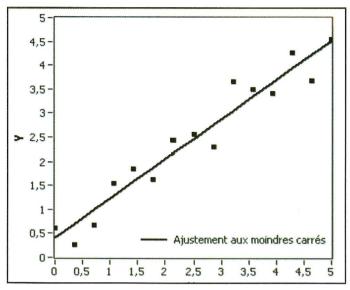


Dernière anecdote sur le système métrique. La NASA ayant sous-traité des pièces à la fois en Europe et aux USA, a un jour perdu une sonde spatiale très chère, car les uns travaillaient en SI (Système International) et les autres en unités américaines. On a donc poussé le moteur trop loin et la sonde est partie définitivement dans le cosmos. Depuis cet incident la NASA ne travaille plus qu'en SI.

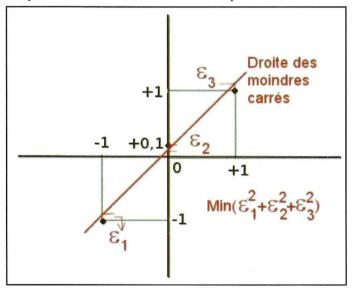
19ème siècle

1805 Le 04/02/1805 le préfet Frochot, dont le nom n'a pas été retenu par l'Histoire, impose la numérotation des rues de Paris, paire à droite, impaire à gauche en partant de la Seine ou en suivant son cours. A Tokyo il n'y a toujours pas de numérotation des rues, ce qui impose de se renseigner auprès des habitants du quartier... qui parlent rarement anglais. Bonne chance! Ou alors prenez un GPS!

1821 Gauss, «le prince des mathématiciens» a laissé son nom à des dizaines de formules, mais voici celle qui m'intéresse le plus pour cet article. Il a inventé la «méthode des moindrescarrés». Une sacrée idée! Gauss a travaillé sur la géodésie et l'astronomie. Dans ces deux disciplines on mesure un grand nombre de points, tous perturbés par des erreurs, et on cherche à y faire passer la «meilleure droite possible».



Avant lui on traçait «à main levée» une droite plausible. Cela manquait sérieusement de rigueur quant à la valeur exacte des paramètres. Son idée consiste alors à calculer, pour chaque point, l'écart entre la droite et le point de mesure. Les écarts en plus ou en moins étant tout aussi gênants, il élève l'écart au carré pour en éliminer le signe. Ensuite il somme ces écarts sur tous les points et il cherche les deux paramètres de la droite qui minimise cette somme. Ces paramètres sont uniques et assez faciles à calculer. Exemple:



- -A = (-1;-1)
- -B = (0;0,1)
- -C = (1;1)

La droite a pour équation y = ax+b. On cherche donc les meilleures valeurs pour «a» et «b».

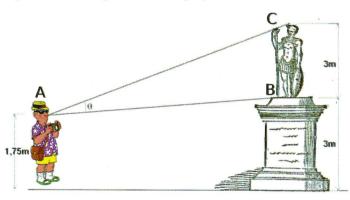
Ecarts = (-a+b+1; b-0,1; a+b-1), d'où f = $2a^2-4a+3b^2$ 0,2b +2,01. Le minimum de f est atteint pour a=1 et b=3,33x10⁻². C'est net et sans bavure, il n'y a pas d'autres valeurs possibles.

La découverte de Neptune par Adams et Le Verrier n'aurait pas eu lieu sans cette méthode. La reconnaissance automatique du code postal manuscrit ou des images d'une caméra de surveillance relèvent aussi de cette technique.

Je ne peux pas quitter Gauss sans parler de son exploit à l'école primaire. Son instituteur souhaitant un peu de calme, il demanda aux élèves de calculer, sans faute, la somme des 100 premiers entiers. Qu'auriez-vous fait?

Tous les élèves, sauf Gauss, additionnent lentement 1+2+3+...+99+100. Gauss constate que si l'on écrit la somme à l'envers tous les couples de nombres donnent un résultat identique 1+100 = 2+99 = 3+98 = 101. Le double du résultat est donc 101x100. D'où le résultat = 5.050 obtenu en moins d'une minute. L'instituteur était ébahi.

1827 Hamilton met au point le calcul vectoriel. Le mot vecteur vient du latin «vehere» transporter qui a donné aussi véhicule, voiture, invective. Un vecteur possède non seulement une intensité mais aussi, et surtout, une direction. C'est exactement cela qui le différencie d'un simple nombre, que l'on dénomme alors «scalaire». On comprendra mieux sur un exemple: sur une carte météo on indique «vent d'ouest 100 km/h» et «température +5°». La vitesse du vent est donc un vecteur, alors que la température non. Les principaux vecteurs, en physique, sont : la position, la vitesse, l'accélération, la force, les champs : gravitationnel, électrique, magnétique... Les principaux scalaires sont : la masse, la température, la longueur, la surface, le volume...Grâce au calcul vectoriel on peut calculer facilement toutes les longueurs et tous les angles que l'on veut. C'est un complément indispensable à la géométrie analytique de Descartes. Exemple amusant illustrant la puissance de la géométrie analytique alliée aux vecteurs:



Quel est le meilleur point de vue pour admirer une statue sur piédestal? Trop loin l'angle est tout petit, trop près aussi! La solution réside dans le «produit scalaire» de 2 vecteurs qui va nous donner accès à la longueur des vecteurs et au cosinus de l'angle qu'ils forment, d'où ensuite à la valeur de l'angle.

Un mot de rappel sur le calcul du produit scalaire qui est, somme toute, très simple :

Soit les vecteurs $V_1(x_1,y_1)$ et $V_2(x_2,y_2)$. Le produit scalaire est tout simplement égal au nombre $x_1x_2+y_1y_2$.

On utilise alors la formule suivante :

P.S. $(V_1, V_2) = longueur(V_1) \times longueur(V_2) \times cos(angle)$ entre V₁ et V₂). Si on applique cette formule au même vecteur, sachant que cos(0)=1, on obtient

P.S. $(V,V) = [longueur(V)]^2$.

On dispose donc de tous les outils pour résoudre ce problème et on trouve X optimal = 2.3 m et angle maximum = 33° .

1833 Charles Babbage invente une machine purement mécanique, calculatrice universelle, pilotée par cartes perforées.

1847 George Boole invente une nouvelle algèbre qui ne traite que des seuls chiffres 0 et 1 de la base binaire. C'est le début des automates que l'on trouve un peu partout dans la vie moderne. Illustrons-la par 2 exemples simples :

- pour ouvrir un coffre-fort il faut la clé du directeur ET la

clé du comptable.

- pour baisser un PN [6] il faut un train arrivant à droite OU un train arrivant à gauche.

Attention, cette algèbre paraît simple, de prime abord, mais l'imbrication de nombreuses fonctions ET, OU devient vite inextricable. Sans l'algèbre de Boole les ordinateurs n'existeraient pas.

1851 Léon Foucault, inhumé au cimetière [7] de Montmartre, autodidacte, passe sa vie à faire des expériences dans sa cave. Il découvrira les courants induits dits «courants de Foucault», le gyroscope qui sert maintenant à piloter avions et fusées et est surtout connu pour son pendule de 67 m, suspendu au Panthéon, qui permet de «voir tourner la Terre».



1874 Oliver Heaviside, autodidacte, télégraphiste de profession va révolutionner le calcul des automatismes avec une idée, en apparence folle, qui consiste à remplacer, dans les équations d'un mouvement, la vitesse du phénomène par le déplacement, affublé d'un coefficient de proportionnalité «p». L'équation différentielle, difficile, se transforme alors en une «bête» équation algébrique, facile à résoudre et il tombe sur une fonction de «p» qu'il va arriver à transformer en une fonction de «t» qui correspond, effectivement, au mouvement cherché. Cela ressemble à de la magie et ça ne va pas plaire du tout aux scientifiques officiels de l'académie royale de Londres qui se pâment en s'arrachant les cheveux. On trouvera plus tard une explication théorique légitime à cette méthode, dont Laplace est un précurseur, sous le nom de «calcul opérationnel» ou «transformation de Carson / Laplace». Pas de régulateurs ni d'automatismes industriels sans cette invention.

1875 Constantin Edouardovitch Tsiolkovski, autodidacte, paysan sibérien, se forme aux maths et à la physique à la bibliothèque de son «bled perdu» entre 2 traites de ses vaches. Il va démontrer, par le calcul, la faisabilité d'un satellite artificiel de la Terre, propulsé par une fusée. Sans lui Youri Gagarine n'aurait pas été le premier homme dans l'espace.

1884 Le développement des chemins de fer démontre qu'on ne peut plus continuer à voir midi à sa fenêtre. En effet, jusqu'alors, chaque ville fixait l'heure en fonction du Soleil et donc de sa longitude. Il était impossible d'établir des horaires de trains avec un changement continu de l'origine du temps. La conférence de Washington prend alors 3 décisions majeures :

- le méridien origine international sera celui de Greenwich, de nombreuses cartes marines étant anglaises

- le monde est divisé en 24 fuseaux horaires, l'heure de Greenwich étant appelé TU (Temps Universel) ou UT (Universal Time). Actuellement la France est en TU+1 l'hiver et TU+2 l'été. Les astronomes connaissent bien ce problème car les programmes de calcul de la position des astres sont toujours en TU. A eux de faire la conversion suivant l'endroit où ils vivent.

En Europe il y a 3 temps différents :

- Royaume-Uni = TU+0

- France, Allemagne, Autriche, Hongrie = TU+1

- Roumanie = TU+2

Et +1 en été.

- le système métrique est adopté sous le nom de SI

(Système International), du moins en théorie.

La mesure du temps est ce que l'on fait de plus précis en métrologie 1as = 1 atto-seconde = 10⁻¹⁸s. Après les horloges mécaniques sont venues les horloges à quartz puis les horloges atomiques. Ce fut un grand bouleversement. Pas de GPS sans horloges atomiques. Ensuite on s'est rendu compte que la Terre ne tournait pas si rond que ça. Il a fallu abandonner la définition de la seconde astronomique pour passer à une définition physique. Nous vivons maintenant avec un TAI (Temps Atomique International), très régulier, moyenne de centaines d'horloges atomiques disséminées à travers le monde, sans aucun rapport avec la rotation terrestre. Et un UTC (Universal Time Coordinated) qui s'écoule en synchronisme avec le TAI, mais qui saute parfois des secondes pour rester aussi synchrone avec la Terre. Enfin, depuis Einstein, on sait que le temps dépend de la vitesse et de la gravité, ce qui a été vérifié par le système GPS. Les horloges embarquées sur les satellites ne tournent pas en synchronisme avec celles sur Terre : elles vont plus vite et subissent une gravité plus faible.

1886 Le 10/05/1886 la conférence de Berne fixe l'écartement normal des rails, en alignement, à 1,435 m. Cela correspond à l'essieu des diligences anglaises. Eh oui! le chemin de fer est né en Angleterre et c'est pourquoi nos trains roulent à gauche... sauf en Alsace-Lorraine où ils roulent à droite, comme en Allemagne, car, à la construction, ces 2 régions étaient allemandes. L'histoire et la géographie sont, décidément, intimement liées.

1889 Le 31/03/1889 c'est l'inauguration de la tour Eiffel. Gustave Eiffel est un centralien des premières promotions de l'école, bien connu, en Auvergne, pour le viaduc de Garabit. Le devis était de 8 millions de francs et le coût final de 7.799.401,31F). Les ancêtres allemands d'Eiffel s'appelaient Bönighausen et ils ont changé de nom en devenant français.

Bien avant l'arrivée des ordinateurs on savait construire des chefs d'œuvre : les pyramides, le pont du Gard, la muraille de Chine, les châteaux forts, les cathédrales, le canal de Suez... Alors a-t-on vraiment besoin de ces ordinateurs ? Pour les constructions en dur, non, la preuve, mais pour la mécanique des fluides, ça se corse. Avant les ordinateurs on fabriquait des maquettes à échelle réduite, ce qui était cher et peu évolutif. Maintenant on fait une simulation numérique que l'on compare aux essais en soufflerie. Et ça marche. L'A380 doit voler, d'après les lois de l'aérodynamique, et il vole, en effet. Le hanneton ne peut pas voler, paraît-il, d'après ces mêmes lois. Qu'à cela ne tienne, on a fait disparaître les hannetons!

1895 Runge et Kutta mettent au point une amélioration radicale de la méthode d'Euler pour le calcul approché des équations différentielles. Si vous divisez le pas de temps par 2 vous divisez l'erreur de calcul par 2 avec la méthode d'Euler et par 16 avec la méthode de Runge-Kutta (pour les détails cf. internet RK2, RK3 et RK4, la plus connue et la plus utilisée). En plus elle est facile à comprendre et à programmer. Que demander de plus ?

La solution du «grand saut» (cf. Partie1) est alors la suivante :

- sans air, temps de chute 1,5 minute, vitesse au sol mach 3
- avec résistance de l'air, temps de chute 4,5 minutes, vitesse maximale mach 1, atteinte à mi-parcours.

20^{ème} siècle

La grande nouveauté de ce siècle va être l'arrivée des calculateurs électroniques, sans aucune pièce mobile et donc doués d'une rapidité de calcul jusque là impensable, sans usure ni entretien. Le règne de la belle mécanique omnipotente est révolu.

On va alors reprendre l'idée de Leibniz et la généraliser. Il a pu remplacer une courbe continue par une succession de segments de droite. Eh bien on va remplacer une surface par un dallage de carrés et un volume par un empilement de cubes. Et ça va marcher, sauf que 10 segments de droite font 100 carrés et 1000 cubes. On se retrouve donc très vite avec des millions d'«atomes numériques» à calculer, ce qui nécessite de grosses machines. Exemples :

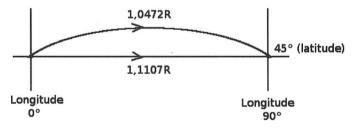
- Etude d'un pneu
- Modélisation du climat de la planète entière
- Etude d'un réacteur de fission nucléaire.

Le passage du continu au discret est omniprésent en physique : un viaduc ne repose que sur quelques piles, un câble n'est soutenu que par quelques pylônes, une frontière n'est matérialisée que par quelques bornes, un terrain est cadastré de même, un grillage n'est tenu que par quelques piquets. Comment fait-on entre chaque point d'appui ? On se débrouille au mieux en interpolant au plus simple et ça suffit largement.

Comment optimiser plusieurs variables en même temps? Je vous recommande la méthode de Nelder et Méad, très difficile à trouver, même dans les livres spécialisés (cf. internet). L'idée est la suivante : Un «insecte numérique» pose ses pattes à différents endroits du domaine à explorer et les déplace, intelligemment, en fonction de la valeur de la fonction sous chaque patte. En progressant ainsi l'insecte finit par se retrouver au-dessus du minimum cherché.

Voici quelques exemples d'optimisation qui mettent en œuvre cette technique.

Le problème de Lindberg



Comment relier les 2 points :

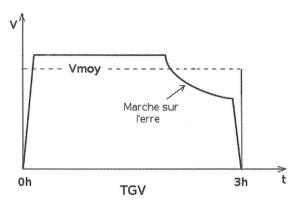
- Latitude = 45° Longitude = 0°
- Latitude = 45° Longitude = 90°

au plus court?

La route ouest / est se fait sur un cercle de rayon $\cos(45^\circ)$ = 0,7071 pendant un quart de tour, soit $\pi/2$ radians. Résultat L = 0,7071 x 1,5708 = 1,1107 rayon terrestre. Peut-on faire mieux ? Plaçons un point intermédiaire Latitude = 45° + x , Longitude = 45° . Si x est négatif on descend vers le Sud en direction de l'équateur et la distance augmente. Si x est positif on monte vers le pôle Nord et la distance diminue jusqu'à un minimum de L = 1,0635 atteint pour x = 9,51°. On a remplacé une route à « 2 points 1 segment » par une route à «3 points 2 segments» qui est plus courte. On a optimisé notre problème. On peut continuer par dichotomie et chercher la meilleure route en «5 points 4 segments», etc...Avec de la persévérance on trouve Lmin = 1,0472. Quelle est la route suivie entre 2 points successifs ? Cap constant, c'est la plus simple à suivre.

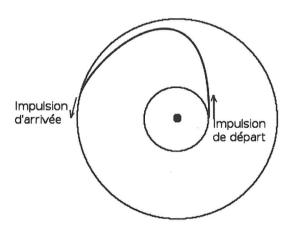
Dans la réalité on doit ensuite vérifier, sur une série de traversées pour éliminer les effets aléatoires, que ce calcul correspond bien à une économie car on a négligé les courants marins, les vents dominants, la non sphéricité de la Terre... C'est toujours pareil : douter d'un calcul tant qu'il n'a pas été validé par l'expérience!

Le problème du TGV



Comment relier Paris à Lyon en 3 heures en consommant le minimum d'électricité ? Résultat : vitesse légèrement supérieure à la moyenne, marche sur l'erre [8] vers la fin qui fait perdre du temps mais ne consomme rien. C'est plus économique que de rouler à vitesse constante. Souvent l'optimisation fait découvrir une solution inattendue, c'est ce qui est passionnant dans ce domaine du calcul.

Le problème de Hohmann



Comment passer d'une orbite circumterrestre à une autre plus éloignée en consommant le minimum de carburant ? Résultat : forte impulsion au départ pour monter, moteur coupé pendant tout le transfert, forte impulsion à l'arrivée pour ne pas retomber. Beaucoup plus économique qu'une poussée faible et continue.

Ces problèmes sont difficiles numériquement mais fondamentaux pour les projets concernés. La simulation numérique en est venue à bout.

1910 Srinivasa Ramanujan, autodidacte, est un mathématicien indien, le plus curieux des mathématiciens que l'on puisse imaginer. Né dans une famille pauvre, il apprend tout seul les maths grâce à la bibliothèque de sa ville. Il envoie alors à Hardy, un mathématicien anglais connu à l'époque, un calepin bourré de formules plus extraordinaires les unes que les autres, sans aucune démonstration. Hardy le prend sous son aile et le fait venir à Londres. On continue, actuellement, à chercher si toutes ces formules sont justes ou si certaines sont fausses.

Parmi ses notes se trouvent des formules très convergentes pour calculer π avec un grand nombre de décimales. Petite anecdote à son sujet. Hardy arrive un jour chez son ami avec un taxi numéroté «1729» et dit à Ramanujan que ce nombre n'a rien d'extraordinaire. Bien au contraire répond celui-ci c'est le plus petit nombre qui s'écrit de 2 manières différentes comme la somme de 2 cubes : $1^3 + 12^3$ et $9^3 + 10^3$.

1946 L'ENIAC, premier ordinateur électronique, est mis en service en Pennsylvanie II fonctionne avec des milliers de lampes, consomme l'électricité d'une petite ville et pèse 10 tonnes. Durant la guerre les premières machines ont permis aux Anglais de décrypter la «machine ENIGMA» de codage des Allemands. C'est le début d'une nouvelle discipline : la «recherche opérationnelle» dont le but est d'optimiser les convois américains dans l'Atlantique mais qui va se diversifier dans tous les domaines de l'économie. La caractéristique de cette discipline est de se heurter à l'«explosion factorielle», c'est-à-dire qu'il est impossible d'étudier tous les cas possibles. Il a donc fallu trouver des parades. En voici deux :

- la méthode heuristique consiste à adopter une «stratégie de bon sens paysan» et à vérifier si elle donne de bons résultats. On peut mettre en concurrence plusieurs heuristiques sur des calculateurs parallèles, arrêter les calculs au bout d'un temps donné et comparer les résultats trouvés. Souvent ce n'est pas la même heuristique qui gagne. Sinon ce serait trop simple! Autant vous dire qu'on est là dans le domaine de la recherche numérique, on avance à tâtons en «terra incognita».

- la méthode de «Monte-Carlo» qui exploite la possibilité qu'ont les ordinateurs, de sortir des nombres au hasard. Quand on ne sait pas trop quoi choisir, le plus simple et le plus efficace est de tirer ça «à la courte paille». C'est «l'intelligence collective de la fourmilière». On répète ça des milliers de fois et on trouve une solution «honnête» au problème qui n'est pratiquement jamais «le top du top», mais qui convient très bien dans le temps de calcul imparti. S'il est 22h jour J et que vous devez donner le plan de tournée à vos livreurs à 6h jour J+1, vous avez 8h de calcul devant vous pour trouver un plan pas trop bête, pas une minute de plus.

Ces deux techniques sont très différentes. Une heuristique n'est pas aléatoire. Elle donnera le même résultat à chaque calcul ce qui est, en général, bien apprécié des utilisateurs. Imaginez votre tête si, en demandant à la SNCF ou à votre GPS de voiture, comment aller de Clermont-Fd à Tarbes, on vous donnait des résultats différents. La méthode aléatoire, elle, ne redonnera jamais le même résultat, il faut s'y faire. Rien n'empêche de partir d'une solution heuristique et de la «retouiller au hasard» en espérant l'améliorer. En général ça marche car une heuristique ne donne jamais la valeur optimale, sinon çà s'appellerait...une méthode exacte de résolution du problème et ça vaudrait de l'or!

Exemple maritime:

Comment charger 16.000 conteneurs et desservir plusieurs escales autour du monde, avec un bateau qui flotte et sans gîte ? Nombre de cas possibles de positionnement des boîtes = 16.000 ! = 1060.320. Oubliez l'étude exhaustive !

Une bonne heuristique doit descendre le centre de gravité au plus bas et limiter le déséquilibre bâbord / tribord. On peut proposer de classer les boîtes par poids décroissant et de les ranger en remontant depuis le fond de cale en «boustrophé-

don», comme si on étalait du miel sur une tartine. Ensuite prendre en compte les contraintes commerciales en évitant d'«enterrer à fond de cale» les boîtes qui sortent au prochain port. Un beau problème de «recherche opérationnelle» n'estce pas ?

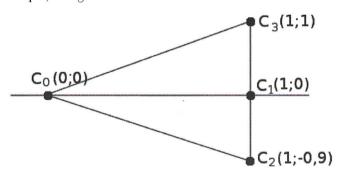
Il y a pleins de sujets passionnants de ce type :

- ordre d'usinage de pièces différentes sur plusieurs machinesoutils en temps minimum
 - découpe de tôles ou de tissus avec un minimum de chutes
 - transports depuis x usines vers y clients au coût minimum
- emplois du temps d'un lycée, en tenant compte du caractère des professeurs
- roulements de trains ou d'avions, en tenant compte de la réglementation complexe du personnel
- tournées de facteurs en minimisant les km tout en passant dans chaque rue
- tournée du voyageur de commerce en minimisant les km tout en voyant chaque client
- remplissage d'un sac à dos en maximisant les calories alimentaires avec un poids et un volume maxima imposés.

En fait, durant le 20ème siècle on a assisté à une vaste entreprise d'optimisation par ordinateurs.

Je vais insister un peu sur le problème du voyageur de commerce qui est intéressant car difficile. Votre stratégie heuristique simple est la suivante :

Lorsque vous êtes arrivés chez le client C_0 , vous éliminez les clients déjà vus et, parmi ceux qui restent à visiter C_1 , C_2 , ..., C_n , vous choisissez systématiquement le plus proche. Non seulement ça paraît logique, simple à calculer, mais en plus vous avez l'impression d'avoir trouvé LA SOLUTION du problème et vous allez, de ce pas, la faire breveter. Las, contre exemple, cf. fig. ci-dessous!



Votre heuristique va vous donner le trajet C_0 , C_1 , C_2 , C_3 en repassant par C_1 alors qu'il est plus court de faire C_0 , C_2 , C_1 , C_3 , C_0 . Quod erat demonstrandum!

On peut alors affiner l'heuristique. Au lieu de choisir systématiquement le plus proche, vous pouvez retenir les 2 plus proches et prendre tantôt l'un tantôt l'autre...au hasard. Votre heuristique étant devenue aléatoire il faudra la recalculer plusieurs fois de suite et ne garder que la meilleure des réponses. Vous voyez il y a encore beaucoup de choses à découvrir pour résoudre efficacement ce type de problème. Ah, j'allais oublier un test : si vous voyez un croisement de routes c'est que la solution n'est sûrement pas optimale. Et bien voilà, au moins, un exemple de ce que sait faire le cerveau humain en 1/10ème de seconde et que les ordinateurs peinent à imiter. Autre exemple : reconnaître un visage dans la foule. Les neurones travaillent en parallèle, ce que les ordinateurs commencent, seulement, à savoir faire.

1950 les calculateurs numériques sont encore trop lents pour gérer des systèmes en temps réel, comme des fusées. On invente alors des «calculateurs analogiques» qui traduisent, dans un environnement électrique, les problèmes réels. Il ne reste plus qu'à mesurer les tensions et courants électriques, ce qui est assez facile, pour en déduire ce qui se passe dans le problème réel. A la même époque les ordinateurs apprennent à gérer les lettres, grâce au code ASCII qui comporte 256 caractères différents. C'est le début de l'informatique de gestion, des innombrables fichiers et de nos gros ennuis avec «big brother»!

1953 la fréquence du la3 du diapason est fixée à 440Hz et c'est la note entendue en décrochant un téléphone filaire.

1972 L'arrivée de la HP41, première calculatrice programmable qui enchaîne les calculs sans intervention extérieure. Cette machine a la particularité de ne pas savoir gérer les parenthèses de priorité des opérations [9]. Sa logique est la «notation polonaise inverse». Au lieu d'écrire 2 + 3, il faut écrire 2 3 +. Autrement dit il faut lui donner, d'abord, les 2 nombres avant d'appliquer l'opération. Quand on connaît les bévues de nos étudiants avec l'utilisation des parenthèses, on se demande pourquoi ce système a été abandonné.

Exemple pour vous faire la main : - (a+b) / (c+d) avec parenthèses - a b + c d + / sans parenthèses.

Les calculettes modernes gèrent des nombres de 14 chiffres Avez-vous une petite idée de ce que cela représente ? La distance Terre / Soleil est d'environ 150.000.000,000.00 km. Comptons les chiffres significatifs : 123.456.789,012.34 km soit une erreur de 5mm !

1995 Simon Plouffe calcule n'importe quelle décimale de π , en binaire, sans avoir à connaître les précédentes.

21ème siècle:

2000 Le 01/01/2000 le grand «bug» informatique, redouté à la SNCF comme ailleurs, mais surtout dans les systèmes de gestion de la sécurité des trains, m'a fait passer une nuit blanche au PC [10] de Clermont-Fd qui surveille 5 départe-

ments (Auvergne + Nièvre).

Il ne s'est rien passé d'anormal et tant mieux. Il faut dire que, lors des débuts de l'informatique, dans les années 1950, les mémoires étaient petites et donc les dates étaient codifiées sur 6 caractères. Exemple : 10 juin 1952 = 520610 [11]. Le lendemain du 31 décembre 1999 est donc le 01 janvier 2000, ce qui donne 991231 puis 000101. Autrement dit la même chose que le 01 janvier 1900 ! Cela aurait pu faire des dégâts dans la logique des programmes. Il a donc fallu recenser toutes les zones de dates de tous les fichiers du monde et les passer à 4 chiffres pour l'année. Attention alors au 31 décembre 9999 ! C'est loin, ils se débrouilleront sans nous.

Je veux bien admettre que cette date pouvait être potentiellement dangereuse pour une raison de technique informatique tout à fait réelle. Pour le reste les dates en «nombres ronds» me semblent du «pipeau» complet car cela suppose que ce soit notre calendrier qui serve de référence universelle. Or on en

est loin:

- les orthodoxes sont encore au calendrier Julien

- les musulmans comptent à partir de Mahomet

- le nouvel an chinois ou vietnamien ne coïncide pas avec le nôtre

- au Japon on repart à zéro avec un nouvel empereur. Vous trouvez ça curieux ?

- c'est ce qu'a fait la révolution française «an I », mais cela

n'a pas duré

- les astronomes comptent en « jours juliens » [12] car, ainsi, on peut déterminer facilement, par une simple soustraction, l'écart entre 2 dates, sans se demander si les mois ont 28, 29, 30 ou 31 jours et les années 365 ou 366 et en se moquant complètement de la réforme grégorienne. Exemple : combien de jours entre le 10 juin 1952 et le 13 février 2013 ? :

-10/06/1952 à 0h = 2.434.173,5JJ

-13/02/2013 à 0h = 2.456.336,5JJ

- différence = 22.163,0 jours très exactement.

J'aime bien fêter l'anniversaire des gens en jours juliens, ça impressionne toujours!

Revenons sur la réforme grégorienne et à la nuit du jeudi 04/10/1582 (calendrier julien) au vendredi 15/10/1582 (calendrier grégorien), nuit du décès de sainte Thérèse d'Avila :

-04/10/1582 à 0h = 2.299.159.5JJ

- 15/10/1582 à 0h = 2.299.160,5JJ. Donc aucune discontinuité des jours juliens !

Le contraire des « nombres ronds » se trouve à la SNCF, où le train de nuit Paris / Savoie partait à 23h59, et en marketing où on pense qu'un prix de 99,99 euros est bien plus tentant que 100,00 euros.

2000 Je découvre, avec la TI 92, une machine qui sait gérer des variables symboliques sans valeur affectée. Le calcul numérique se rapproche alors des maths théoriques (cf. les logiciels «mathematica» ou «mathlab»), ce qui ouvre des perspectives étonnantes. Exemple :

- ancien système. J'affecte «1» dans «a» qui contient donc... «1», bravo!. J'affecte «1-a» dans «b» qui contient alors

«0». Je change a et b…ne change pas.

- nouveau système. Je n'affecte rien dans «a» qui ne contient donc... rien, la lettre a» s'affiche seule, indiquant ainsi qu'aucune valeur numérique ne lui est affectée. J'affecte «1-a» dans «b» qui contient alors «1-a» quelle que soit, ensuite la valeur affectée à «a». Dès que je change «a», «b» suit avec «1-a». Cela permet de gérer, par ordinateur, des relations symboliques, sans préjuger des valeurs finalement affectées. Un petit miracle dans le «Landerneau informatique». Quand on a essayé ce type de machine, on ne peut plus s'en passer. On parvient alors à gérer des formules algébriques lourdes, impossibles à maîtriser à la main.

2013 On sait faire fonctionner des super calculateurs «classiques» à 21.000 processeurs dont la puissance de calcul se compte en «Pétaflops», «Péta» pour 1015 du SI (Système International) et «flops» pour «floating point operations», en français «opérations en virgule flottante», c'est-à-dire en notation scientifique (cf. les logarithmes» de Néper et Briggs). Le plus gros problème consiste à évacuer la chaleur produite inutilement, grâce à des canaux d'eau froide. Leur utilité ? Les problèmes «gourmands» : essais nucléaires simulés, météo, étude du climat, cryptographie, suivi des orbites des milliers de débris qui tournent autour de la Terre et dont on ne sait, actuellement, comment se débarrasser, statistiques sur les décimales de π pour v déceler une quelconque régularité, etc. On sait aussi fédérer, y compris «à l'insu de son plein gré», des millions d'ordinateurs personnels, à travers «internet», chacun s'occupant d'un petit bout du problème. Problème type ? Ecoute des émissions extra terrestres pour savoir si nous sommes seuls au monde. J'en profite pour vous dire un mot de la conjecture de Syracuse (USA) qui a été testée jusqu'à $N = 3x10^{16}$. Prenez un nombre entier N. S'il est pair divisez le par 2. S'il est impair multipliez le par 3 puis ajoutez 1. D'après cette conjecture vous finirez toujours par arriver à 1, quel que soit le nombre N de départ, mais ça peut être long. C'est évident si vous partez d'une puissance de 2 : 2, 4, 8, 16...qui reste toujours paire et done finit à 1.

2014 et au-delà. On voit 3 pistes à suivre :

- réduire la micro électronique jusqu'à atteindre la taille d'un seul atome
- passer à l'ordinateur quantique, en dessous de la taille atomique, avec des effets très différents
- passer à l'ordinateur biologique, se comportant comme une colonie de fourmis à l'intelligence collective, sans cerveau centralisé, ou créer des «neurones électroniques» interconnectés par milliards. On entre alors dans l'entomologie au service du calcul.

Conclusion:

Le calcul numérique sans outil a toujours été considéré comme un pensum. Tout est dans l'outil, c'est ce que j'ai essayé d'illustrer dans cet article. Mais il y a 2 voies complémentaires pour progresser en informatique :

- le «hard», le matériel, toujours plus petit, plus rapide et

moins cher

- mais aussi, et peut-être surtout, le «soft», le logiciel, plus astucieux pour contourner «l'explosion factorielle». Tous les problèmes peuvent-ils être contournés par des méthodes astucieuses ? On n'en sait rien pour l'instant. C'est une des questions clé de l'analyse numérique.

Annexe:

L'infini en calcul numérique.

«L'éternité c'est long, surtout vers la fin»

Pierre Dac

L'inverse d'un nombre.

L'inverse d'un nombre «X» est le nombre qui, multiplié par «X», donne «1». Exemple :

 $0.5 \times 2 = 1$ donc 0.5 est l'inverse de 2 et 2 est l'inverse de 0.5.

«0» a-t-il un inverse ? Réponse : NON !

Le problème de «0» c'est que c'est un élément «absorbant pour la multiplication», c'est-à-dire que tout nombre multiplié par «0» donne «0». Il n'y a donc aucun nombre qui multiplié par «0» donne «1» et, donc, «0» n'a pas d'inverse. C'est ce qu'on essaye d'inculquer aux étudiants. Si vous tapez «1/0» sur une calculette elle va répondre «erreur» ou indéfini».

Tous les autres nombres ont un inverse. Seul «0» va nous

causer des ennuis.

Bon alors regardons ce qui se passe quand on se rapproche de «0». Il existe dans une calculette un plus petit nombre positif qui s'appelle ϵ et qui vaut 10^{-999} sur la TI92. Si vous tapez 10^{-1000} elle répond «0», ce qui est mathématiquement faux. Attention ! une calculette peut vous donner le «coup de pied de l'âne» dans certaines situations limites, à vous de ne pas y mettre les pieds. L'inverse de « ϵ » est donc 10^{+999} . Il n'y a pas de nombre supérieur à cette valeur, en machine. Si vous tapez 10^{+1000} elle répond «inf» c'est-à-dire l'infini. D'autres machines vous répondraient «underflow» «en dessous du niveau de flottaison» ou «overflow» «au dessus du niveau de flottaison» et s'arrêteraient sur cette erreur de calcul, ce qui serait d'ailleurs moins vicieux, car plus visible.

L'infini est-il un nombre comme les autres ? Réponse : NON !, car il ne respecte pas les règles de calcul des autres nombres. Exemple : «inf» - «inf» n'est pas forcément égal à 0. Pourquoi ? Parce que sous le vocable « inf » se cachent, en fait, des nombres qui partent, certes à l'infini, mais pas à la même vitesse. Exemples de la forme «inf»-«inf» qui n'ont pas du tout la même valeur numérique :

- a = x² x. Le carré prédomine et «a» tend vers «+inf»
- $b = x x^2$. Le carré prédomine et «b» tend vers «-inf»
- -c = (x + y) x. Les 2 «inf» se neutralisent et le résultat est «y» un nombre qui peut être choisi comme on veut.

Il y a donc, en tout, 7 formes en «inf», vicieuses, car elles tirent «à hue et à dia», qu'il faut étudier avec méthode, la valeur dépendant de la vitesse de fuite vers 0 ou «inf» :

- «inf» «inf»
- 0 x «inf»
- «inf» / «inf»
- -0/0
- 1 «inf»
- « \inf »
- -0^{0}

une droite)

et 4 formes «sans problème», car elles tirent «dans le même sens» :

- $\sin f + \sin f = \sin f$
- $\sin x = \sin x = \sin x$
- -0 / « inf » = 0
- $\sin f \gg / 0 = \sin f \gg$

Vous voilà prévenus, on ne joue avec l'infini sans expérience. Conclusion :

- Tenter de diviser par «0» va systématiquement vous amener des ennuis. A vous de bien regarder ce qui va se passer car l'infini n'est pas loin. En général un cas particulier de votre problème s'y cache (droites sécantes qui deviennent parallèles, cercle de courbure nulle donc de rayon infini, donc ce cercle est en fait...

-«0» et l'infini sont tellement liés que si vous avez affaire avec

l'un c'est que l'autre n'est pas loin.

- La meilleure façon de voir ce qui se passe à l'infini pour «x» consiste à poser x = 1/y et à regarder ce qui se passe en «0» pour «y». Pourquoi ? Parce que «0» est un nombre «normal » qui peut donc apparaître comme solution d'une équation, alors que «inf» ne l'est pas et peut donc ne pas apparaître. En passant aux inverse vous ne cherchez plus une solution « inf » mais une solution «0» que vous allez trouver. Exemple :

Existe-t-il un nombre x tel que x = x + 1? Logiquement non, aucun nombre n'est égal à son suivant...sauf que c'est le cas de «inf» : «inf» +1 = «inf». «x» étant à gauche et à droite, je soustraie

de chaque côté et je me retrouve avec :

Existe-t-il un nombre x tel que 0 = 1? Réponse : non.

Passons aux inverses x = 1/y

Existe-t-il un nombre y tel que 1/y = 1/y + 1. Je multiplie par y et donc :

Existe-t-il un nombre y tel que 1 = 1 + y? Réponse : oui, c'est y = 0. Et donc x = 1/0 = x inf ».

- [1] Factorielle de 4, noté 4! est le produit des 4 premiers nombres entiers = 1x2x3x4 = 24. Le point d'exclamation sert à se rappeler que cette fonction « explose » rapidement. 9! = 362.880 est le nombre de façons de remplir un carré 3x3 par 9 nombres distincts.
- [2] Une conjecture est une affirmation mathématique qui n'est pas démontrée. Evidemment n'importe quel « âne » peut faire une conjecture, mais une bonne conjecture tient des siècles, malgré les efforts de tous les grands mathématiciens du monde.
- [3] Un nombre premier ne peut pas être décomposé en un produit d'autres nombres entiers. Exemple : 6 n'est pas premier car 6 = 2x3, alors que 5 ou 7 le sont.
- [4] Des nombres premiers jumeaux diffèrent de 2. Exemple : 5 et 7 ou 11 et 13...
- [5] Le centre de gravité est l'intersection des médianes. L'orthocentre celui des hauteurs. Le centre du cercle circonscrit celui des médiatrices. Le centre du cercle inscrit celui des bissectrices, etc...Ce sont les plus connus, mais il existe des milliers de points caractéristiques dans un triangle : point de Nagel, de Gergonne, de Toricelli, etc.
 - [6] Passage à Niveau en argot SNCF.

[7] Du grec « koimétérion » lieu pour dormir, dortoir. Cf. en allemand « Friedhof » cour de la paix, de la tranquillité, du repos, du silence.

[8] Expression ferroviaire, du verbe errer, continuer sur sa lancée, moteur coupé, donc à consommation nulle. Facile à remarquer, dans un autorail, au départ d'une gare. Le conducteur lance un grand coup de moteur pour prendre la vitesse limite de 30km/h sur les aiguilles de sortie de la gare et le moteur retombe aussitôt au ralenti alors que l'autorail garde sa vitesse «sur l'erre». Facile a voir, aussi, sur un gros bateau qui va atterrir et qui coupe les moteurs 8 heures à l'avance et finit «sur l'erre» jusqu'au port. En voiture il est déconseillé de se mettre au point mort et, de toutes façons, on ne roulerait que sur 1km.

[9] Sans parenthèses les priorités sont :

- élévation à une puissance

- multiplication, division

- addition, soustraction.

Pour forcer une priorité il faut introduire des parenthèses. La notation polonaise inverse n'étant plus utilisée sur les calculettes actuelles, je conseille toujours à mes élèves d'encadrer le numérateur et le dénominateur par des parenthèses même si, parfois, ce n'est pas indispensable.

[10] Poste de Commandement. On dirait «dispatching» à EDF, «salle opérationnelle» à l'armée. Son rôle est de gérer les incidents les plus divers qui ne manquent pas de se produire à longueur d'année.

[11] Dans cet ordre afin que le tri sur la date soit logique : année, puis mois, puis jour.

[12] Rien à voir avec Jules César. Ce système a été inventé au moyen âge par un astronome dont le père s'appelait Jules. Après un long calcul ésotérique le jour 0 a été fixé, par lui, à une date qui était censée être celle de la création du monde, vers -4.712. En fait cela n'a aucune espèce d'importance et il ne faut surtout pas en changer, pour éviter toute discontinuité, plaie des autres systèmes de calendriers.

Les grandes étapes du calcul des décimales de π

VI^{ème} **siècle** en Inde π est estimé à 3,1416. En Chine à 355/113=3,1415929, la vraie valeur étant 3,1415926

1593 Adriaen von Rooman calcule 15 décimales

1609 Ludolph von Ceulen calcule 34 décimales

1706 John Machin calcule 100 décimales

1844 on connaît π avec 200 décimales

1853 on connaît π avec 400 décimales

1948 Ferguson et Wrench calculent 800 décimales

1949 l'ENIAC calcule 2000 décimales

1973 1 million de décimales

1989 1 milliard de décimales

1998 6 milliards de décimales

Un peu d'humour

La balance pifométrique

(mise au point par Michel Gendraud)

Dérivée depuis belle lurette du trébuchet de changeur, utilisée ici et là, cette balance a une portée qui va de la louche au quart de poil.. Livrée dans un étui adéquat, elle peut être mise en œuvre le moment venu.



La vue jointe à cette notice apporte un **max** de détails sur: 1) le **faible encombrement** de l'instrument, tenu par une

2) sa «p**ifométrisation**», sous le fléau, sur les plateaux, sur le couvercle de l'étui.

3) les accessoires disponibles, disposés dans l'étui, transformé pour la circonstance. De gauche à droite:

- Le pulvérisateur à **giclée**,

- les ciseaux à couper la **ribambelle** et obtenir le q**uart de poil**,

- le plumeau à **poussière**,

- La louche, qui assure aussi la lichette,

- le compte-goutte...pour la **goutte**,

- le pain de cire d'abeille, qui, passé sur la pointe du compte-goutte permet la **petite goutte**,

- la brosse à peindre, pour le **poil**,
- le marteau, pour ajuster la **pointe**,

Poignon nour la lamma

- l'oignon pour la larme.

N.B. Il existe un projet de balance pifométrique quantique mono-plateau visant le **pouième de poussière**. Jusque là, les essais n'ont pas permis de localiser le **pouième** en question. Est-il sur le plateau ou à plus d'une **trotte**?



Pouvoirs et mystères du cerveau

Article rédigé à la suite de la conférence donnée à l'Adasta par le

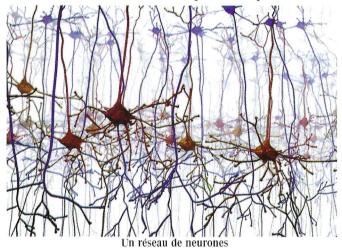
LE PROFESSEUR JEAN CHAZAL

"Doyen de la Faculté de Médecine et chef du Service de Neurochirurgie au CHU de Clermont-Ferrand

*(Conférence du 11 septembre 2013, rédaction par Elise ASPORD)

INTRODUCTION

Pour ceux qui n'auraient pas peur d'être étourdis ou qui prennent plaisir à plonger dans la fascination du vivant, bienvenue dans l'univers de l'infini ; de l'infiniment grand et de l'infiniment petit. C'est en effet, en tout premier lieu, une impression de vertige qui nous saisit à la vue des données relatives au cerveau humain. Ce dernier, organe unique, complexe, ne possède pas moins de 100 milliards de neurones, chacun étant relié, dans un immense réseau, à 10 000 de ses voisins¹. Au-delà des neurones, ce sont les circuits neuronaux, les interconnexions, qui sont importants.



Objet / sujet mystère, le cerveau questionne. Quelle en est sa nature ? Son fonctionnement ? Qu'est-ce qui fait que nous sommes un être conscient ? Qu'est-ce que l'inconscient ? Qu'est-ce qui conduit aux concepts, et donc à la Pensée (l'un et l'autre étant intimement liés)?

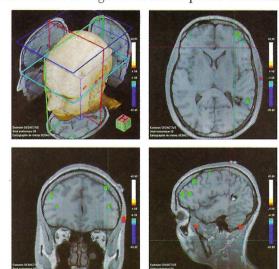
La neurochirurgie: 1975-2013

A travers les propos du Pr Chazal, nous avons la chance de suivre le parcours d'une génération de praticiens qui ont vécu un phénoménal bond technologique et culturel. Selon lui on est passé de l'âge de pierre (en 1975, avec des opérations « invasives » souvent risquées ou causant des dégâts plus ou moins irrémédiables), à l'âge moderne avec la microchirurgie, ou chirurgie assistée par ordinateur (appelée aussi neuro navigation) avec une précision du quart de millimètre (2013).

L'imagerie médicale a suivi des progrès similaires. Dans les années 70, on ne disposait que du scanner assez peu précis. Dix ans plus tard est apparue l'IRM statique (l'Imagerie par Résonance Magnétique) qui donne des coupes anatomiques aussi précises qu'au laboratoire d'anatomie. Avec la mise au point de l'IRM fonctionnelle, quelques années plus tard, on est capable de voir fonctionner le cerveau et d'observer en temps réel ce qui se passe, par exemple, quand on prononce un mot, ou lorsque l'on se remémore un souvenir... On voit alors telle

¹ La connaissance évoluant : dans les années 60, on parlait, pour l'humain, de 5 milliards de neurones, avec un rôle prépondérant de la cellule fonctionnelle.

ou telle zone s'éclairer. Cette intrusion dans l'intimité du cerveau est aujourd'hui poussée encore plus loin grâce à l'imagerie métabolique. Le principe en est simple: on marque des molécules (isotopes à courte durée de vie d'oxygène, de carbone) et avec le scanner on regarde les zones qui les consomment.



Repérage des zones actives au cours d'un test

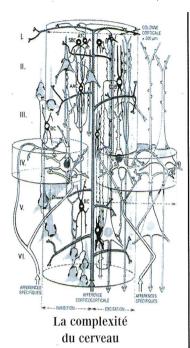
Caractéristiques morphologiques / fonctionnelles

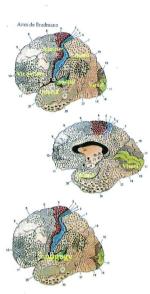
Bien que ne pesant que de 1200 à 1300 g (soit 2% du poids du corps), le cerveau consomme jusqu'à 25% de notre énergie. On distingue deux systèmes nerveux : celui qui permet la vie relationnelle avec les autres (mise en relation, lien entre celui qui parle et celui qui écoute...) ; avec l'environnement (le système de navigation relationnelle: marcher, monter un escalier...) et celui lié à la vie végétative ou viscérale². A ces deux catégories - qui totalisent 25% du fonctionnement du cerveau, le Pr Chazal en adjoint une troisième - à hauteur donc des 75% restant - celui de la vie intérieure, intellectuelle et psychique. C'est là que réside le mystère : ici pas de communication avec le monde extérieur, le cerveau est bouclé sur lui-même.

Comment ça marche? Le déroulé est le suivant. Le cerveau reçoit. Il analyse. Il interprète. Il stocke (travail de la mémoire). Il restitue. Il transmet. Il conceptualise. Il pense. C'est là que réside la complexité, le mystère, dans ce passage entre restitution / transmission et conceptualisation. Pour autant c'est tout cet ensemble qui est indispensable à l'apprentissage. Par un mécanisme qui nous est encore inconnu, toute expérience laisse une empreinte dans le circuit neuronal (même à notre insu). Toutes ces traces sont « rappelables » directement dans le champ de la conscience.

Pour une utilisation convenable de l'information sensitive, la réception est indispensable. Ainsi un sourd restera à jamais muet. On n'apprend à marcher que parce qu'on a un système sensitif.

² Le cœur a certes un système nerveux intrinsèque, autonome, mais tout ça est contrôlé par le cerveau. Le cœur ne bat que parce que le cerveau régule la fréquence cardiaque, de même pour le poumon, etc... Quand on est dans le coma, la commande fonctionnelle ne marche plus et on ne respire plus.





Les principales zones

 $\it La\ conscience$, c'est quoi ? C'est assez simple. C'est la conscience de soi, du milieu extérieur ; c'est relatif à soi-même et donc incontrôlable par une personne extérieure. Malgré des recherches avancées, on ne peut pénétrer dans la conscience de l'autre. La conscience c'est ce qui nous est propre. Elle siège dans le cortex (sorte de manteau cérébral) dont la surface est de $2,4~m^2$.

La mémoire : On distingue deux types de mémoires : celle à court terme (de travail. Elle est organisée, on mémorise, on restitue) ; et celle à long terme (celle qui donne naissance et ancre les souvenirs d'enfance, par exemple). Cette mémoire, une fois restituée, peut être plus ou moins exacte. Les traces ont été modifiées, à notre insu sous l'influence de l'environnement (Ce n'est pas un trouble de la mémoire). D'autres peuvent se réarranger, s'associer entre elles et conduire à des traces qui n'ont plus rien à voir avec les perceptions initiales. Cette déformation de nos souvenirs (faux témoignage : 10 témoins, 10 versions différentes) est produite par des systèmes dit «hors du champ de la conscience» (non rappelables, mal organisés, restitués de facon déformée). Quand on réactive un souvenir, la trace peut être modifiable. Le cerveau peut la renforcer (la reconsolidation), ou l'atténuer, voire la supprimer : c'est l'oubli. Il est admis aujourd'hui chez les neuropsychologues, neuroscientifiques, que l'oubli peut être une fonction active. Il n'y a pas de trouble de la mémoire. A partir de 50, 60 ans s'installe une mémoire affective (ou sélective) : on ne retient que ce qui nous intéresse.

L'inconscient: cette part d'ombre de notre cerveau est certainement une des énigmes médicales ultimes. Du point de vue des neurophysiologistes, il repose sur un support anatomique (neurones, substances chimiques). Cette définition va à l'encontre de celle donnée par Freud pour qui l'inconscient est immatériel, virtuel. Chacun a une réalité inconsciente qui lui est propre et qui est - comme la conscience - impénétrable. Elle serait à la base de notre vie psychique. En modulant, voire en parasitant le bon fonctionnement du cerveau, la nature permet (heureusement!) une non-uniformisation de la pensée et des comportements.

Parmi les actualités, celle du *concept d'Assemblée* de neurones. Au fin fond de notre cerveau, nous avons des assemblées

de neurones différentes (d'opinions différentes). C'est notre inconscient, là où se fixent ces traces, à notre insu, éventuellement modifiables. A la tête de chacune de ces assemblées, il y a un neurone chef qui dirige et qui peut changer d'avis, d'opinion; c'est-à-dire d'assemblée. On ne sait pas cependant pourquoi certaines prennent le pas sur d'autres. C'est peut-être l'expression, par la porte étroite de notre conscient, de cette réalité inconsciente. Ce n'est pas forcément celle que l'on voulait exprimer mais c'est celle qui vient malgré tout.

Plasticité: Ce réarrangement neuronal est possible grâce à l'une des données les plus spectaculaires du cerveau, celle qui lui est donnée de s'adapter en permanence (24 / 24): la plasticité neuronale. L'humain est en constante adaptation. Cette plasticité, caractéristique essentielle du cerveau, donne libre cours à l'imprévisibilité.

Prenons un exemple schématique. Un neurone visuel peut devenir tactile. C'est le cas pour les aveugles qui apprennent le braille. Les neurones visuels d'un voyant qui est soudainement atteint d'une cécité absolue changent de destination (il n'y a plus de neurones visuels). L'inverse est également vrai. Après opération, où la personne recouvre même partiellement une vue de synthèse, ils redeviennent visuels.

Idem concernant la greffe des mains, qui a très bien marché. Pour preuve, une IRM pratiquée avant l'intervention montrait une représentation des mains dans le cerveau très atrophiques. Le fait d'imaginer bouger les mains éclairait faiblement une petite lumière. Trois jours après la greffe, alors qu'elles n'étaient pas encore fonctionnelles, les zones sont devenues hypertrophiées.

Le dernier exemple est celui des taxis londoniens qui doivent (devaient) apprendre par cœur le labyrinthe de la capitale anglaise et auxquels on a fait passer des IRM dix ans auparavant. A l'époque, on relevait une hypertrophie de la partie postérieure de l'hypocampe (mémoire, concentration). Depuis avec l'arrivée du GPS elle est redevenue normale.

Histoire de la localisation : d'où vient la pensée ?

La production scientifique autour du cerveau - certes très intense aujourd'hui - est, en fait, ancienne. Pendant longtemps, l'homme de science a dû se dresser contre des barrières philosophiques, religieuses, sociales. Les premières dissections datent d'Alexandrie.

Le cœur : Le premier à avoir parlé «d'esprit de la pensée» est Aristote. A cette époque³ (de l'Antiquité au Moyen-Age), le siège de l'esprit, de la pensée se situait dans le cœur.

Le troisième œil (épiphyse): Vient ensuite Descartes, qui localise – assez justement - l'âme dans l'épiphyse. L'épiphyse c'est le troisième œil. Visible chez certains reptiles, certains oiseaux (au-dessus du crâne), il est photorécepteur (sensible à la lumière) et rythme le cycle circadien (cycle veille / sommeil). Chez l'Homme, ce troisième œil (enfoui dans le cerveau) a les mêmes origines biologiques que la rétine.

Il s'instaure alors un système photorégulateur. L'épiphyse régule (bloque) la mélatonine, l'hormone du sommeil. Un manque de soleil, de luminosité (comme dans nos latitudes) et les risques d'hypersomnie, de dépression... se multiplient du fait de cette non-stimulation de ce système. Plus qu'un mythe, qu'un symbole, le soleil est donc viscéralement indispensable à l'Homme.

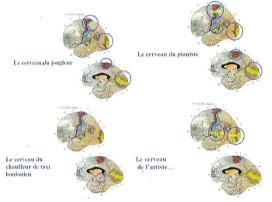
³ Malgré Avicenne (année 900), 1^{er} neurologue, dont les conclusions brillantes pour l'époque n'ont pas été suivies.

Les neurophysiologistes d'Harvard : Ils se situent à l'opposé de Descartes. Si l'activité réflexive est certes bien dans le cerveau - comme l'avait intuitivement trouvé le philosophe – en revanche, il n'y a pas, pour eux, de siège de la pensée. Une pensée organisée (ou même désorganisée⁴) se répartit dans l'ensemble du cerveau.

Le développement / l'architecture

Au stade de l'embryon, le cerveau est indifférencié, asexué. Mais il est Homme (au sens paléontologique). Dès le ventre de sa mère on est hominisé. On observe ainsi plus de différence entre certains hommes ou certaines femmes, qu'entre un homme et une femme⁵. On peut en déduire que la construction du cerveau est la conséquence d'un effet double entre la prédominance du génome et celle de l'expérience (des contraintes). Le neurone (qui n'est ni homme, ni femme ; ni sensitif, ni moteur ; ni olfaction, ni gustation, ni mémoire) va se construire en fonction de ce que le génome va lui dire⁶. Sur ce socle génétique commun intervient l'acquis, l'apprentissage. On observe alors une expression génétique sélective (telle fonction pour tel neurone) ; et une expression génétique variable non seulement en fonction des stimulations, mais également de l'environnement chimique pouvant contenir des perturbateurs exogènes, tels les pesticides, aux effets mutagènes.

Diversité: De fait, chaque cerveau est unique. Le cerveau du pianiste est différent de celui du jongleur, lui-même différent de celui du chauffeur de taxi ou du mathématicien ou du sportif de haut niveau⁷. De même à l'intérieur d'une même pratique, des subtilités apparaissent aussi. Le pianiste de jazz est différent du pianiste classique. Le fait que chacun se construise son propre cerveau, pourrait expliquer les guerres, les conflits (Il faut certaines identités de point de vue et de fabrication du cerveau pour arriver à s'entendre).



Certaines zones du cerveau se développent plus en fonction des activités Cette construction des réseaux est programmée génétiquement. De l'âge fœtal (fin de la période embryonnaire) à 11 ans, un programme - inscrit dans le génome - interconnecte les neurones à la fréquence de 10 millions / s. De façon politiquement incorrecte, il convient de souligner que nous n'avons pas tous le même génome. Malgré tout, le « handicap » de certains patrimoines peut tout à fait être compensé par l'apprentissage et l'acquisition. Les surdoués génétiques n'existent pas !

Jusqu'à présent, nous avons mis en place l'architecture : le neurone, les interconnexions neuronales, le programme génétique, l'acquis, les interconnexions grâce à l'acquis, à l'apprentissage... mais sans chimie le cerveau ne fonctionne pas.

La chimie du cerveau : le cerveau est un réseau. Un neurone, pour se connecter à un autre, passe par une prise (une synapse),

Exemple de pensée désorganisée : «avant de se concher on va penser à un thème mais très vite on pense à autre chos». Quel est le moteur de la pensée désorganisée ? On n'en sait pas grand-chose.
 On découvre aujourd'hui que certaines femmes ne sont pas XX (mais ont un petit chromosome V) et

qui ne marche que grâce à des neuromédiateurs. Aujourd'hui on en connaît une cinquantaine, le plus connu est l'acétylcholine. Celui dont on parle aujourd'hui c'est la dopamine. L'absence de dopamine entraîne le développement de la maladie de Parkinson. A l'inverse, elle renforce, chez ces mêmes malades, le phénomène d'addiction⁸ (au jeu, au sexe, avec des plaintes de certains patients).

Pour comprendre le fonctionnement cérébral, on utilise la pharmacologie. Elle a démontré son efficacité notamment chez les schizophrènes qui souffrent d'hallucinations. En revanche, ces médicaments n'ont aucun effet sur l'autisme, qui n'est pas une maladie psychiatrique mais bien organique (liée sans doute à une malformation des globes temporaux). Malgré certaines limites donc, les psychotropes sont utiles car ils permettent de comprendre quels sont les fonctionnements / disfonctionnements du cerveau.

Les campagnols du middle-west américain: Bien que de même espèce, ceux des plaines et ceux des montagnes ont des comportements sexuels très différents. Les premiers (de même phénotype que les femelles) sont monogames, les seconds (beaucoup plus costauds) polygames. Les expériences montrent qu'en supprimant les récepteurs à la vasopressine (neurohormone qui sert à la régulation de la pression artérielle, entre autres), les campagnols des plaines se révèlent volages.

De même, sans ocytocine (neurohormone très utile pour l'accouchement, qui sert aux contractions intra-utérines), la femelle (comme le mâle) abandonne, pour l'un, ses petits, pour l'autre, sa femelle (socialement en tout cas). Il faut toujours se méfier des transpositions faites à l'Homme, mais ceci a fait dire à ces neurobiologistes, de façon très démonstrative, que la vasopressine est la neurohormone de l'accouplement sexuel et que l'ocytocine (hormone de l'accouchement qui déclenche les contractions intra-utérines) dicte l'attachement social. De façon amusante (ou du moins les conclusions le sont), on a étudié dans la descendance de ces animaux le taux d'enfants adultérins. En principe il ne devrait pas y en avoir, or 30% le sont!

Il y a des zones de réception du réel. Je vois un chat. Action visuelle, l'image s'imprime de façon très précise dans le cortex occipital - de la vision -. «C'est un chat». Et bien le fait de voir un chat et la représentation imagée que l'on peut en avoir se situe dans la même zone du cerveau. De manière, certes simplifiée, on peut dire que les zones de l'imaginaire et du réel sont les mêmes. On ne peut en effet imaginer (en imagerie du cerveau) que ce qu'on a déjà vu.

Conclusion

Nous venons d'en saisir à peine quelques concepts, et ce monde reste captivant, fascinant. On a vu plusieurs niveaux qui s'interpénètrent (neurones, interconnexions, assemblée, chimie, plasticité...) ce qui ajoute à la complexité. Mais la complexité est le cœur même de cette discipline.

Peut-on comparer le cerveau à un ordinateur ? Certains disent que oui, d'autres que non. Ne serait-ce que sur le plan de la structure ou des connexions il ne peut y avoir de comparaison. Mais la réponse est encore plus simple : «notre cerveau n'a pas été construit à des fins précises». Il est le résultat d'une cascade d'évènements : l'évolution, la sélection, l'expérience, l'influence de l'environnement. Un ordinateur ne pense pas et surtout il a été construit à des fins précises implicites ou explicites.

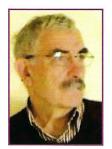
Nous avons une réserve de neurones. Pour autant, si on ne les utilise pas, on assiste alors à leur suicide. «Le cerveau ne s'use que si l'on ne s'en sert pas», alors amis de l'Adasta faites travailler vos méninges...

⁵ On découvre aujourd'hui que certaines femmes ne sont pas XX (mais ont un petit chromosome Y) et qu'inversement, certains hommes (XY) ont plusieurs chromosomes X. «Où est la norme?». Deux hommes, deux femmes ont des différences génomiques plus importantes qu'entre homme et femme. D'où une réflexion à la fois scientifique et philosophique.

⁶ Ainsi, en théorie, à ce stade-là, il serait possible de faire changer le cours des choses (ce qui peut s'accomplir, par la suite, tout au cours de la vie). Un neurone visuel peut devenir tactile.

⁷Chez le jongleur, la sollicitation est visuelle et manuelle. Chez le pianiste, elle est certes visuelle, manuelle mai euroi auditiva

⁸ Il y a l'addiction à l'alcool, au cannabis, à la cocaïne (au sport)... Mais il y a aussi l'addiction à l'autre. Dans tous les cas c'est la dopamine qui entre en jeu, avec les mêmes structures de dysfonctionnement, que ce soit dû à l'absence d'une substance ou de l'être aimé. La sensation de manque est identique (cf. un nourrisson arraché à sa mère).



LA RÉFRACTION ASTRONOMIQUE

GÉRARD BAILLET

Ancien Ingénieur en opto-électronique Membre de la S.A.F. et de la commission des cadrans solaires Prix Henry Rey de la S.A.F. 2006

CALCUL DE LA RÉFRACTION

1) GÉNÉRALITÉS

La direction d'un astre observé depuis le sol est perturbée, on voit l'astre plus haut que s'il n'y avait pas d'atmosphère. Ce phénomène est visible à l'oeil nu, au coucher du soleil on voit celui ci aplati (sa largeur est la même que s'il était plus haut dans le ciel ; le voir plus gros est une illusion d'optique). Cette perturbation est connue depuis l'antiquité, mais sa valeur n'est chiffrée convenablement que depuis deux ou trois siècles.

Ce phénomène est connu sous le nom de réfraction atmosphérique. Les astronomes, les marins qui utilisent le sextant, se servent de tables qui donnent sa valeur en fonction de la hauteur visée, de la température, de la pression atmosphérique, etc.

La réfraction est causée par la traversée de l'atmosphère qui courbe les rayons. Pour trouver sa valeur il faut additionner la déviation des rayons pour chaque couche de l'atmosphère en tenant compte de l'indice de réfraction de l'air qui varie avec la pression, la température, la longueur d'onde, etc.

Pour donner une importance du phénomène voici deux exemples :

- Lorsque le soleil est vu tangent au-dessus de l'horizon, s'il n'y avait pas d'atmosphère, il serait entièrement sous l'horizon (le soleil est vu sous un angle d'environ 32').
- Lorsque Kepler utilisait les mesures de Ticho Brahé pour trouver ses célèbres lois il cherchait à obtenir une erreur de direction ne dépassant pas la minute d'angle. La réfraction à 30° au-dessus de l'horizon vaut 1'38" on voit donc l'importance de cette correction.

Afin de déterminer la réfraction il est nécessaire de définir les caractéristiques de l'atmosphère.

2) ATMOSPHÈRE STANDARD

On peut retrouver la définition de l'atmosphère standard dans l'article de Wikipédia : «atmosphère normalisée».

http://fr.wikipedia.org/wiki/Atmosph%C3%A8re_normalis%C3%A9e

Nota :Il existe plusieurs atmosphères standard, suivant les saisons ou la latitude. Elles sont utilisées en aéronautique pour prévoir les caractéristiques des avions.

J'ai choisi une atmosphère moyenne dont les caractéristiques sont les suivantes :

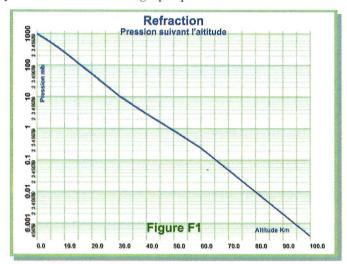
TROPOSPHÈRE					
altitude (m)	pression (hPa)	température (℃)			
10000	265	-50,0			
9000	307	-43,5			
8000	357	-37,0			
7000	411	-30,5			
6000	471	-24,0			
5000	541	-17,5			
4000	617	-11,0			
3500	658	-7,5			
3000	700	-4,5			
2500	746	-1,0			
2000	794	2,0			
1500	845	5,5			
1000	900	8,5			
500	955	12,0			
0	1 013	15,0			

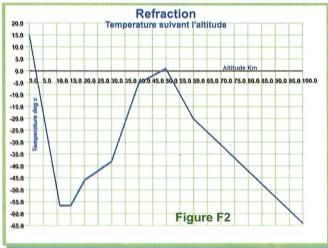
altitude (km)	pression (hPa)	température (℃)		
50	0,9	+1		
40	3	-5		
30	11	-38		
20	55	-46		
15	119	-56,5		
14	141	-56,5		
13	165	-56,5		
12	194	-56,5		
11	227	-56,5		

MÉSOSPHÈRE ET AU-DELÀ				
altitude (km)	pression (hPa)	température (℃) -97,7		
500	1,1 10 ⁻⁸			
400	4,4 10 ⁻⁸	-97,3		
300	2,0 10 ⁻⁷	-95,3		
200	1,3 10 ⁻⁶	-82,2		
100	4,0 10 ⁻⁴	-64		
60	. 2,5 10 ⁻¹	-20		

Pour la pression atmosphérique, on effectue une interpolation logarithmique (sur la pression) entre les altitudes données tandis que pour la température on effectue une interpolation linéaire entre les altitudes définies.

Nous utiliserons les valeurs jusqu'à 100 Km d'altitude représentées sur les deux graphiques suivants.





3) INDICE DE RÉFRACTION DE L'AIR

3.1 Indice en condition standard

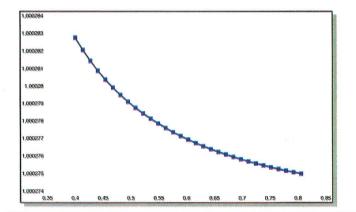
Les conditions standard sont une pression de 1013,25 mbar et une température de 15 °c.

La formule donne l'indice suivant la longueur d'onde.

Avec : ρ = 1000 / longueur d'onde longueur d'onde en nanomètres

 $n_s = 1 + 6,4328.10^{-5} + (2,94981.10^{-2} / (146 - \rho^2)) + (2,554.10^{-4} / (41 - \rho^2))$

Voir ci-dessous la représentation graphique de l'indice de réfraction de l'air suivant la longueur d'onde en micron, dans la zone visible.



3.2 Variation de l'indice avec la température et la pression

 $n = 1 + (n_s - 1) \times (p / p_s) \times (t_s / t)$

n : indice de réfraction de l'air pour une pression et une température données

t : température en kelvins

 t_s : 288,15 kelvins

p: pression en mbar

 $p_s : 1013,25 \text{ mbar}$

 n_s : indice de réfraction calculé en 3.1 Indice en condition standard

4) PRINCIPE DU CALCUL DE LA RÉFRACTION AT-MOSPHÉRIQUE

4.1 Éléments de départ

Afin de calculer la réfraction de l'atmosphère on prend l'atmosphère standard défini au paragraphe 2 Atmosphère standard en se limitant à l'altitude de 100km.

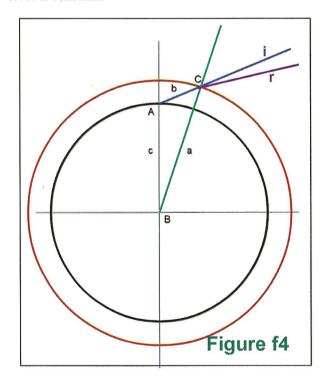
On suppose la terre sphérique de rayon 6370 km.

On choisit la longueur d'onde de 0,59 micron soit la couleur jaune.

4.2 Principe de calcul

On divise l'atmosphère en couches concentriques d'épaisseur variable, afin de tenir compte de la variation de l'indice de réfraction avec la pression. La loi choisie est telle que l'épaisseur de la couche n+1 = (épaisseur de la couche n) x k

Avec k constant.



La couche est limitée par les deux cercles rouge et noir. On suppose que l'indice de réfraction de chaque couche est constant et égal à sa valeur au milieu de la couche.

Le rayon incident i est marqué en bleu.

Le rayon réfracté r à la sortie de la couche est marqué en magenta. Il est dans la couche suivante.

B est le centre de la terre.

Lorsque l'on atteint l'altitude maximum (100 km) on calcule l'angle de réfraction en prenant la différence entre l'angle de départ et l'angle à 100 Km d'altitude.

5) VALIDATION DU CALCUL

La meilleure théorie à ma disposition est dans le livre : «INTRODUCTION AUX ÉPHÉMÉRIDES ASTRONO-MIQUES» par le BUREAU DES LONGITUDES

ISBN: 2-86883-298-9

La théorie utilise 9 tableaux pour corriger la réfraction suivant divers paramètres.

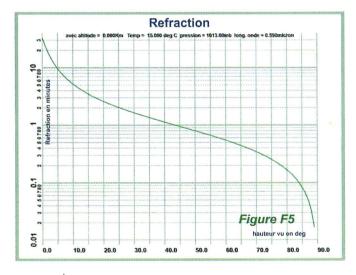
Pour les distances zénithales > 70° j'utilise un tableau de valeurs.

Pour les distances zénithales < 70° j'utilise une formule j'ai écrit un logiciel sous Pov-Ray (calcul avec 16 décimales) qui compare les valeurs du «B.D.L.» au calcul suivant la méthode indiquée au paragraphe précédent.

La formule et le tableau entrés dans le logiciel donnent le résultat suivant :

Extrait du tableau

alt = $0.000 \text{ temp} = 15.000 \text{deg C}$ press atmosph = 1013.00mb long onde = 0.590micron							
Hauteur vu	Hauteur vu Refraction						
Colonne c1 Colonne c2 Colonne c3 colonne c4	Réfrac distan réfrac « intr	ce zénithal	ée pa e en s et x éph	r le so degrés seconde	ft minute s à parti	es et secondes ir du livre du	BDL
colonne c5	tabl : calc c	valeur de	la ta rtir	de la f	ormule 7.	198 3.7 page 193	
Colonne c6 Colonne c7	écart	en seconde exprimé en	entre	les de	ux valeur	's	
c1 0.0 1.0 20.0 30.0 20.0 30.0 40.0 50.0 60.0 70.0 80.0	C2 12' 58.9'' 3' 30.2'' 5' 12.6'' 2' 35.5'' 1' 38.5'' 1' 7.9'' 0' 47.9'' 0' 20.8'' 0' 10.1''	c3 90.0 89.0 80.0 70.0 60.0 50.0 40.0 30.0 20.0	23' 5' 2' 1' 0' 0'	12.5'' 35.5'' 7.9'' 47.9'' 32.9'' 20.8''	tabl tabl calc calc calc calc calc	C6 0.976'' 0.768'' 0.058'' 0.021'' -0.001'' -0.001'' -0.001'' -0.000''	C7 0.494 0.545 0.187 0.037 -0.026 -0.031 -0.034 -0.038 -0.038



5.1 Analyse des résultats

D'une distance zénithale de :

- 0° à 83° il y a un écart < 0,1 seconde d'arc.
- 0° à 67° il v a un écart < 0,01seconde d'arc
- 83° à 90° l'écart reste inférieur à 0,976 seconde d'arc Pour donner une importance de l'écart entre les méthodes on peut donner la variation de température qui produit le même écart entre les deux valeurs :

• à l'horizon l'écart est équivalent à 0,14°C

• À 45° de l'horizon l'écart est équivalent à 0,0080° C

Sachant qu'un thermomètre ne mesure que sa propre température, que la température de l'air peut varier de plusieurs degrés par heure, ces écarts ne sont pas significatifs.

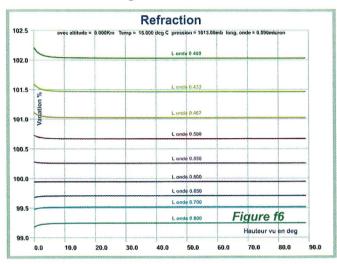
La méthode développée est donc très approchante de la théorie indiquée dans l'ouvrage du Bureau des Longitudes.

6) EFFET DES PARAMÈTRES

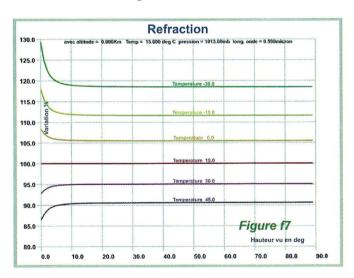
Dans les chapitres suivants on présente le rapport entre la réfraction calculée avec la modification d'un paramètre et la réfraction en standard (indiquée en haut des graphiques), ce rapport est multiplié par 100 pour chaque distance zénithale.

Pour les variations, de pression ou de température à l'altitude 0 km, on fait décroître cette variation progressivement jusqu'à zéro à 10 km d'altitude.

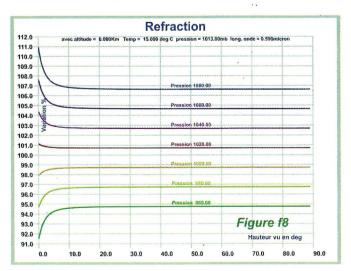
6.1 Effet de la longueur d'onde



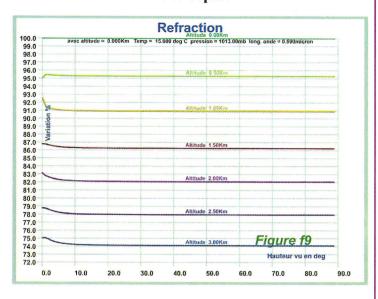
6.2 Effet de la température à l'altitude 0



6.3 Effet de la pression atmosphérique à l'altitude 0

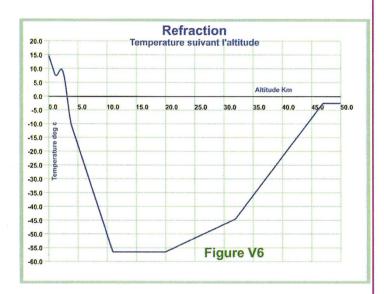


6.4 Effet de l'altitude de départ

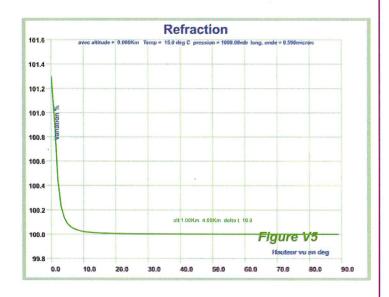


6.5 Effet d'une anomalie de température

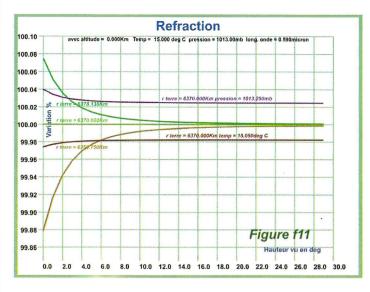
Avec une variation de température comme indiquée sur la figure ci dessous (+5°C entre 1 et 4 km).



On trouve l'effet suivant



6.6 Effet du rayon de la terre



J'ai porté sur le graphique le résultat pour le rayon équatorial (6378,136 km), le rayon moyen (6370 km) et le rayon au pôle (6356,750 km).

Afin de mettre en évidence l'importance de l'effet du rayon de la terre j'ai montré la variation due à une élévation de température de 5/100 °C (15,050°C) ainsi qu'une variation de 0,25 mb de la pression atmosphérique (1013,25mb).

À partir de 6° au-dessus de l'horizon les effets du rayon de la terre deviennent négligeables devant une variation de 5/100°C ou de 0,25mb.

6.7 Remarque sur les effets

Entre 30° et 90° au-dessus de l'horizon les effets (en relatif) des changements des paramètres sont peu sensibles à la distance zénithale, mais en dessous on remarque des variations importantes certainement difficiles à modéliser.

7) EXEMPLE D'UTILISATION

7.1 En astronomie

On peut obtenir la valeur de la réfraction pour un astre dont la position théorique est connue par une première mesure, de là on peut définir le coefficient de modification à appliquer à la valeur standard de la réfraction pour cet astre. Ce même coefficient peut être alors appliqué à la valeur standard de la réfraction pour un astre de position théorique inconnu. Ce principe est applicable pour des hauteurs au-dessus de l'horizon supérieures à 30°.

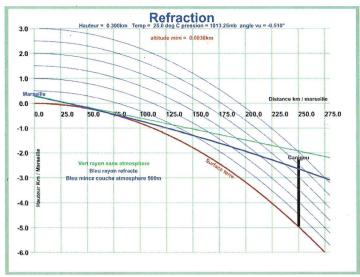
Cette méthode est beaucoup plus simple que l'utilisation de nombreuses tables de correction en température, pression, altitude, etc.

7.2 Observation terrestre

On prendra comme exemple la visibilité du mont Canigou depuis les hauteurs de Marseille (300 m). Sans atmosphère le sommet du mont n'est pas visible, avec la réfraction on peut le voir certains jours se découper devant le soleil couchant.

Voici le graphique qui montre les trajets des rayons, le mont Canigou est représenté sous la forme d'une barre noire verticale à 250 km de Marseille.

Nota : Le graphique a un aspect distordu à cause de la disparité des échelles entre abscisse et ordonnée dans un rapport 25.



8) CONCLUSION

Le logiciel que j'ai développé permet de trouver directement la réfraction à partir de la modification des conditions standard. Il pourrait remplacer avantageusement l'usage de nombreuse tables ainsi que de fastidieuses interpolations.

Un regret, le logiciel Pov-Ray a une bonne précision de calcul, mais il n'est pas interactif.

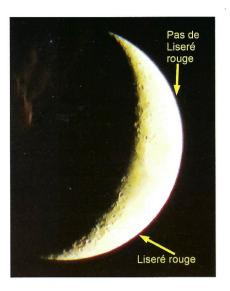
L'adaptation de l'algorithme dans un logiciel compilable et interactif serait un plus.

La méthode de calcul développée semble valable pour les amateurs. Pour obtenir une valeur de la réfraction plus précise il faudrait connaître en fonction de l'altitude la température, la pression, l'humidité..., ce qui est rarement accessible il faut alors se limiter à 4 paramètres accessibles au sol :

- 1. L'altitude du lieu
- 2. La pression ramenée au niveau de la mer
- 3. La température ramenée au niveau de la mer
- 4. La longueur d'onde

Et éviter les mesures au-delà d'une distance zénithale de 80° ce qui est toujours le cas, sauf pour des observations sur l'horizon tel que le rayon vert ou la déformation du soleil.

EXPLICATIONS CONCERNANT LA PAGE DE COUVERTURE



Sur la page de couverture on trouve une photo de la lune que j'ai prise avec un appareil photo numérique classique. On peu remarquer que la lune est bordée d'un liseré rouge en bas.

Voici l'explication : la valeur de la réfraction est plus faible dans le rouge que pour les autres couleurs, alors l'astre est vu dans le rouge moins haut que pour les autres couleurs.

Afin de rendre le phénomène plus visible la photo est traitée par modification de son histogramme, ce qui donne un aspect saturé.

En astronomie on minimise ces phénomènes par l'utilisation de filtres qui rejettent les couleurs gênantes. On peut aussi améliorer l'image en superposant convenablement les images de chacune des trois couleurs.

CONFÉRENCES prévues pour le 1er semestre 2014

15 janvier 2014 Les particularités du végétal au sein du monde vivant (Michel Gendraud)

12 février 2014 Introduction aux neurotoxiques du type Sarin. Aspects biologiques et chimiques (Michel Gendraud et Georges Jéminet)

> 19 mars 2014 Principes et histoire de l'astrolabe (Gérard Baillet)

9 avril 2014 Pierres précieuses dans le Massif Central (Jean-Pierre Couturié)

14 mai 2014 Les lasers : principes de fonctionnement et quelques applications fondamentales. (Sylvain Houard)

11 juin 2014 Applications médicales des lasers dans le domaine de l'ophtalmologie (Dr. Nicolas Rouher)

VISITE DES LABORATOIRES MSD - CHIBRET SITE DE MIRABEL, RIOM.

COMPTE-RENDU

RÉDIGÉ PAR ALAIN GAY-BELLILE ET GEORGES JEMINET LES PHOTOS PRÉSENTÉES SONT ISSUES DE DIAPORAMAS INTERNET ET D'UNE NOTICE LABÉLISÉE MSD

Le mardi 25 juin, 28 membres de l'ADASTA ont visité les laboratoires pharmaceutiques MSD - Chibret sur le site de Mirabel à Riom de 9h à 12h.

Un peu d'histoire, l'origine du fief de Mirabel est antérieure au XV^{ème} siècle puisque Louise Dauphine, de la branche aînée des Comtes d'Auvergne, l'apporte en dot à Pierre II de Maumont en 1452...

Après la fusion du laboratoire clermontois Chibret (produits ophtalmologiques) avec le groupe MSD en 1969, c'est en 1973 que le domaine de Mirabel est acquis par le groupe. Le château et ses dépendances sont situés dans un espace d'environ 39 ha contenant des arbres superbes et traversé par un petit cours d'eau : le Mirabel. Le château sert aujourd'hui de lieu de réunions et de séminaires. De très imposantes constructions au design fonctionnel seront érigées sur le site dès 1977.



La visite commence par un exposé de la responsable de la communication sur le groupe MSD, dans la grande salle de réunion située dans le château. Le film et les diaporamas de présentation sont particulièrement de qualité.

MSD, appelé Merck aux Etats-Unis et au Canada, est un groupe pharmaceutique implanté sur toute la planète. A noter que MSD-Chibret et Schering-Plough ont fusionné en 2009 pour donner naissance à un groupe qui se situe en 2012 au 3ème rang des laboratoires pharmaceutiques mondiaux d'après les chiffres d'affaires réalisés. On peut remarquer que les cinq sociétés américaines qui figurent dans le top 10 de ce classement ont toutes connu une très forte croissance à partir de la production initiale de la pénicilline (1942) par voie fermentaire, véritable révolution biotechnologique mise au point dans ces laboratoires.

Avec ses nombreux médicaments, vaccins, thérapies biologiques, produits de santé animale et grand public, MSD propose des solutions innovantes fondées sur une activité de recherche très importante, pour améliorer la santé et l'espérance de vie de chacun.

C'est dans le monde 106 000 salariés, 47 milliards de dollars de chiffres d'affaires (2012), une présence dans 140 pays. La branche R&D (17% du C.A.) emploie plus de 15 000 personnes. MSD France est présent à travers toutes les étapes de la mise à disposition du médicament, depuis son développement jusqu'à sa commercialisation. Cela représente environ 3000 collaborateurs, six sites de production (dont deux en Auvergne : Riom-Mirabel, 63 et La vallée, 43) et deux centres de R&D dont un à Mirabel. Après le très intéressant exposé de présentation, la visite elle-même commence par l'imposante **tour de stockage** des médicaments fabriqués, avant leur expédition dans plus de 70 pays dans le monde.

Le bâtiment dont l'intérieur est maintenu à température constante présente une surface au sol de 3300 m² et contient 4 transstockeurs automatisés impressionnants par la longueur de leurs parcours. Nous sommes frappés par l'efficacité de cette organisation, de la réception à la sortie des ateliers, jusqu'au départ pour les destinataires (hôpitaux, pharmacies...). La tour n'est utilisée ce jour-là qu'à environ 20% de sa capacité, car le travail effectué le plus possible à flux tendu respecte toujours les stocks de sécurité minimum pour garantir un service de grande qualité.



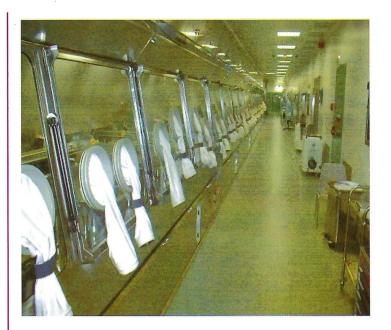
La visite se poursuit par l'atelier de conditionnement d'un médicament : l'INVANZTM, produit breveté. La molécule dénommée à l'origine ertapénem a été découverte par le laboratoire AstraZeneca qui a cédé le brevet à Merck susceptible d'en assurer la fabrication industrielle. C'est aujourd'hui une exclusivité mondiale du groupe sur le marché des antibiotiques. Ce médicament est utilisé exclusivement en milieu hospitalier dans les cas d'infections compliquées avec apparition éventuelle de résistances. L'ertapénem est un antibiotique de la famille des β -lactamines (chef de file : la pénicilline), il appartient à la classe des carbapénèmes

Ertapénem

Pénicilline G (benzvl pénicilline)

Après avoir revêtu une tenue stérile et protectrice appropriée (combinaison, charlotte, chaussures, gants, lunettes), nous parcourons l'atelier tout en longueur qui présente une ligne d'isolateurs sur plus de 70 mètres, sous la direction de l'ingénieur responsable de la fabrication. Notre guide est particulièrement précis dans ses commentaires.





L'ertapénem^R, instable en milieu liquide comme beaucoup de β -lactamines, est obtenu par synthèse totale à Cheerokee (Pennsylvanie) et acheminé sous forme solide par avion à -70°C dans des bidons entourés de carboglace.

A Mirabel le processus dans son principe est le suivant : le produit est mis en solution (eau tridistillée), déposé dans des petits flacons de verre dont le contenu est ensuite lyophilisé (sublimation de l'eau sous vide poussé à partir de la solution refroidie à des températures fortement négatives). L'ensemble des opérations est automatisé à l'aide de palettes contenant plusieurs dizaines de flacons qui voyagent dans les différents isolateurs. L'extrême spécificité du processus ne sera pas détaillée ici. Au final, les flacons contenant 1g de principe actif (sel sodique lyophilisé) sont obturés d'une manière très étudiée par un bouchon en caoutchouc permettant l'introduction d'eau distillée sur le lyophilisat et prélèvement par seringue. En fin de chaîne des tubes échantillons sont pris sur les palettes aléatoirement et contrôlés par spectroscopie. Après conditionnement final, les flacons d'INVANZTM sont entreposés dans une zone dédiée.

Si l'utilisation d'un lyophilisateur de laboratoire pour 100 ml de solution aqueuse dans des conditions classiques ne pose pas de problèmes, nous sommes là devant une opération d'une toute autre envergure qui doit allier une stérilité permanente de l'atmosphère avec un ultravide à très basse température pour la lyophilisation, il y a également quelques étapes de chimie, tout cela sur des palettes qui parcourent au total plusieurs dizaines de mètres. La mise au point de l'ensemble du processus fait du site de Mirabel un lieu unique au plan mondial. Le personnel formé spécifiquement travaille en 3x8.

A noter que parallèlement à la ligne de conditionnement de l'INVANZTM, une deuxième ligne est dédiée au CANCIDASTM qui est un antifongique de grande valeur contre les candidoses invasives. Cette ligne ne fonctionne pas au moment de notre visite.

La société MSD revendique le site de Mirabel comme centre d'excellence international pour la fabrication de médicaments stériles. Il est peu de dire que nous sommes tous très impressionnés par la performance technologique réalisée sur ce site et heureux de trouver une telle réussite en terre auvergnate.

VISITE DE LA ZONE HUMIDE DU LAC D'AYDAT

AMÉNAGÉE EN AMONT DU LAC

DOCUMENTATION SMVVA (SYNDICAT MIXTE DES VALLÉES DE LA VEYRE ET DE L'AUZON)



Le lac d'Aydat, plus grand lac naturel d'Auvergne avec une superficie d'environ 60 hectares pour une profondeur moyenne de 7,4 m et maximale de 15 m, est aujourd'hui malheureusement réputé pour l'accélération de son eutrophisation, c'est-àdire le développement excessif d'algues dû à l'enrichissement de l'eau par des éléments nutritifs (nitrates, phosphates). Ce phénomène naturel, accéléré par l'Homme, pourra devenir à terme préjudiciable pour la qualité de l'eau, le tourisme et tout l'écosystème aquatique.

Aménagement inscrit dans le contrat de rivière «Vallée de la Veyre-Lac d'Aydat», l'ancienne zone humide du Lac d'Aydat, naturellement présente jusque dans les années 1960-1970 à l'entrée de la rivière «Veyre» dans le Lac, a pu revoir le jour.

Après une longue phase de préparation et de concertation avec de multiples acteurs, les travaux de réhabilitation de la zone humide du lac d'Aydat, portés par le Syndicat Mixte des Vallées de la Veyre et de l'Auzon (SMVVA) ont démarré à la fin du mois de septembre 2011 pour s'achever au mois de mai 2012.

L'objectif principal de l'aménagement est la filtration naturelle de l'eau de la Veyre, alimentant le lac, par sédimentation et phyto-épuration. Initialement il était uniquement prévu de créer une zone de roseaux appelée «roselière». Finalement, c'est l'ensemble de la zone humide qui a été aménagé.

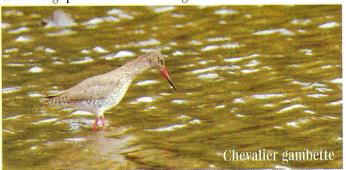
Dans un second temps, il s'agit de penser le projet où la technique, le paysage et les milieux sont pris en compte à l'intérieur d'une histoire commune.

Trois grandes orientations ont ainsi guidé la proposition :

- L'inscription dans le site par la complémentarité des milieux existants et la continuité avec le parcours «Autour du lac».

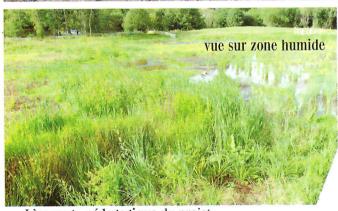
- L'immersion dans le lieu avec trois séquences de paysage:

La Séquence Nord où le paysage s'ouvre et longe un mouvement topographique créé orienté au Sud. Ce modelé de sol recouvert d'une prairie naturelle offre aux visiteurs une vue panoramique sur l'ensemble de la Zone Humide. La Séquence centrale qui permet de s'immerger à l'intérieur du nouveau milieu naturel installé (la découverte du «Delta» et du milieu aquatique, la déambulation sur des pontons bois, les belvédères et les observatoires), et la Séquence Sud à travers l'observatoire ornithologique de la faune sauvage.









- L'ancrage pédagogique du projet.

Ce projet d'aménagement d'intérêt général vise un double objectif environnemental :

• La réhabilitation de la zone humide à l'entrée du Lac d'Aydat :

Il y a une quarantaine d'années, cette zone humide a été comblée sous environ 1 m de remblai afin d'utiliser la surface pour un terrain d'entraînement de football, un parking et une aire de jeux.

Les travaux de réhabilitation ont consisté principalement à du terrassement en déblais à l'entrée du Lac d'Aydat pour retrouver et remettre en fonctionnement la zone humide naturellement présente auparavant.

Les objectifs et les retombées recherchés par un tel aménagement sont multiples :

- Limiter les apports de phosphates dans le Lac d'Aydat;

- Créer un pôle environnemental à l'amont du Lac d'Aydat en recréant une zone humide disparue;

 Augmenter la valeur écologique du site en améliorant la qualité des habitats naturels par la création d'espaces diversifiés humides et en permettant le développement de végétaux variés et typiques des milieux aquatiques;

 Augmenter la valeur paysagère et mettre en valeur le site à l'aide d'aménagements destinés au public permettant la découverte du site. Ce site est fréquenté, tous les ans, par

des milliers de touristes.

Le rôle principal de la zone humide est celui d'une zone «tampon» c'est-à-dire d'épurer les eaux de «La Veyre» grâce à

la présence d'une végétation adaptée.

L'apport d'éléments nutritifs, issus de l'activité humaine, en partie responsables de l'accélération de l'eutrophisation du lac (détérioration d'un écosystème aquatique par la prolifération de certains végétaux), sera donc réduit. Cette évolution accélérée par l'homme est préoccupante pour la vie locale, la ressource en eau et les nombreux usages (pêche, canotage, zone de baignade,...).

Des bassins en amont de la zone humide piègent par sédimentation les matières solides chargées en nutriments.

L'ensemble de cette zone permettra aussi de recréer un milieu riche et important pour la biodiversité (faune, flore) du lac.

Afin de pouvoir comprendre le fonctionnement et profiter des atouts d'une telle zone humide des aménagements «touris-

tiques et naturalistes» ont été mis en place. En effet, un cheminement de 230 m de pontons bois parsemé de passerelles et observatoires sur mares ou ornithologiques rendent la balade du tour du lac ludique et agréable. L'essence de bois retenue pour ces aménagements est le mélèze des Alpes non traité chimiquement (pour respecter la qualité des eaux) et naturellement imputrescible.

De multiples espèces (oiseaux, insectes, amphibiens,...) peuvent désormais être observées sur ce milieu nouvellement recréé.

Bien que non labellisée «Tourisme et Handicap», cette zone reste accessible aux personnes à mobilité réduite.

La réalisation d'un tel chantier a fait l'objet de nombreuses demandes administratives pour respecter les réglementations notamment environnementales.

Les terrains du site de travaux de la zone humide ont été mis à disposition par la communauté de communes Les Cheires dans le cadre de leur compétence touristique sur le Lac d'Aydat.

Le délai de réalisation du chantier a été d'environ 6 mois.

• Réhabilitation paysagère de la carrière du Puy de Combegrasse par la valorisation des déblais des travaux d'aménagement de la zone humide du lac d'Aydat :

Pour une bonne gestion du chantier et pour limiter l'impact environnemental des travaux, les déblais de la zone humide ont été valorisés (16 000 m³ évacués) pour le comblement de l'ancienne carrière sauvage de Combegrasse exploitée illégalement durant quelques années et aujourd'hui située dans le site classé de la Chaîne des Puys.



Les adhérents de l'Adasta écoutant avec attention les explications malgré la pluie.

HISTOIRES DE PLANTES ET AUTRES ...

PAR MICHEL GENDRAUD (DESSINS ET TEXTES)



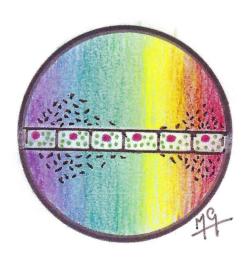
LA TOURBIÈRE A SPHAIGNE

La Sphaigne, cousine de la Mousse, ne vit que dans l'humide et le retient par de grandes cellules réservoirs. Le ruisseau en est tout absorbé. Dans l'eau retenue, elle excrète une acidité qui empêche toute décomposition, et crée la tourbière. Alors, les générations de Sphaignes s'empilent, et seule la plus jeune, la plus haute, vit. Le reste fait la tourbe.

Paysan, l'Homme vit la tourbière, il la nomma sagne et s'en méfia. Mais il découpa la tourbe en briquettes, la sécha et la brûla pour s'en chauffer.

Scientifique, l'Homme interpella les pollens calés dans la tourbe, ils lui dirent la végétation qui croissait autrefois sur le bord. Il vit sur la sagne cette petite plante à rosette de feuilles rouges et rondes se nourrir du Moucheron imprudent et la nomma Rossolis.

Ecologiste, il repéra le Bouleau nain réfugié là depuis la dernière glaciation, si loin de sa résidence circumpolaire. Alors il comprit que la tourbière était une goutte boréale égarée en milieu tempéré et il la protégea.



LE SPECTRE DE MR ENGELMANN

Il savait que la lumière solaire décomposée par le prisme s'étale en un spectre qui va du violet au rouge, en passant par le bleu, le vert, le jaune et l'orangé. Il savait que les plantes vertes éclairées par le soleil dégagent de l'oxygène en faisant la photosynthèse et il se demandait quelles couleurs étaient actives pour ce dégagement.

Le savant se dit que Bacterium termo, la bactérie, l'aiderait, car elle rejoint les lieux riches en oxygène, pour respirer. Dans une goutte de la culture bactérienne, il plaça une algue en filament et, sous le microscope, éclaira le tout par la lumière solaire décomposée par le prisme.

Alors Mr Engelmann vit que les bactéries gagnaient les parties du filament éclairées en bleu et en rouge, et il en déduisit que ces deux couleurs assuraient la photosynthèse. C'était en 1885, Mr Engelmann avait réalisé le spectre d'action de la lumière sur la photosynthèse. Or, la chlorophylle absorbe justement le bleu et le rouge...