

# AUVERGNE

N° 79- SEPTEMBRE 2012

# Sciences

VERS UNE OREILLE BIONIQUE

LA TRACTION ELECTRIQUE

PHYLLOTAXIES

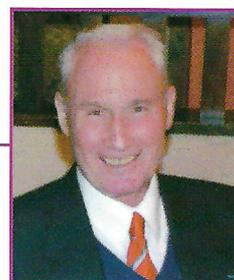
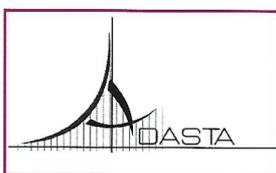
CANOPÉES : LA VIE DES CIMES

L'ARC-EN-CIEL

ACTIVITÉS DE L'ADASTA



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



Voici quelques nouvelles qui modifient et complètent celles que je vous avais données dans l'éditorial de la revue N°78.

Le cadran solaire, magnifique projet, a été stoppé par l'architecte des Bâtiments de France qui a refusé toute construction au sommet du puy de Dôme. Le projet devient actuellement celui d'un cadran solaire situé dans la gare du bas. Nous devons faire une offre; pour cela avec Gérard Baillet notre spécialiste en cadrans solaires, nous irons à nouveau sur le site pour définir l'emplacement idoine. Vous serez tenus au courant de l'avancement de ce projet.

Autre projet similaire, la construction et la mise en place d'un cadran solaire à Chamalières sur un site non encore défini. La façade avant de la Mairie est symbolique mais pas assez ensoleillée. M. Bresson, adjoint au Maire est très intéressé par notre proposition d'autant que le cadran serait en grande partie réalisé par les Services Techniques de la ville.

Un autre projet est la grande conférence sur l'émission des ondes électromagnétiques et leurs effets sur l'organisme. Elle aura lieu dans l'auditorium de l'IFMA aux Cézaux. Pot de l'amitié en fin de conférence. Les 2 conférenciers seront donc Jean Chandezon, vice-Président de l'Adasta, et Anne Perrin, spécialiste des effets des ondes sur l'organisme. Je compte sur un nombre important de membres de l'Adasta à cette conférence. Seront invités aussi nos collègues de l'IESF (Ingénieurs et Scientifiques de France), de la SFEN (Société Française d'Energie Nucléaire), la DRRT (Direction Régionale à la Recherche et à la technologie) et les édiles.

L'ADASTA a continué ses activités au premier semestre avec une série de visites très intéressantes dont le radio-télescope de Nançay et la fabrication des alliages mécaniques en titane chez Aubert et Duval. D'autres visites sont prévues pour le second semestre avec l'usine de Bayet et le train du Puy de Dôme.

Pour les conférences, l'année a été particulièrement riche; vous trouverez dans la revue présente la liste des conférences de septembre 2012 à janvier 2013.

A ces activités s'ajoute la présence demandée de l'ADASTA à plusieurs autres manifestations; forum des associations de Clermont et de Chamalières, fête de la science et aussi des animations diverses autour du planétarium transportable, du four à micro-ondes, des couleurs et d'expériences de chimie.

Les conférences sur les aspects scientifiques de l'orgue à tuyaux se feront quand AstuSciences aura investi dans l'appareil de sonorisation qui est délicat, complexe et cher. Cet appareil est destiné à faire percevoir aux auditeurs l'échelle des fréquences émises par l'orgue, de 20 à 20000Hz. Le diaporama a été réalisé par le Professeur Michel Gendraud à partir de mon ouvrage.

Nous avons proposé aux membres du conseil d'administration un projet de grande envergure qui devrait occuper l'Adasta et lui donner une notoriété supplémentaire. Il s'agit de créer la maison de Blaise Pascal à Clermont de préférence avec des panneaux, des maquettes, des tableaux... sur les diverses activités de Pascal en mécanique, hydraulique, physique, mathématique, philosophie. J'ai rendez-vous avec plusieurs décideurs en août et septembre pour leur demander un local, étape de départ indispensable pour mettre en oeuvre ce grand projet. Là encore, vos avis, remarques et suggestions seront les bienvenus.

Nos finances étant en équilibre, le conseil d'administration de l'ADASTA a décidé l'impression de 3 revues en 2012. Vous lisez la seconde.

Bonne lecture à tous de ce nouveau numéro

Le Président  
Henri Bouffard

## SOMMAIRE

|  |                      |
|--|----------------------|
| Editorial .....  | page 2 de couverture |
| Vers une Oreille Bionique .....                        | 1                    |
| La Traction Electrique .....                           | 6                    |
| Phyllotaxies .....                                     | 12                   |
| Canopées : la vie des cimes .....                      | 15                   |
| L'Arc-en-Ciel .....                                    | 19                   |
| Activités de l'Adasta .....                            | 27                   |
| Adhésions et Abonnements Adasta .....                  | 27                   |
| Visite Ukad .....                                      | 28                   |
| Visite de la Station Radioastronomique de Nançay ..... | 28                   |
| Histoires de plantes et autres .....                   | Page 4 de couverture |

### MERCI À NOS SPONSORS



### 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

### Photo de couverture :

Arc-en-ciel au-dessus du lac Lipno (République Tchèque)  
avec l'aimable autorisation d'Alexis Dworsky  
(Dr. phil. Alexis Dworsky | Akademie der Bildenden Künste |  
Akademiestraße 2-4 | D 80799 München)

© toute reproduction partielle ou totale interdite.



# VERS UNE OREILLE BIONIQUE

**PAUL AVAN**

*Laboratoire de Biophysique Neurosensorielle (UMR INSERM 1107),  
Université d'Auvergne, Clermont-Ferrand*

## INTRODUCTION

Les surdités neurosensorielles affectent plusieurs millions de personnes en France, surtout aux deux extrêmes de la vie, en raison soit du vieillissement qui fait progressivement dégénérer les cellules sensorielles auditives, soit de l'absence à la naissance de molécules indispensables au bon fonctionnement de l'oreille interne. Aucun traitement médical n'existant à l'heure actuelle, une personne sourde reçoit habituellement des appareils auditifs (dits « audioprothèses » ou « aides auditives ») qui lui apportent une amplification des sons. Désormais un traitement automatique numérique élimine les bruits et tente d'améliorer certains aspects directionnels. Mais ces « audioprothèses » ne sont pas de vraies prothèses car elles ne se substituent pas à l'organe abîmé : il reste en fonction, étant simplement assisté par l'appareil. Lorsqu'une surdité neurosensorielle devient profonde, l'amplification acoustique ne restaure plus une compréhension suffisante et engendre un inconfort excessif. Depuis environ quinze ans, une solution éprouvée est la pose chirurgicale d'un implant qui permet une stimulation directe du nerf auditif par une vingtaine d'électrodes placées dans l'oreille interne et pilotées par un processeur numérique. Ce processeur imite de manière schématique les actions des cellules sensorielles auditives désormais inopérantes. Malgré le fait que vingt électrodes ont la tâche de remplacer douze mille cellules sensorielles pour activer trente mille neurones... les résultats en sont souvent étonnants. L'explication réside dans la manière dont le cerveau de la personne implantée reconstruit (si elle a déjà entendu) ou organise (chez un enfant sourd de naissance) les informations codées par l'implant.

## LES CONTEXTES DES SURDITES NEUROSENSORIELLES

### La cochlée normale

Le premier rôle de la cochlée (la partie auditive de l'oreille interne) est de décomposer les vibrations sonores reçues par l'oreille externe et transmises par les osselets de l'oreille moyenne en leurs composantes fréquentielles, ce que fait la membrane basilaire de la cochlée. Cette membrane constituée d'une batterie de résonateurs donne un pic de vibration en réponse à un son sinusoïdal, à un endroit dont la distance par rapport à la base de la cochlée dépend de la fréquence : proche de la base pour les hautes fréquences puis de plus en plus près de l'apex (à l'autre extrémité de la cochlée) au fur et à mesure que la fréquence diminue. Lorsque le son est un mélange de fréquences, plusieurs pics de résonance se forment le long de la cochlée à des endroits qui « codent » pour les composantes du son (la tonotopie qui associe à un endroit donné, une fréquence donnée). Les cellules sensorielles auditives à ces endroits effectuent la transduction des sons : celle-ci engendre des rafales de décharges électriques (les potentiels d'action neuronaux) dans le nerf auditif. Le profil de décharges des neurones auditifs contient l'information qui permet aux centres

auditifs d'identifier le son détecté, en fonction de son contenu en fréquences. Les sons de parole contiennent ainsi des groupes de pics spectraux de position et de décours temporels différents selon l'enchaînement des voyelles et consonnes (fig.1, spectrogramme).

### La cochlée anormale

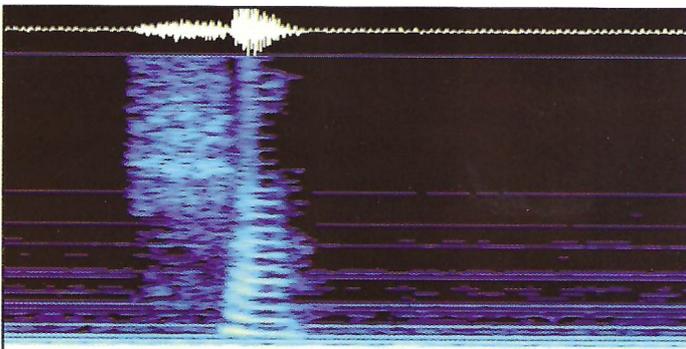
La très grande majorité des surdités chez l'adulte comme chez l'enfant sont dues à des lésions des cellules sensorielles cochléaires, ou à leur absence dès la naissance. Les causes à la naissance sont majoritairement génétiques, maintenant que les causes virales ou liées à une souffrance néonatale sont très réduites. La principale cause à l'âge adulte est le vieillissement, lui-même dû à des facteurs génétiques et fortement influencé par des expositions à des agressions (bruit intense ou produits toxiques). Une exposition aiguë à un son fort, un problème de microcirculation sanguine ou de pression hydrostatique dans la cochlée peuvent aussi induire une surdité d'installation rapide ou brutale.

En cas de surdité neurosensorielle, les cellules sensorielles perdent plus ou moins leur sensibilité, mais aussi leur sélectivité en fréquences. Comme celle de la membrane basilaire est très insuffisante, la sélectivité fréquentielle auditive est largement sous la dépendance de celle des cellules sensorielles, et une surdité cochléaire conduit à des difficultés de différenciation entre sons plus ou moins proches spectralement, à des confusions phonétiques aggravées en présence de bruit ou dans un cadre où plusieurs interlocuteurs parlent en même temps. Le port d'audioprothèses permet de compenser efficacement la perte de sensibilité mais pas la perte de sélectivité en fréquences ni la perte d'intelligibilité qui en résulte. A la rigueur, les traitements numériques actuels du signal peuvent-ils permettre une certaine élimination de certaines sources de bruit, selon leur direction ou leur contenu en fréquences, et diminuer l'impact négatif du bruit sur la compréhension. Quand le degré de surdité devient trop important ou face à certaines surdités apportant beaucoup de distorsions perceptives et ne permettant même pas d'atteindre 50% d'identification de mots dissyllabiques en cabine audiométrique, l'appareillage par audioprothèse devient inefficace. Une autre solution peut alors s'imposer, celle de l'implant cochléaire.

### Le traitement cérébral des informations auditives

Un premier élément important en cas de surdité neurosensorielle, face aux difficultés de compréhension qui en résultent, est de pouvoir compter sur un traitement central de l'information auditive performant.

S'il est pratiquement toujours chez l'adulte devenu sourd, un problème crucial est soulevé chez l'enfant, par le fait que la maturation des centres auditifs et la mise en place du langage oral (l'apprentissage et la maîtrise de sa langue maternelle) exigent un fonctionnement des neurones et de leurs connexions, en situation.



**Figure 1 :** spectrogramme d'un son de parole (*l'chali*), analysant le contenu fréquentiel (axe vertical : la fréquence entre 0 et 3 kHz) en fonction du temps (en axe horizontal, en s). Au-dessus : pression instantanée en fonction du temps, selon la même échelle horizontale.

Ceci demande l'apport d'informations de qualité en provenance de la cochlée. Une surdité neurosensorielle déjà présente avant que le langage ne se soit mis en place, donc avant que les circuits spécifiques à son traitement ne se soient développés correctement, s'appelle surdité prélinguale. En l'absence d'entrées auditives suffisantes, le langage ne peut plus se mettre en place naturellement, c'est-à-dire automatiquement, une fois passée une période critique qui ne dure que quelques années après la naissance. Il est donc particulièrement important de dépister tôt les surdités de l'enfant, et de leur apporter le remède le plus efficace possible pendant la période critique. Il existe pour juger du développement auditif d'un enfant toute une chronologie normale (fig.2) dont le non-respect doit éveiller l'attention (en tenant compte de ce que cette chronologie est donnée en moyenne et peut être légèrement décalée de quelques mois, bien sûr).

| chronologie / enfant (détection)   | chronologie / enfant (production)  |
|--|--|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>dès naissance: reconnaissance de caractères complexes du son</li> <li>phonèmes /ba/ /pa/</li> <li>mélodies</li> <li>6-10 mois: spécialisation (= sens)</li> <li>12 mois: compréhension de mots</li> <li>18 mois: vocabulaire ↑, syntaxe ↑ (&gt;2 mots)</li> <li>&gt;3 ans: &lt;10% erreurs</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>naissance: larynx = adulte</li> <li>5-7, 8 mois: babillage / syllabes</li> <li>12 mois: ressemble à parole</li> <li>&gt;12 mois production de mots</li> <li>&gt;18 mois: 2 mots</li> <li>// avec réception</li> </ul> |

**Figure 2 :** étapes importantes de la mise en place de la reconnaissance des sons et de la langue maternelle (à gauche), et de la production de sons articulés, supports de la parole émise.

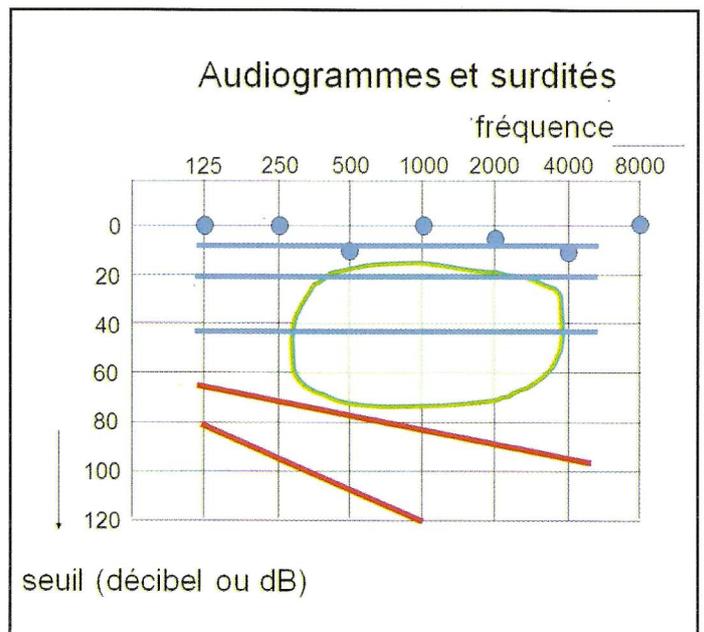
### Les effets de la privation sensorielle

L'effet d'une privation sensorielle est, sur les voies et centres auditifs, d'entraîner la diminution de la densité de neurones et de synapses connectant les neurones entre eux, et on observe aussi la « colonisation » des zones normalement dévolues à une modalité, par des connexions venues d'autres zones affectées à une autre modalité. Considérons par exemple un sujet sourd de naissance utilisant peu ses appareils auditifs, parce qu'il a adopté avec ses proches un mode de communication non pas oral mais par langue des signes. L'imagerie fonctionnelle cérébrale peut révéler, chez un tel sujet, l'absence d'activation du cortex auditif par des sons, mais la présence d'activations intenses par la modalité visuelle. Un autre profil plus complexe encore est la persistance d'activations du cortex auditif primaire par des sons, mais pas du cortex dédié au

langage par la parole orale, et en revanche son activation par l'utilisation de la langue des signes. Le retour d'un tel sujet à une modalité orale serait alors difficile (mais pas forcément impossible) parce que certaines des aires habituellement dévolues à l'audition ne sont plus disponibles. Sans avoir besoin de recourir à des méthodes neuroscientifiques si lourdes, on doit aussi s'interroger d'emblée sur la motivation d'un sujet sourd de naissance, gestuel depuis longtemps, et qui voudrait accéder à une modalité orale sans l'avoir jamais maîtrisée auparavant (ou sur la motivation de son entourage).

### La place du degré de surdité

Evidemment l'accès aux sons et à la parole chez un sujet malentendant dépend du degré de surdité. Les surdités neurosensorielles peuvent affecter différemment les fréquences et entraîner une baisse de sensibilité très variable. Le résultat de l'audiogramme tonal (fig.3), qui permet de mesurer la sensibilité aux sons purs en fonction de leur fréquence, permet de situer notamment le niveau d'audibilité par rapport à la zone dite conversationnelle (ovale en grisé, sur la fig.3) dans laquelle on trouve les fréquences et niveaux des principaux sons constituant de la parole. Les surdités sévères et profondes ne permettent pas d'avoir accès à ces sons conversationnels sans amplification. Toutefois, il est assez simple de restaurer un accès efficace à une bonne intelligibilité de la parole, au moins dans le silence, chez un sourd sévère car les appareils actuels apportent une forte amplification en cas de besoin, tout en maintenant les sons amplifiés dans un intervalle confortable. L'une des plaintes des sujets appareillés en mode conventionnel par des amplificateurs, est l'intolérance aux sons forts car leur oreille interne contrôle mal les distorsions liées aux sons intenses. Les appareils actuels effectuent ce contrôle grâce à des compressions électroniques numériques.



**Figure 3 :** audiogramme tonal représentant le seuil auditif en dB (orienté vers le bas : plus le niveau est >0, plus la perte auditive est importante) à quelques fréquences particulières. Les points au-dessus de la ligne 15 dB sont des seuils normaux. Les lignes correspondent de haut en bas à une audition normale puis à une surdité légère, moyenne, sévère et profonde, types. La zone entourée est la zone contenant les sons importants pour la reconnaissance de la parole (zone conversationnelle).

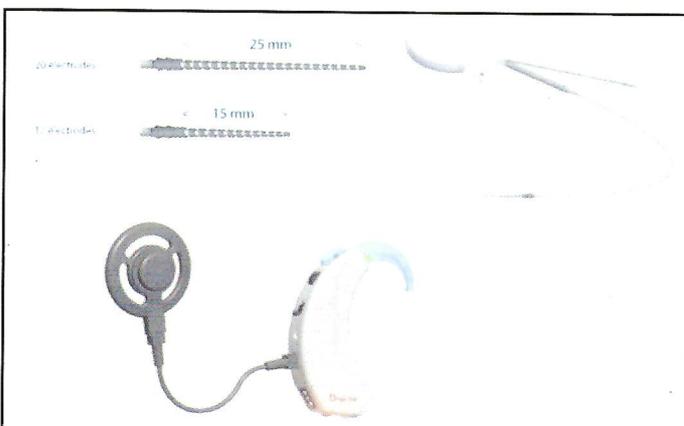
Lorsque le degré de surdité est profond, en revanche, l'intervalle audible et confortable devient très étroit même avec les meilleurs appareils, et la question se pose de l'utilisation ou non de la cochlée, qui distord parfois les sons que lui fournit l'appareil auditif au point de les rendre inintelligibles : l'appareil auditif n'est pas une prothèse ; on l'appelle «audioprothèse» pour des raisons réglementaires mais le terme est inadapté, on dit par exemple «hearing aid», c'est-à-dire aide auditive en anglais. Il ne remplace pas l'organe sensoriel défectueux, mais ne peut que l'assister.

## L'IMPLANT COCHLEAIRE

### Le principe, la structure et sa mise en place

L'implant cochléaire, lui, est un dispositif authentiquement prothétique, qui utilise la cochlée comme un simple support osseux à un système porte-électrodes. Les électrodes introduites dans la cochlée par un orifice fraisé minuscule ont pour but de stimuler directement les fibres du nerf auditif qui restent présentes dans l'axe de la cochlée, et qui sont encore fonctionnelles. Dans la situation naturelle, ces fibres sont excitées par les cellules sensorielles auditives qui transforment le son en potentiels électriques variables capables de déclencher, dans les neurones qui leur sont connectés, des impulsions électriques (ou potentiels d'action) codant pour le son. La position des neurones répondeurs indique la position où l'excitation sonore donne lieu à un pic de résonance, selon la relation tonotopique déjà vue, tandis qu'une intensité sonore plus ou moins élevée est codée par la cadence moyenne plus ou moins rapide des potentiels d'action. La cadence instantanée des potentiels d'action contient également des informations pertinentes quant à la structure temporelle fine des sons excitateurs.

Les électrodes d'un implant cochléaire ont pour tâche d'émettre à proximité des neurones survivants des impulsions électriques reproduisant schématiquement ce que les cellules sensorielles auraient fait en présence du même son. Ces neurones survivants sont en général non affectés par l'atteinte qui, en ayant détruit les cellules sensorielles, a provoqué la surdité, ou en tout cas il faut en faire le pari : tester spécifiquement ces neurones avant d'avoir mis en place un implant cochléaire est virtuellement impossible.



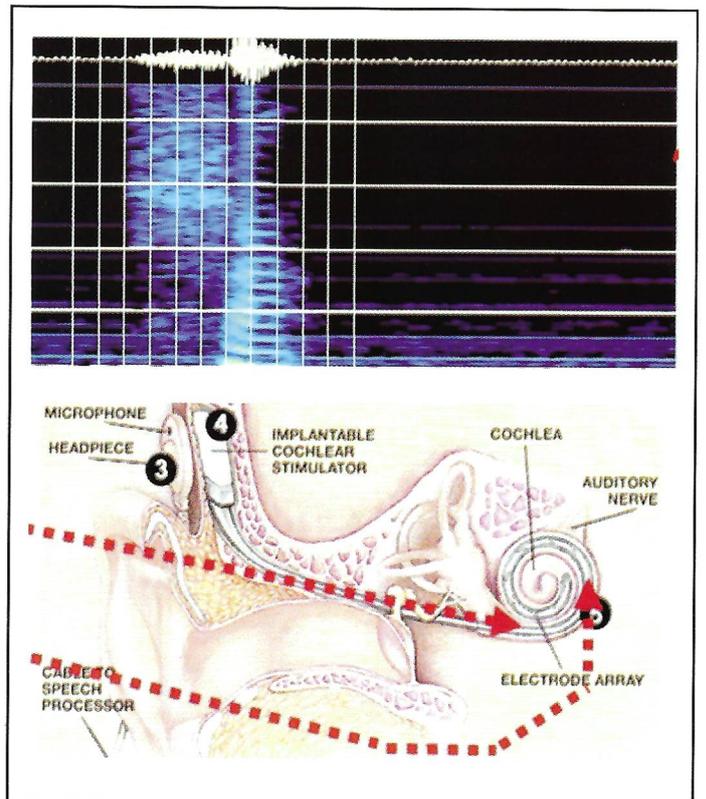
**Figure 4 :** Vue schématique d'un implant cochléaire, avec son porte-électrodes (à gauche, en haut), sa partie interne (à droite, en haut) arrondie, prolongée d'une masse et du porte-électrodes, et sa partie externe (en bas) dont le processeur est porté comme un contour d'oreille et dont l'antenne aimantée se place sur la peau en regard de la partie interne sous-cutanée.

En pratique, l'implant cochléaire (fig.4) est constitué d'une partie non implantée, d'une partie implantée et d'un système d'antenne qui permet aux deux parties de communiquer à distance. La partie non implantée est portée sur l'oreille comme un appareil auditif traditionnel, et son processeur informatique effectue le recueil, l'analyse et le traitement des sons en vue de leur codage imi-

tant le codage naturel qu'une cochlée normale aurait effectué. La partie implantée est constituée d'un porte-électrodes relié à une partie réceptrice aplatie et arrondie destinée à communiquer avec la partie non implantée.

Le porte-électrodes est très souple et de forme allongée, assez fin pour être introduit et enfoncé dans la cochlée osseuse sans produire de lésion macroscopique. Il comporte une vingtaine d'électrodes distribuées de manière longitudinale, se plaçant ainsi en regard de différents endroits le long de la spirale cochléaire lorsque le porte-électrodes y est introduit. La partie réceptrice qui alimente le porte-électrodes est fixée sous la peau et à l'extérieur de la boîte crânienne, derrière l'oreille. La partie implantée est donc totalement en dehors de la boîte crânienne, avec juste une «intrusion» dans la cochlée osseuse. La partie réceptrice implantée contient un petit aimant en regard duquel, à l'extérieur, vient se stabiliser spontanément un autre aimant contenu dans l'antenne de l'appareil externe. Les deux parties sont donc couplées de manière électromagnétique, de part et d'autre de la peau qui fait barrière à toute infection mais permet le passage à courte distance d'ondes électromagnétiques. Ce sont ces ondes qui permettent aux parties externe et interne de communiquer, et aux signaux codés par le processeur de provoquer la circulation de courants électriques au voisinage des électrodes, milliseconde après milliseconde, en fonction des sons reçus, de leurs fréquences et du déroulement temporel. Schématiquement, les sons graves déclenchent l'activation des électrodes profondes et les sons aigus, l'activation des électrodes plus superficielles.

### Le codage par un implant cochléaire



**Figure 5 :** Le principe de codage d'un processeur d'implant cochléaire (au-dessous) est de découper le son en tranches temporelles fines de quelques ms, d'y effectuer une analyse en fréquences à la manière d'un spectrogramme (au-dessus le spectrogramme déjà montré sur la fig.1) et de décider, en fonction de la répartition en fréquences de l'énergie dans chaque tranche temporelle, d'activer telles ou telles électrodes le long de la spirale cochléaire, pour reconstituer le profil d'excitation neurale qui aurait été naturellement produit si la cochlée avait été fonctionnelle.

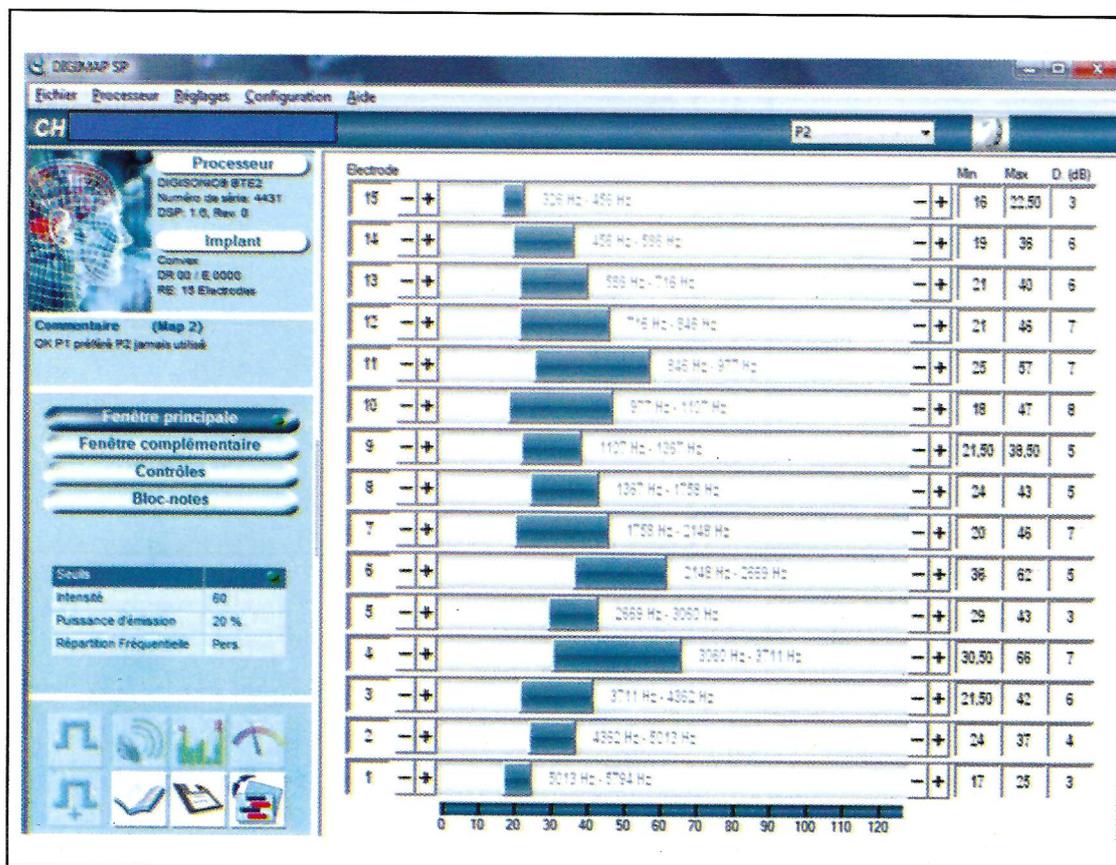
Les différences entre une activation naturelle du nerf auditif et une activation par implant cochléaire (fig.5) sont nombreuses, mais heureusement très peu pénalisantes tant que le son est présenté dans de bonnes conditions acoustiques. La première résulte du nombre d'électrodes, une vingtaine (compte tenu de ce que certaines électrodes activent pratiquement les mêmes fibres bien que placées à des endroits différents du porte-électrodes, pour des raisons géométriques, ces 20 électrodes se traduisent par une dizaine de canaux indépendants seulement). Ces électrodes doivent se substituer à 3000 cellules sensorielles, pour activer 20 000 neurones... leur travail est inévitablement assez grossier. Une deuxième limitation vient de ce que la dynamique des fibres nerveuses est faible, d'autant plus lorsque ces fibres n'ont pas travaillé depuis longtemps en raison de la surdité. Cet aspect s'améliore progressivement en quelques mois chez beaucoup de patients implantés, mais pas tous pour des raisons mal comprises. Une troisième limitation vient de ce que les stimulations électriques artificielles stimulent trop de neurones de manière trop synchronisée, ce qui diminue la finesse des informations temporelles transmissibles. Au lieu de pouvoir transmettre aux neurones la structure fine temporelle des sons comme le font les cellules sensorielles d'une cochlée normale, les implants cochléaires transmettent essentiellement les informations d'enveloppe, c'est-à-dire les variations lentes. Enfin, la quatrième limitation vient de ce que la position des électrodes dans la cochlée osseuse est imprécise car elle dépend d'une insertion manuelle du porte-électrodes à une profondeur un peu arbitraire, qu'il est impossible de contrôler en direct : le chirurgien préfère privilégier des critères de stabilité et d'innocuité mécanique. De ce fait, l'électrode codant, par exemple, pour 1000 Hz, peut très bien se retrouver en regard d'un endroit où le codage naturel aurait été 800 Hz : la carte tonotopique est décalée et distordue. Si ce décalage est très peu pénalisant pour l'identification de sons tels que les phonèmes de la parole, il ne permet pas de codage précis de la

mélodie. Les patients implantés décrivent bien ces difficultés qui leur interdisent souvent d'apprécier la musique.

### Réglages des implants cochléaires

L'intervention chirurgicale est brève, sûre entre les mains d'une équipe entraînée et l'hospitalisation requise est très courte, de l'ordre de deux jours tout compris. Les centres agréés pour effectuer des implantations cochléaires le sont sur la base de compétences spécifiques et d'un entraînement contrôlé. La partie chirurgicale de l'implantation est donc un épisode très bref où la survenue d'une complication est exceptionnelle. La partie ultérieure (suivi et réglages électroniques) est beaucoup plus longue. Un sujet implanté, même adulte, ne peut pas immédiatement profiter de tous les bénéfices que son implant lui apportera plus tard. La démarche de rééducation comporte des étapes de réglage régulières (au début, rapprochées de quelques semaines) et assez souvent un certain nombre de séances d'orthophonie. Le challenge que doit relever le patient est de s'habituer au nouveau codage des sons que lui transmet l'appareil, et de retrouver petit à petit les points de repère qui vont lui permettre de reconnaître les sons simples de la vie quotidienne, puis quelques mots simples, puis des phrases entières, en exploitant d'abord tous les indices possibles comme la lecture sur les lèvres pour reconstruire les parties de phrase pas encore bien comprises phonétiquement. Ensuite la lecture sur les lèvres devient moins utile, et le sujet implanté peut parfois téléphoner ou écouter la télévision et la radio.

Le challenge du régleur est d'optimiser régulièrement les réglages électrode par électrode, en mesurant le plus petit courant qui donne une sensation (le seuil T) et le plus fort courant qui donne une sensation confortable (seuil C). La carte des seuils C et T (fig.6) est réalisée pour toutes les électrodes, et petit à petit elle se stabilise avec une tendance à un élargissement régulier des distances entre C et T, traduisant une augmentation de la dynamique



**Figure 6 :** copie d'écran d'une 'map' décrivant électrode par électrode le plus faible courant donnant une sensation (seuil T) et le plus fort courant donnant une sensation confortable (seuil C). Une fois cette 'map' établie à chaque séance de réglage, les électrodes sont activées en condition naturelle par groupes de 6 à 12, de manière à reconstituer une activation neurale aussi proche que possible de l'excitation naturelle mais sans engendrer d'inconfort ni de brouillage.

et de la tolérance des neurones sous l'effet d'un fonctionnement retrouvé. Outre les réglages C et T, le régleur peut ajuster un certain nombre de paramètres du traitement du signal par le processeur, concernant la cadence des codages et la richesse de l'information, par exemple le nombre de composantes fréquentielles transmises à l'implant lorsque le son en contient plusieurs, superposées. Une information trop riche peut perturber le sujet implanté en provoquant des brouillages, selon la manière dont les électrodes voisines interfèrent, et a contrario une information trop pauvre dégrade la compréhension. Au bout de quelques mois les réglages peuvent être espacés et atteindre une cadence d'un ou deux par an.

### L'adaptation du cerveau à l'implant

Cette progression chez l'adulte et l'enfant sourd postlingual prend quelques mois. Chez l'enfant sourd prélingual, elle est plus complexe puisque la connaissance de la langue maternelle se met en place en parallèle : elle n'est pas encore acquise au moment de l'implantation. Néanmoins, les réglages de seuils C et T chez l'enfant restent faciles car la stimulation auditive restaurée est vite très pertinente pour l'enfant, qui exprime volontiers le fait qu'il a entendu quelque chose plus ou moins fort : il suffit alors de transformer cette réaction en jeu répétitif pour obtenir des réglages fiables. Le fait pour l'enfant d'attacher progressivement un sens aux sons qu'il perçoit en fonction du contexte fait partie du processus naturel d'apprentissage du langage qui dans le cas de l'enfant sourd nécessite un soutien orthophonique, certes, mais sans problème particulier. A partir du moment où les réglages d'un implant sont fiables, en effet, on a la certitude que le niveau auditif est ramené à celui d'une surdité légère à moyenne avec une bonne sensibilité sur toutes les fréquences entre 100 et 8000 Hz (en général un appareil conventionnel amplificateur, au contraire d'un implant, ne restaure guère les fréquences élevées au dessus de 2 à 3000 Hz, surtout en cas de surdité profonde).

La rééducation est donc celle d'un sourd moyen. Le choix est fait délibérément de ne pas normaliser parfaitement les seuils auditifs, ce qui serait techniquement possible, pour privilégier les intensités correspondant plutôt aux sons de parole. En effet la dynamique des sujets implantés reste plus faible que la normale : si on les fait entendre trop bien les sons faibles, les sons forts risquent de devenir trop vite gênants.

Deux autres limitations des implants cochléaires font que la normalisation de l'audition n'est pas obtenue. Tout d'abord, les performances limitées du traitement des sons en présence de bruit font que les sujets implantés voient leur compréhension se dégrader nettement en milieu bruyant (réunion avec de nombreux interlocuteurs et conversations parallèles, notamment).

Le processeur de l'implant n'est pas seul en cause, certains indices mal codés par un implant comme la mélodie sont peu utilisés en l'absence de bruit, mais deviennent nécessaires en sa présence. Or nous l'avons vu, les sujets implantés ne peuvent en général exploiter cet indice. Un remède partiel envisageable est l'implantation bilatérale, ou si possible l'utilisation d'un appareil conventionnel dans l'oreille non implantée. L'utilisation de deux oreilles, même avec une modalité électrique d'un côté et acoustique de l'autre, améliore les performances dans le bruit. Evidemment le coût d'une implantation unilatérale étant de plus de 20 000 euros (à la charge de l'assurance maladie), l'implantation bilatérale pose quelques ques-

tions économiques, à discuter en regard des bénéfices en termes de meilleure efficacité professionnelle et sociale, bien sûr. La deuxième limitation des implants cochléaires se situe en termes d'écoute de la musique, car si les rythmes sont très fidèlement codés, les mélodies ne le sont pas et la structure fine temporelle des sons est trop grossière. La limitation provient de la stimulation électrique trop grossière, par électrodes trop peu nombreuses. Pour le moment aucune solution technique simple n'a vu le jour.

### CONCLUSION, PERSPECTIVES

L'implantation cochléaire a connu un succès inattendu en termes de performances dans le silence, et de vitesse d'adaptation, chez l'adulte comme chez l'enfant. Depuis 20 ans elle a révolutionné la prise en charge des surdités profondes, ou sévères mais avec distorsions très pénalisantes. Désormais des centaines d'implants cochléaires sont posés tous les ans en France en toute sécurité, dans des centres agréés qui assurent la chirurgie, la maintenance, les réglages et le soutien orthophonique éventuel, souvent très recommandé y compris chez l'adulte (par exemple, le service d'ORL du CHU de Clermont-Fd). S'y rajoute chez l'enfant, la coordination des actions de rééducation en liaison avec l'éducation spécialisée et l'Education nationale, qui a des programmes d'éducation intégrée. La polémique linguistique (oralisme contre langue des signes) parfois soulevée à l'encontre de l'implantation est assez artificielle car rien n'interdit ou ne devrait interdire à un sourd implanté d'acquérir la langue des signes ni de s'intégrer dans la communauté sourde, comme dans l'entendante. Les problèmes (indéniables) viennent de la mauvaise circulation des informations d'une communauté à l'autre.

Un élément qui rend cette circulation d'information difficile est l'ignorance réciproque, fléau de nombreuses sociétés qui se croient avancées, un autre vient de la génétique. C'est elle qui est la plus grande pourvoyeuse de surdités profondes congénitales (70%). Or la plupart des enfants nés sourds le sont de parents entendants, qui a priori ignorent tout de la surdité : chacun avait la malchance de porter sans le savoir, et sans conséquence visible, un gène de surdité (par malchance, le même chez les deux conjoints). L'enfant a eu la malchance de se retrouver avec deux copies mutées d'un même gène. Ceci le fait appartenir à une autre communauté que ses parents, s'il reçoit une éducation en langue des signes : paradoxe soluble mais délicat au début. A l'opposé, la plupart des enfants de parents sourds sont entendants, car il est très rare que les deux parents sourds le soient à cause du même gène : encore un conflit potentiel de communautés. Il n'y a aucun obstacle neuro-développemental à un bilinguisme langue orale / langue des signes : on pourrait donc dire que l'implant cochléaire, prothèse presque ordinaire qui ne provoque aucune intrusion dans le cerveau du sujet implanté (elle est sous-cutanée mais externe à la boîte crânienne, et facile à explanter) permet de profiter des avantages inhérents à l'intégration aux deux communautés. Cette intégration n'est pas du ressort médical même si le médecin est appelé, souvent en première ligne dans la foulée du diagnostic, à servir le rôle d'informateur objectif, et elle n'est en aucun cas garantie comme conséquence automatique de l'intervention chirurgicale. La question n'est donc ni scientifique, ni médicale, mais porte surtout sur la volonté de la société d'intégrer les personnes atteintes d'un handicap, et si le médecin et le scientifique sont bien sûr appelés à contribuer, c'est dans leur rôle de citoyen informé.



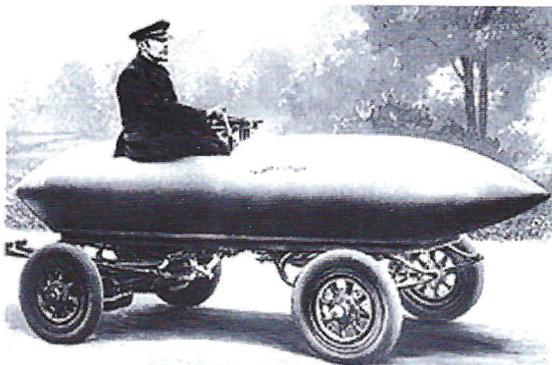
# LA TRACTION ELECTRIQUE

DU FERROVIAIRE À L'AUTOMOBILE.

LA TRACTION ÉLECTRIQUE EST-ELLE NOTRE AVENIR ?

**FRANCIS ASPORD**

Membre de l'ADASTA, Retraité SNCF, Ingénieur Conseil



La Jamais Contente

La voiture électrique n'est pas une idée neuve : en 1899, la première voiture à dépasser les 100 km/h est électrique. Mais l'ère du pétrole bon marché va remiser tout ça aux oubliettes de l'histoire pendant 100 ans.

L'humanité a connu différents modes de traction : les hommes, puis les animaux de trait, puis les différents moteurs : à vapeur, à pétrole, électriques. J'imagine la fierté du premier cornac qui a réussi à bénéficier de la force d'un éléphant ! C'était déjà une révolution !

Lorsque Denis Papin découvre la vapeur, en faisant bouillir de l'eau en vase clos, il ignore qu'il vient de lancer l'ère industrielle, celle dans laquelle nous sommes toujours et qui va peut-être nous conduire à notre perte par suite de l'emballement du climat !

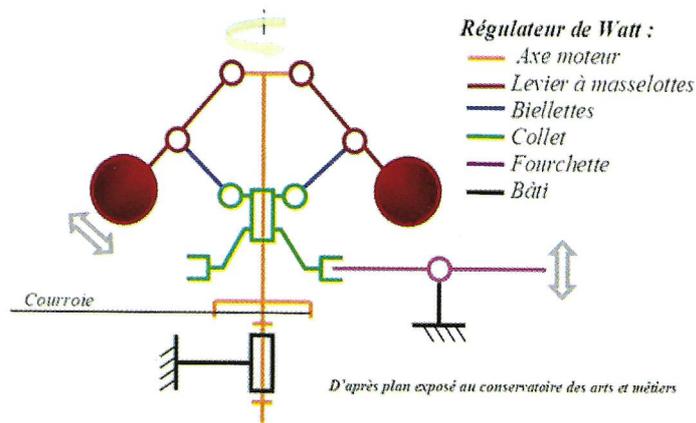


La machine de Papin, maîtrise de la puissance motrice du feu  
Denis Papin (1647 - 1712)

Très peu de temps après, Joseph Cugnot invente le premier véhicule « auto-mobile », du grec auto « soi-même » et du latin mobile « qui se déplace ». J'imagine aussi l'étonnement des passants devant ce « cheval-vapeur » qui, pourtant, ne va pas plus vite qu'un homme au pas.



Le fardier, premier véhicule automobile  
Joseph CUGNOT (1725-1804)



D'après plan exposé au conservatoire des arts et métiers

James Watt (1736 - 1819), inventeur de l'automatisme et de la régulation.

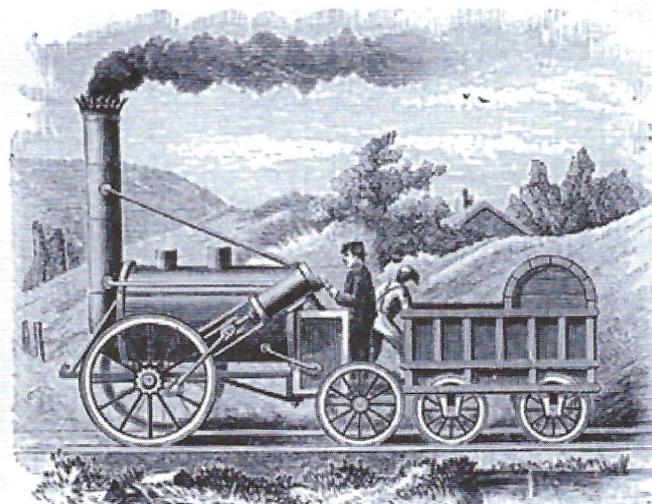


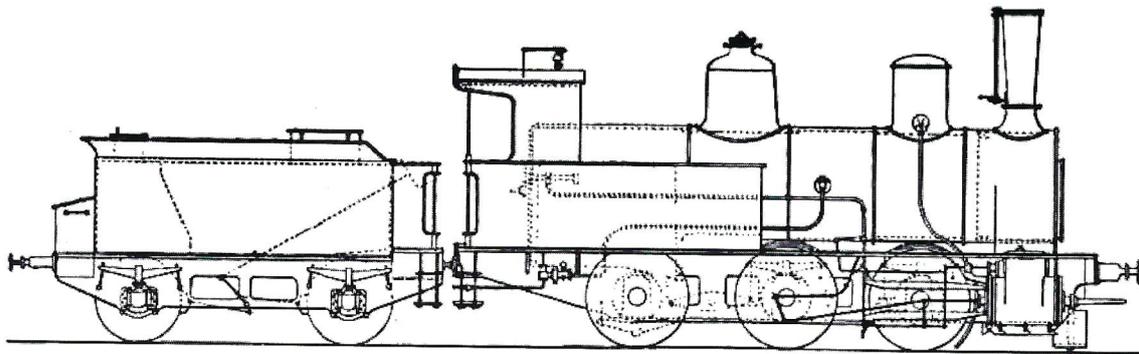
FIG. 55.—The "Rocket," 1829.

"Rocket" (1829) de George Stephenson.

Ensuite James Watt va perfectionner le moteur à vapeur, en automatisant et en régulant son mouvement, pour lui donner sa forme définitive actuelle. Dans le même temps George Stephenson crée la première locomotive à vapeur « de concours ».

Il faut voir, une fois dans sa vie, la 141R qui fait des trains touristiques en gare de Clermont-Fd : bruits, odeurs, mouvements des bielles, c'est de "la belle ouvrage" !





## Fonctionnement de la machine à vapeur

Les astuces des meilleures locomotives sont les suivantes :

- la chaudière tubulaire qui permet un contact intime entre l'eau et le feu par l'intermédiaire de centaines de tubes, plongés dans l'eau, dans lesquels passent les gaz chauds. C'est le principe de chauffe du four à micro-ondes (**en ce sens que tout le volume est chauffé en même temps!**)

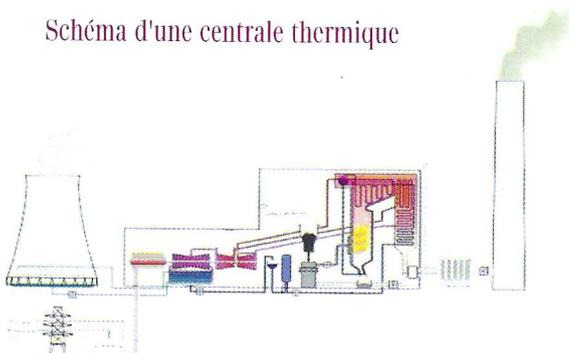
- le tirage forcé qui exploite l'effet Venturi en laissant s'échapper la vapeur par la cheminée, créant ainsi une aspiration efficace et continue malgré une courte cheminée...tunnels obligent !

- le déphasage de 90° des bielles, évitant aux deux cylindres d'être inactifs au même moment et donc au train de s'arrêter en rase campagne !

- la vis d'Archimède qui apporte le charbon du tender à la chaudière, sans effort pour le chauffeur, comme dans les chaudières à granulés de bois modernes !

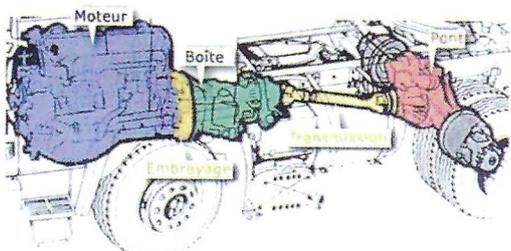
Si vous pensez que la vapeur a disparu de notre vie, vous vous trompez ! Elle se cache mais elle est bien là ! Une centrale électrique thermique, ce n'est qu'une locomotive à vapeur à l'arrêt. Avec, cependant, du fait de cet immobilisme, une circulation d'eau en circuit fermé, ce qui est bien plus économique !

### Schéma d'une centrale thermique



Alors pourquoi abandonner la vapeur dans les chemins de fer ? Principalement parce que le délai de démarrage est trop long, plusieurs heures, et que la consommation de charbon et d'eau est monstrueuse !

Vient alors le moteur Diesel vers 1900. C'est le nom propre de l'ingénieur Allemand qui cherchait à brûler des huiles lourdes.



Chaîne cinématique thermique du moteur Diesel

Il a une forte puissance, 3000 CV pour une locomotive, 3 fois 30.000 CV pour un bateau. Il est réputé « increvable » mais il ne peut fonctionner que dans une faible gamme de vitesses de rotation. D'où une chaîne cinématique compliquée : moteur, embrayage, boîte de vitesses, arbre de transmission avec joints de Cardan, pont moteur.

Alors pourquoi abandonner le Diesel ? Principalement à cause de la pollution par microparticules et par dégagement de CO2. Mais il est utilisé de façon si universelle que son remplacement ne sera que très progressif, d'autant plus qu'un Diesel peut tourner à l'huile de friture ! Peut-être un créneau pour l'agriculture ?

Alors quid des moteurs électriques ? Ils ont un excellent rendement de 90%, contre 30% pour le thermique, et sont réversibles, ce que les autres moteurs ne savent absolument pas faire. On ne peut pas remplir son réservoir de pétrole en freinant alors qu'on peut remplir sa batterie en freinant. C'est toute la différence !

Le principe des moteurs électriques est très simple :

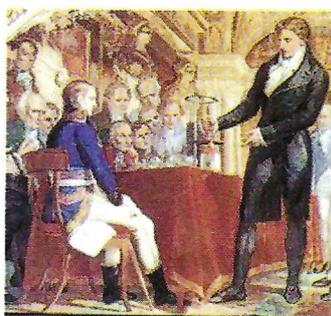
- si on fait tourner une bobine conductrice dans un champ magnétique on obtient un courant.

- si on fait passer un courant dans un champ magnétique on obtient une force, donc une rotation.

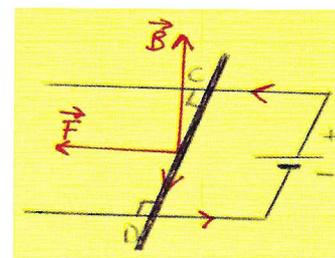
En fait, il y a deux façons concurrentes de faire du courant :

- la méthode chimique, trouvée par Volta, qui ne peut générer que du courant continu.

- la méthode mécanique, trouvée par Laplace, qui ne peut générer que du courant alternatif.



Alessandro Volta (1745 - 1827)



Force de Laplace

Pendant cent ans ces deux mondes électriques ont vécu côte à côte, en s'ignorant totalement, car, à l'époque, on ne savait pas passer de l'un à l'autre de façon économique.

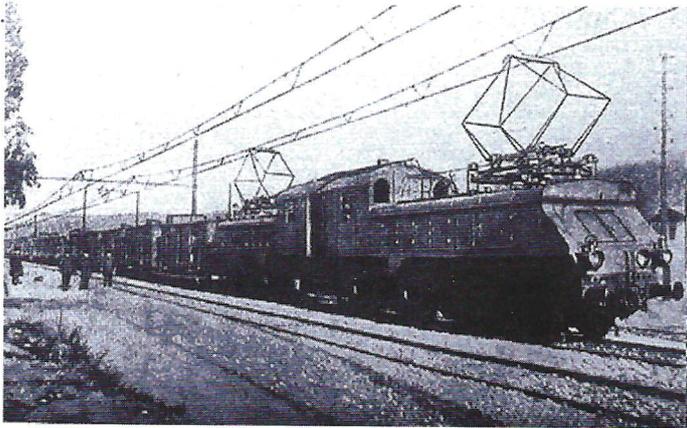
Un gros problème restait à résoudre : le transport à longue distance de l'énergie électrique. Pour limiter le coût en cuivre il faut un faible courant et donc une forte tension, car la puissance à transmettre est le produit des deux :  $P = UI$ . Pour l'obtenir il faudra attendre l'invention du transformateur qui réalise l'opération avec un excellent rendement.



Avant 1960 les trains fonctionnent, en France, en courant continu 1500 V ce qui est très coûteux en cuivre déployé sur des centaines de kilomètres. C'est alors que Louis Armand décide d'utiliser le courant EDF à 25kV alternatif. C'est un pari très risqué pour l'époque car les moteurs de traction alternatifs ne sont pas vraiment au point. Mais ce sera une révolution qui conduira aux TGV.



Louis Armand  
(1905 - 1971)



Les premières locomotives électriques

La locomotive Diesel-électrique est une autre solution. Sa chaîne cinématique est très simple : un groupe électrogène de forte puissance, un moteur électrique en prise directe sur les roues. On ne peut pas faire plus simple et plus fiable !

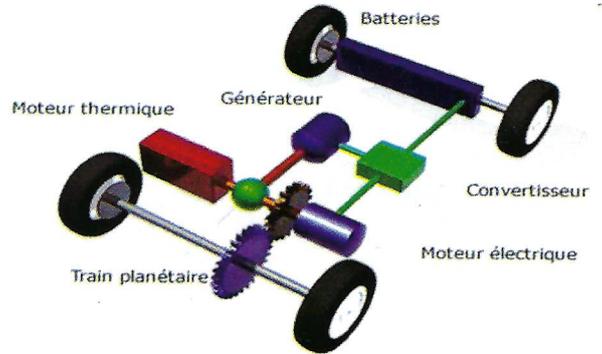


Locomotive Diesel-électrique

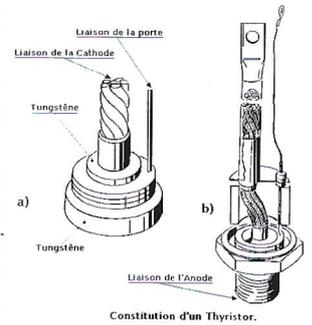
La chaîne cinématique d'une locomotive électrique est tout aussi simple : une caténaire qui apporte le courant, un transfo abaisseur de tension, un moteur électrique en prise directe sur les roues.

Pas d'embrayage, pas de boîte de vitesses, par d'arbre de transmission car le moteur électrique a la bonne idée d'avoir son couple maximum à l'arrêt !

La chaîne cinématique d'une voiture hybride est identique. Le courant est fourni par une batterie de traction ou un groupe électrogène qui alimente un moteur électrique en prise directe sur les roues.



Depuis l'invention du thyristor de puissance vers 1970 les deux mondes électriques sont compatibles. On peut transformer le courant à sa guise, continu vers alternatif à la fréquence voulue, ou alternatif vers continu, suivant les besoins, en tirant avantage de chaque mode. A présent on est libre de choisir à la fois la source de courant et le type de moteur de traction.

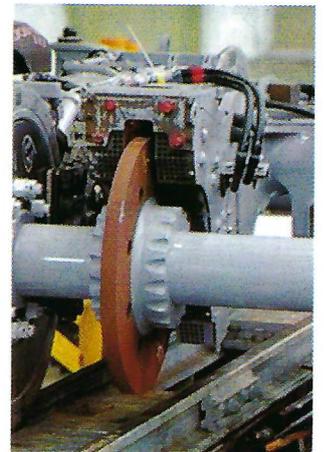


Dans le système Michelin « Active Wheel » tout se trouve dans la roue : le moteur de traction, le frein, la suspension. Les trois sont entièrement électriques. Plus d'usure des freins, plus de fuites d'huile sur les amortisseurs !

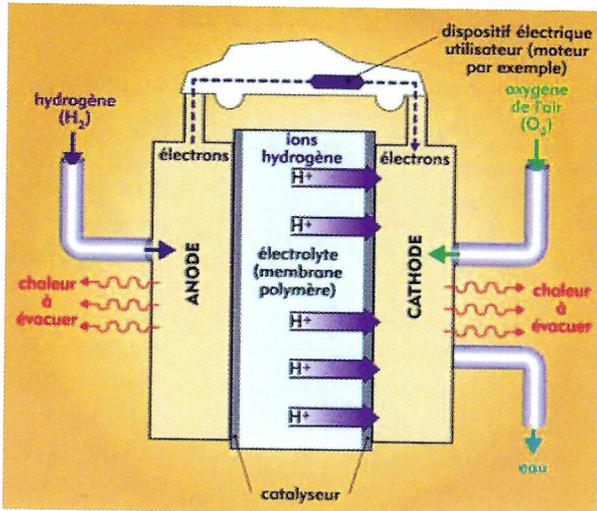
En effet, le frein électrique par courants de Foucault, sans frottement, permet de ralentir sans aucune usure. Encore mieux, le frein électrique par récupération permet de ralentir en rechargeant la batterie.

La voiture électrique est idéale en ville : nerveuse au démarrage, récupérant l'énergie au freinage et zéro pollution dans les embouteillages ! Par contre, sur longue distance, son autonomie est actuellement insuffisante.

La parade est donc la voiture hybride qui comporte un groupe électrogène lorsque la batterie est vide.



Actuellement c'est un moteur thermique mais l'avenir pourrait bien être une pile à combustible alimentée par de l'hydrogène. On pourrait aussi songer à un captage électrique par induction en installant une ligne électrique sous une voie de circulation d'auto-route.

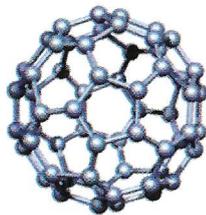


La pile à combustible

Réfléchissons à la puissance de nos voitures : la puissance nécessaire est multipliée par environ 10 lorsque la vitesse est multipliée par 2. Une berline actuelle est calculée pour rouler à 200 km/h avec un moteur de 100 kW. C'est sans doute trop. A 100 km/h un moteur de 10 kW suffit. En ville, à 50 km/h, un moteur de 1 kW suffit ! Le gros moteur actuel est donc souvent sous-utilisé et donc mal optimisé.

Comme la plupart des pièces d'usure d'une voiture thermique actuelle sont supprimées dans une voiture électrique, le coût d'entretien devrait être bien moindre. Le point faible, cependant, est la batterie, chère et fragile. L'avenir sera, peut-être, à la pile à combustible qui produit de l'électricité à partir de l'oxygène de l'air et d'un réservoir d'hydrogène.

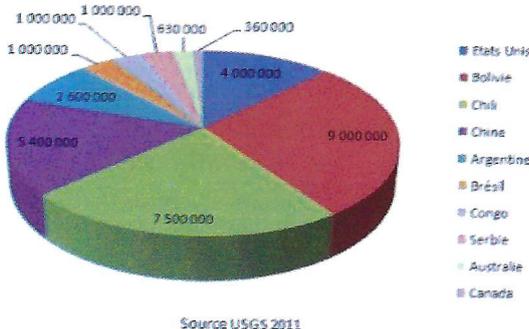
Le stockage de l'électricité est un des domaines de recherche les plus cruciaux des dix prochaines années. L'autre sujet phare est le stockage de l'hydrogène qui est si petit qu'il passe à travers les atomes métalliques du réservoir.



Le fullerène : hydrogène comprimé, liquide, piégé

Les meilleures batteries actuelles nécessitent du lithium. D'où une nouvelle géostratégie non basée sur le pétrole, le gaz ou le charbon. Ce pourrait être la chance de l'Amérique du Sud.

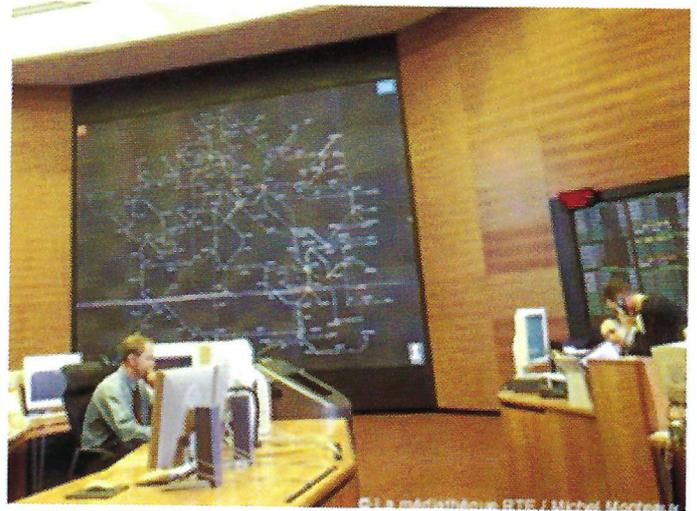
Ressources mondiales de lithium (en tonnes)



Une voiture passe 95% du temps à l'arrêt. Il serait donc astucieux d'utiliser les 30 millions de batteries du futur parc automobile à ce moment là.

L'électricité « verte » va continuer à se développer. Son gros inconvénient est son aspect aléatoire. Tant qu'on ne saura pas stocker l'électricité il faudra placer, à côté de chaque éolienne, une centrale électrique à gaz pour parer, en temps réel, à son défaut de production.

Toutes ces idées vont dans le sens d'une deuxième révolution électrique : les réseaux intelligents qui pourront piloter à distance la consommation des ménages. Nous devrions avoir deux abonnements électriques, le classique actuel, non commutable et donc plus cher, et le nouveau, commutable sans préavis par EDF, et donc moins cher. En effet, on peut couper pendant une heure, sans inconvénient, un radiateur, un congélateur, voire une machine à laver. Grâce à cela on économisera la mise en chantier de nouvelles centrales, sans parler de la réduction de la gabegie actuelle d'énergie !



Ma voiture idéale est donc la suivante :

- hybride pour ne pas tomber en panne en pleine campagne.
- essence pour éviter les microparticules, ou mieux hydrogène dès que la technologie le permettra.
- 4x4 pour rouler dans la neige, car **l'électronique permet** de piloter **facilement** quatre moteurs indépendants, situés dans chaque roue, sans avoir besoin de tous les engrenages et arbres de transmission actuels qui génèrent du bruit et de la consommation de carburant.
- rechargeable sur le secteur EDF pour effacer, pendant la nuit, la consommation modeste de la veille, en ville, soit 50 km.

Comme disait Pierre Dac « la prévision est un art difficile, surtout si l'on tente de l'appliquer au futur ». La demande mondiale de pétrole peut exploser du fait de la gourmandise croissante des pays émergents ou au contraire chuter brutalement du fait d'une récession mondiale. Hormis l'alternative de la traction électrique, on ne peut exclure un retour partiel à la traction hippomobile dans des cas particuliers (agriculture bio, débardage de bois, nettoyage des plages, entretien communal...). Une chose est sûre, le changement climatique nous pend au nez et ce n'est qu'un début ! Je suis donc personnellement convaincu que le système de traction thermique actuel n'a pas vraiment d'avenir.

Et le moteur à air comprimé ? Rechargé la nuit par le réseau EDF, il pourrait remplacer avantageusement le moteur thermique dans son rôle de groupe électrogène, car il ne pollue pas. Par contre il ne présente pas les caractéristiques de réversibilité si intéressantes du moteur électrique. Il ne lui est donc pas substituable.



# PHYLLOTAXIES :

## COMMENT LES PLANTES DISPOSENT-ELLES LES FEUILLES SUR LEURS TIGES?

**MICHEL GENDRAUD**

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

### INTRODUCTION

Certains le connurent à Madagascar, son aire naturelle, et l'appelèrent Arbre du Voyageur, pour sa taille et pour l'eau de pluie qu'il gardait aux gaines de ses feuilles. D'autres apprirent son existence par un timbre de la France Libre et furent surpris que l'on mît un éventail sur une vignette. Ceux-ci attendirent longtemps pour en savoir plus (figure 1).

Qui observe maintenant *Ravenala madagascariensis*, cette grande herbe de vingt mètres de haut, comprend que l'éventail vient de sa phyllotaxie plaçant alternativement ses immenses feuilles aux extrémités d'un diamètre de la tige, comme chez une Graminée.

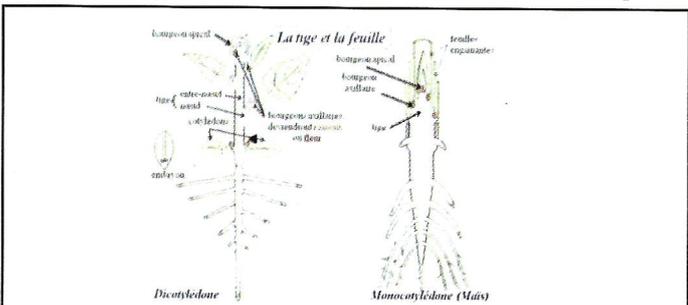


*Ravenala madagascariensis*, à l'Eden Project, Cornwall, et sur un timbre de Madagascar

**Figure 1 :** Une phyllotaxie spectaculaire, celle de *Ravenala madagascariensis* ; à gauche, l'aspect général de la plante ; à droite, une vue de l'emboîtement des pétioles ; au centre, l'aspect en éventail bien visible sur le timbre.

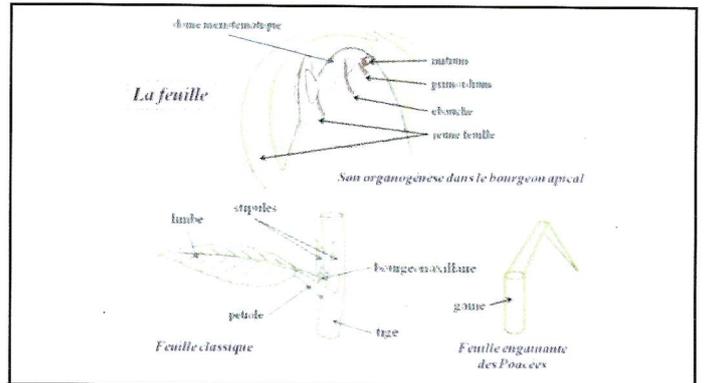
### LA FEUILLE

**Sa place dans la plante.** - Initiée dans le bourgeon apical, la feuille est l'organe végétal spécialisé dans la photosynthèse. Elle s'insère sur la tige au niveau du noeud et l'ensemble des insertions est la phyllotaxie. Chaque feuille porte à son aisselle un bourgeon axillaire (figure 2) qui peut évoluer en rameau ou en fleur et conservera cette géométrie d'insertion une fois la feuille disparue.



**Figure 2 :** Feuilles et tiges chez les Angiospermes. Dans le cas de la Dicotylédone, les feuilles sont dégagées de la tige. Pour la Monocotylédone, ici une Graminée (maintenant Poacée), le Maïs, leur base engainante masque la tige qui reste très courte. Dans les deux cas, chaque feuille porte un bourgeon axillaire. Ces bourgeons axillaires apparaissent très tôt, à l'aisselle de jeunes feuilles qui sont encore dans le bourgeon apical.

**Son organogénèse.** - La figure 3 montre l'organogénèse de la feuille au sein du bourgeon apical. Au départ, en un point particulier du dôme méristématique, est une prolifération de cellules, l'initium. En se maintenant, la prolifération crée un relief, le primordium qui poursuit son organogénèse en ébauche foliaire et en jeune feuille. La feuille classique adulte comporte un limbe, surface assimilatrice responsable de la photosynthèse, relié à la tige par le pétiole, à la base duquel se tiennent deux stipules, lames vertes capables, elles aussi, de photosynthèse. Il existe de nombreux cas de feuilles modifiées, par perte ou transformation d'un ou plusieurs de leurs constituants. Ces modifications peuvent générer les écailles protectrices des bourgeons, des vrilles, des épines, des pièges à insectes... La position de ces produits dérivés décrira toujours la phyllotaxie de la plante.



**Figure 3 :** Les feuilles se développent dans le bourgeon apical, de l'initium à la jeune feuille qui acquiert son limbe, au niveau des futurs noeuds. C'est de la position de l'initium puis du primordium que dépendra la phyllotaxie. L'allongement des futurs entre-noeuds dégage les feuilles de la tige et permet leur étalement. Sont indiqués les constituants de la feuille classique et la particularité de la feuille engainante des Poacées.

**LES DIVERSES PHYLLOTAXIES.** - Les phyllotaxies se distinguent entre elles par le nombre de feuilles à chaque noeud et par la disposition de ces feuilles sur la tige (figure 4).

**Les phyllotaxies alternes.** - Chaque noeud ne porte qu'une feuille. Les feuilles alignées verticalement le long de la tige, sur deux génératrices à 180° l'une de l'autre, caractérisent la phyllotaxie alterne distique, comme chez le *Ravenala* et les *Graminées*. La disposition des feuilles tout autour de la tige à des niveaux différents correspond quant à elle à la phyllotaxie alterne spirale (Chêne, Chou, Joubarbe).

**Les phyllotaxies verticillées.** - Chaque noeud porte deux, trois feuilles, ou plus, groupées en verticilles. On est alors en présence de phyllotaxies verticillées dimères, trimères, etc. Pour les premières, les deux feuilles du verticille sont opposées à 180° et l'ensemble est décalé de 90° par rapport aux ensembles immédiatement supérieur et inférieur. Cette disposition garantit à chaque feuille un espace disponible maximal. Pour les secondes, les trois feuilles du verticille sont à 120° l'une de l'autre et chaque verticille est décalé de 60° par rapport à ses homologues supérieur et inférieur.

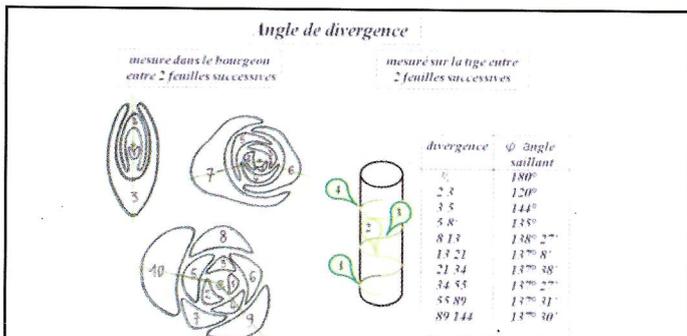


**Figure 4 :** Quelques exemples de phyllotaxie. A gauche, phyllotaxie alterne distique du Triticale ; de gauche à droite et de haut en bas, phyllotaxies alternes spiralées d'une germination de Chêne, du Chou, de la Joubarbe; phyllotaxie verticillée dimère de l'Hortensia, phyllotaxie verticillée trimère de la Balsamine. Pour information, d'autres phyllotaxies décelables sur le cône de Douglas et le tubercule de Pomme de terre (les « yeux » du tubercule).

### LES THEORIES PHYLLOTAXIQUES

Les premières observations relatives à la disposition des feuilles sur la tige s'étendent de l'Antiquité à la Renaissance (Aristote, Pline l'Ancien, Léonard de Vinci, Kepler).

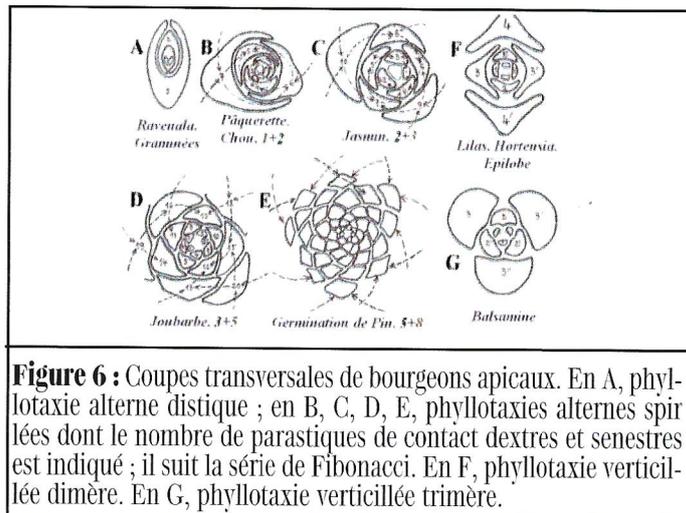
**Approche descriptive.**- Il faut attendre les années 1830 pour que deux auteurs allemands, K. Schimper et A. Braun introduisent la notion de spirale génératrice, et d'angle de divergence (figure 5). Les feuilles successives apparaissent suivant une spirale génératrice qui ménage entre elles un angle de divergence exprimé en fraction rationnelle de la circonférence. Les dispositions les plus courantes appartiennent à une série principale telle que  $1/2, 2/3, 3/5, 5/8, \dots$  dont les numérateurs et dénominateurs sont des termes de la suite de Fibonacci (*voir encadré p. 14*), suite dont chaque terme est la somme des deux termes qui le précèdent (1, 2, 3, 5, 8, 13, 21, 34, 55...). A chaque fraction correspond un angle saillant entre deux feuilles successives, soit  $180^\circ, 120^\circ, 144^\circ, 135^\circ, \dots$ . L'algèbre montre que la valeur de cette fraction pour un nombre infini de termes correspond à un angle limite de  $137^\circ 30' 20''$ , l'angle d'or. De la série principale s'échappent d'autres séries, dites latérales et secondaires, qui conduisent à des angles limites supérieurs ou inférieurs à l'angle d'or. Cette approche ne rend pas compte des phyllotaxies verticillées.



**Figure 5 :** La mesure de l'angle de divergence entre deux feuilles successives est évidente sur une coupe transversale de bourgeon apical. Sur la tige, elle s'obtient de la façon suivante. Pour aller de la feuille 1 à la feuille 4, qui se trouvent sur une même verticale, en suivant la spirale génératrice (en vert sur le dessin), on rencontre 3 intervalles (1-2, 2-3, 3-4) en 2 tours. La divergence est  $2/3$ . Il s'agit des  $2/3$  de  $360^\circ$  soit  $240^\circ$  pour l'angle rentrant et donc  $360^\circ - 240^\circ$ , soit  $120^\circ$  pour l'angle saillant sur lequel les raisonnements ultérieurs seront effectués. Le tableau montre que la valeur de cet angle tend vers  $137^\circ 30'$  qui correspond à l'angle d'or.

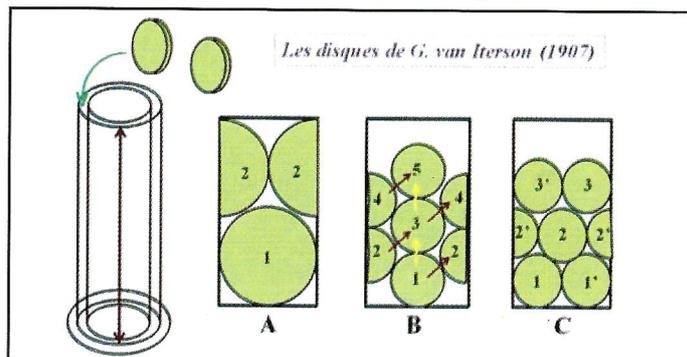
A.H. Church, entre 1900 et 1920, introduit la notion de parastiques (ou parastiches) de contact pour décrire avec plus de précision les phyllotaxies alternes spiralées. Observables sur des coupes transversales de bourgeon apical, les parastiques de contact sont les spirales formées par les jeunes feuilles et les primordia ayant un contact les uns avec les autres (figure 6). Il apparaît que les phyllotaxies spiralées sont caractérisées par le nombre de parastiques de contact dextres (sens trigonométrique positif) et sénestres (sens trigonométrique négatif) qui peuvent être détectés dans le bourgeon. La figure 6 montre une progression dans le nombre de ces parastiques, 1+2, 2+3, 3+5, 5+8, qui suit la série de Fibonacci. Les termes élevés de cette série se retrouvent dans les capitules de composés (Chardon, Pâquerette, Tournesol).

Ainsi les fleurons (fleurs fertiles) du capitule de Tournesol sont placés selon une phyllotaxie  $34+55$ . D'autres séries sont mises en évidence, la série subsidiaire  $1+3, 3+4, 4+7, \dots$ , les séries exceptionnelles  $1+4, 4+5, 5+9, \dots, 1+6, 6+7, 7+13, \dots, 1+8, 8+9, 9+17, \dots$ . Ces dernières se rencontrent chez les Lycopodes, ces plantes qui furent des arbres au Carbonifère et qui, maintenant, à l'état rélictuel, ont la taille d'une Mousse et se cachent en des biotopes bien définis.

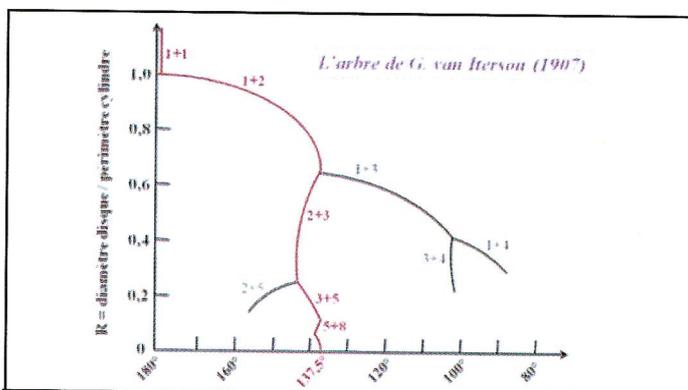


**Figure 6 :** Coupes transversales de bourgeons apicaux. En A, phyllotaxie alterne distique ; en B, C, D, E, phyllotaxies alternes spiralées dont le nombre de parastiques de contact dextres et sénestres est indiqué ; il suit la série de Fibonacci. En F, phyllotaxie verticillée dimère. En G, phyllotaxie verticillée trimère.

**Approche mécanique.**- En 1907, G. van Iterson assimile l'implantation des feuilles sur la tige à des disques souples qu'il empile autour d'un cylindre, le long d'une spirale génératrice, de telle sorte que les disques ne se chevauchent pas (figure 7). Ramenant le diamètre des disques au périmètre du cylindre, et mesurant dans chaque cas l'angle de divergence  $\phi$  entre les centres des disques, van Iterson construit un diagramme, en forme d'arbre qui porte son nom (figure 8). Le tronc en est la série de Fibonacci, et les branches les séries subsidiaires et exceptionnelles.



**Figure 7 :** Insérés autour d'un cylindre qui représente la tige, ces disques de van Iterson sont en contact sans se chevaucher. Le développement du cylindre (flèche rouge à double sens) met en évidence des dispositions phyllotaxiques connues. En A, phyllotaxie alternedistique ; en B, phyllotaxie alternespiralée, les parastiques de contact apparaissent ; en C, phyllotaxie verticillée dimère.



**Figure 8 :** L'arbre de G. van Iterson construit empiriquement à partir de la position de disques non chevauchant sur un cylindre. En rouge, la série principale (de Fibonacci) qui aboutit à l'angle d'or, en noir les séries subsidiaires et exceptionnelles. Les sommes indiquées correspondent aux parastiques de contact.

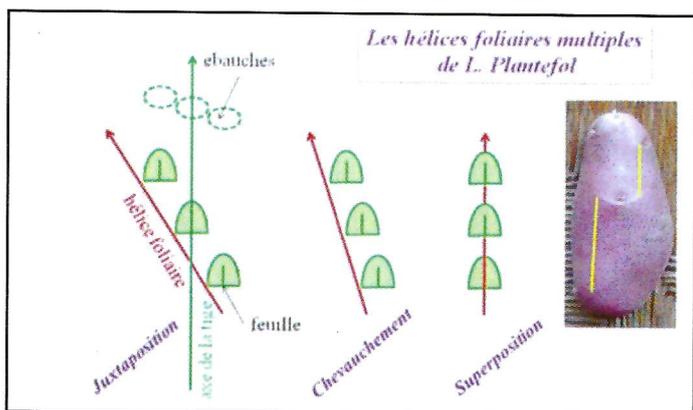
**Approche physiologique.**- A la fin de la seconde guerre mondiale, Lucien Plantefol, physiologiste de renom, se tourne vers la description de la phyllotaxie et, en 1947, publie sa « théorie des hélices foliaires multiples ». Soucieux de proposer une interprétation générale de la phyllotaxie, y compris des cas aberrants, il dégage les principes suivants :

1) les feuilles sont disposées sur des hélices, le plus souvent multiples. Parallèles et de même pas, elles renferment le même nombre de feuilles, à une unité près.

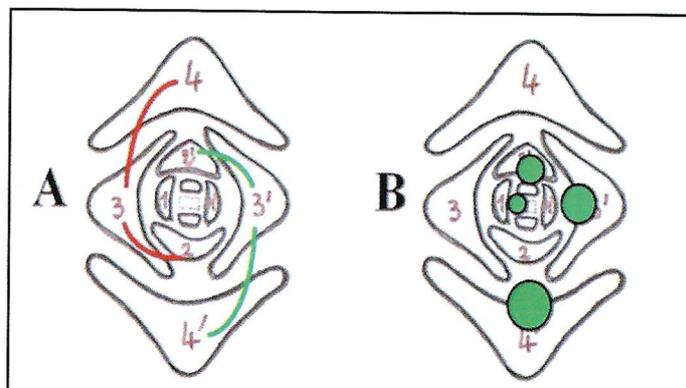
2) le long d'une même hélice, les feuilles, contigües dans le bourgeon apical sous forme d'ébauches, ne sont ensuite séparées que par l'élongation intercalaire de la tige (figure 9).

Les hélices foliaires rendent compte de tous les types de phyllotaxies, mais c'est dans le cas des phyllotaxies verticillées que leur apport est original (figure 10). La phyllotaxie verticillée dimère est due au fonctionnement de 2 hélices plaçant leurs feuilles de  $90^\circ$  en  $90^\circ$ . Nullement arbitraire, cette interprétation provient de la description de quelques plantes qui possèdent une hélice « favorisée » dont les feuilles ont un bourgeon axillaire et une hélice « défavorisée » aux feuilles sans bourgeon. Ce phénomène est l'anisocladie hélicoïdale.

La théorie postule que chaque hélice est engendrée par un centre générateur qui se meut au sein du dôme méristématique, dans l'anneau initial, sorte de tore, où, par intervalles, se constituent des initia. Après un franc succès en France dans les années 1950-60, cette théorie n'est, actuellement, pas toujours citée, certains lui reprochent d'être exclusivement descriptive.

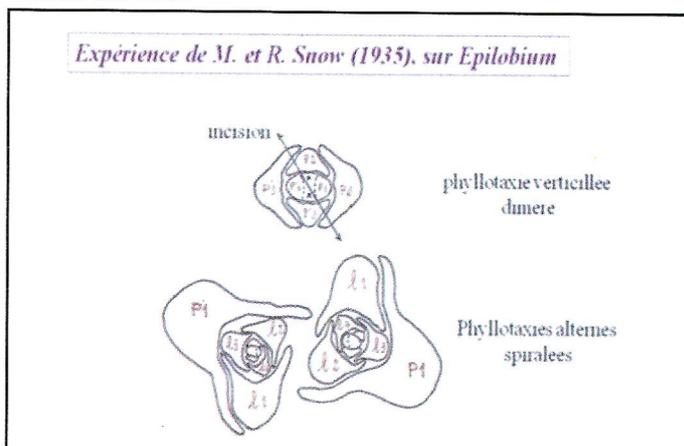


**Figure 9 :** Les bases de la théorie des hélices foliaires multiples de Lucien Plantefol : la contigüité des ébauches dans le bourgeon apical, par juxtaposition, chevauchement ou superposition se retrouve dans la disposition des feuilles sur la tige. A droite, la juxtaposition des hélices foliaires des « yeux » du tubercule de Pomme de terre.



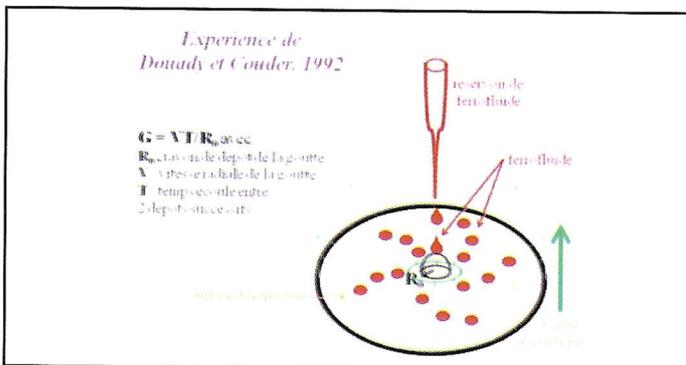
**Figure 10 :** Les hélices foliaires dans les coupes de bourgeon apical à la phyllotaxie verticillée dimère. En A, cette phyllotaxie est le résultat du fonctionnement de 2 hélices plaçant alternativement leurs feuilles de  $90^\circ$  en  $90^\circ$ . En B, le cas de l'anisocladie hélicoïdale met en évidence l'hélice « favorisée » par la présence de bourgeons axillaires, indiquées par un cercle vert.

**Approche expérimentale.**- Il s'agit, le plus souvent, de micro-chirurgie sur le dôme méristématique. L'exemple fameux de l'expérience des époux Snow suffit à illustrer cette approche. Ils incisent l'apex d'un Epilobe à phyllotaxie verticillée dimère, selon une diagonale (figure 11) et constatent que les pousses issues de l'opération ont une phyllotaxie alterne spiralée. Ils remarquent aussi que le premier primordium de chacune de ces pousses est apparu à l'endroit et au moment où s'est formé un espace libre de taille suffisante. Ce résultat conforte leur hypothèse qui avance que, quelle que soit la phyllotaxie, un nouveau primordium s'installe dans le premier espace disponible, comme le pressentait Hofmeister dès 1868.



**Figure 11 :** L'incision en diagonale de l'apex verticillé dimère conduit à 2 pousses alternes spiralées. Les primordia  $l_1$  de ces pousses sont apparus à l'endroit et au moment où s'est formé un espace libre de taille suffisante.

**Avancées récentes.**- Elles proviennent de la physique et de l'informatique et se basent sur les vues de Hofmeister et des époux Snow qui, finalement, ne font pas appel à la nature biologique des primordia et des feuilles. Dans les années 1990, S. Douady et Y. Couder, physiciens, réalisent l'expérience représentée à la figure 12. Des gouttes de ferrofluide tombent avec une périodicité  $T$  sur un dôme au centre d'une surface circulaire d'huile. Le dôme, de rayon  $R_0$  est assimilé au dôme méristématique. Par un champ magnétique, les gouttes de ferrofluide, assimilées à des primordia, s'éloignent du dôme en un mouvement assimilé à la croissance. Ces gouttes-primordia s'arrangent en des dispositions phyllotaxiques dont la nature dépend de  $G$ , nombre sans dimension donné par le rapport  $VT/R_0$ .



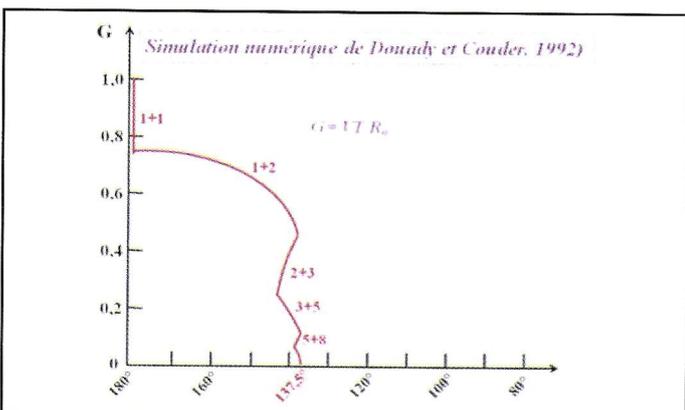
**Figure 12 :** L'expérience de Douady et Couder fait tomber des gouttes de ferrofluide sur un dôme de rayon  $R_0$  au centre d'une surface circulaire d'huile. Par le champ magnétique, les gouttes de ferrofluide, s'éloignent du dôme et prennent des dispositions que l'on trouve dans la phyllotaxie.

Une simulation numérique (figure 13) précise le résultat. On y retrouve le tronc de l'arbre de van Iterson, à peine modifié, donc les dispositions phyllotaxiques de la série principale. Pour en revenir à la botanique, il apparaît qu'aux valeurs élevées de  $G$ , la phyllotaxie est alterne distique ( $\phi = 180^\circ$ ). Cela correspond, relativement à  $R_0$ , à une grande vitesse  $V$  d'éloignement des primordia ou à un temps  $T$  long séparant leurs mises en place successives ou à la conjonction des facteurs. En botanique, le temps  $T$  séparant la mise en place de deux primordia successifs est le plastochrone qui varie entre un jour et un an selon les plantes.

Lorsque  $G$  baisse, par diminution de  $V$ , de  $T$ , ou par augmentation de  $R_0$ , les dispositions phyllotaxiques correspondent à des termes de plus en plus élevés de la série de Fibonacci et l'angle de divergence tend vers l'angle d'or. Ainsi, chez la Pâquerette dont la rosette de feuilles est alterne spiralée 1+2, les fleurons du capitule sont sur une phyllotaxie 8+13, ce qui représente une diminution spectaculaire de  $G$ .

Trois paramètres suffisent à rendre compte des phyllotaxies alternes, le rayon du dôme méristématique, le plastochrone et la vitesse de croissance au voisinage de ce méristème. Bien que chacun d'eux soit une réalité biologique, il suffit de les représenter par des données physiques simples pour obtenir des dispositions phyllotaxiques.

Autre résultat allant dans le même sens, l'action de l'expansine appliquée sur un côté du méristème. Tout se passe comme si cette protéine qui augmente la plasticité de la paroi cellulaire, créait localement un espace disponible puisque, sur le lieu de son application surgit un primordium surnuméraire.



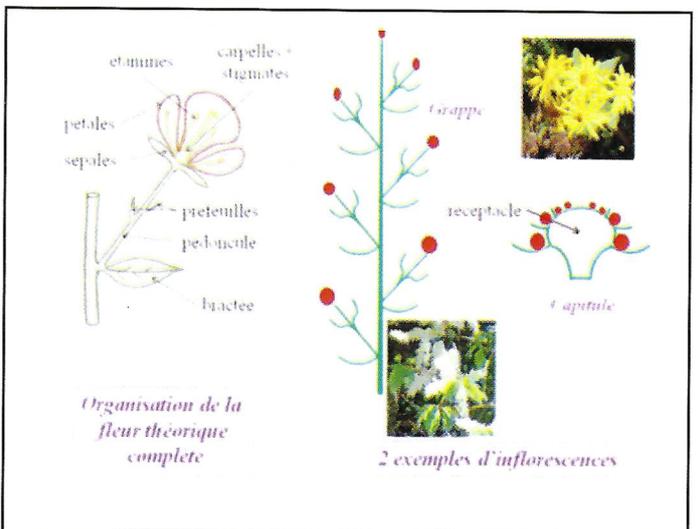
**Figure 13 :** Simulation numérique reproduisant l'expérience représentée à la figure 12. Les particules ponctuelles représentant les primordia se placent selon des dispositions phyllotaxiques. Seule la série principale est représentée sur la figure.

Par ailleurs, l'apport de la biologie moléculaire sensu stricto dans l'étude du fonctionnement du méristème et de la mise en place de la phyllotaxie est évidemment prometteur, mais les cascades d'expression de gènes observées relèvent encore de la seule compréhension du spécialiste.

**QU'ADVIENT-IL DE LA PHYLLOTAXIE A LA FLORAI-  
SON ?** A la floraison, le bourgeon végétatif cesse de fabriquer des feuilles pour établir les pièces florales, pédoncule et bractées, sépales (calice), pétales (corolle), étamines (androcée), carpelles (gynécée). Et les fleurs peuvent être groupées en inflorescence, grappe, capitule... (figure 14).

**La phyllotaxie dans les inflorescences.** - C'est évidemment la mise en place de l'inflorescence, quand cette structure existe (Lilas, Tournesol) qui est la première étape du processus de floraison. Dans le cas de la grappe, les fleurs sont disposées selon la phyllotaxie de l'appareil végétatif, et l'on peut admettre en première approximation que les bractées sont les dernières feuilles produites, à l'aisselle desquelles le bourgeon deviendra fleur. Pour le capitule, les exemples du Tournesol et de la Pâquerette cités plus haut indiquent que les fleurons sont disposés selon les termes élevés de la série de Fibonacci (8+13, 34+55), suite à une diminution de  $G$  par augmentation de  $R_0$  qui forme le réceptacle sur lequel s'insèrent ces fleurons.

**La phyllotaxie dans les fleurs.** fleurs.- Dans la plupart des cas, la phyllotaxie de type végétatif s'arrête avant la mise en place des pièces florales et calice, corolle, androcée, gynécée sont sur des verticilles quelle qu'ait été la phyllotaxie antérieure.



**Figure 14 :** l'aisselle d'une bractée. Le pédoncule présente encore quelques productions foliaires, les préfeuilles, avant de laisser s'épanouir les pièces florales (sépales, pétales, étamines, carpelles), le plus souvent en verticilles. Ces fleurs peuvent être groupées en inflorescences où l'on retrouve la notion de bractée.

**POUR CONCLURE**

Les primordia prennent des dispositions phyllotaxiques en occupant le premier espace disponible. Par référence aux gouttes de ferrofluide, tout se passe comme si, de chaque primordium, diffusait un inhibiteur qui s'opposerait à la surrection d'un nouveau primordium dans son voisinage immédiat. L'espace disponible des époux Church serait l'espace qui dégagerait une zone suffisamment éloignée des primordia existants pour être indemne de cet inhibiteur. Il peut paraître surprenant que ces dispositions phyllotaxiques auxquelles notre œil attribue certaines qualités esthétiques, ne soient que la manifestation d'un principe plus général d'agencement de la matière. Mais ne convient-il pas de voir là, de la part de la plante, une économie de moyens pour faire du fonctionnel ?

# LA SUITE DE FIBONACCI ET LE NOMBRE D'OR

PAR JEAN CHANDEZON ET PAUL-LOUIS HENNEQUIN

## La suite de Fibonacci

Leonardo Fibonacci (1175, 1250) ou Léonard de Pise est un mathématicien italien qui, dans un de ses ouvrages, *le Liber Abaci*, s'est posé le problème de l'évolution d'une population de lapins avec les hypothèses suivantes :

- les lapins deviennent adultes en un mois,
- chaque mois un couple de lapins adultes donne naissance à un nouveau couple de lapins,
- on mesure la population des lapins en nombre de couples appelé  $u_n$ ,
- on mesure le temps en nombre de générations appelé  $n$ .

A chaque génération les  $u_{n-2}$  lapins qui existaient deux mois auparavant étant adultes, au moins depuis le mois précédent, donnent naissance à une nouvelle génération ce qui fait  $u_{n-2}$  couples de lapereaux qui s'ajoutent aux  $u_{n-2}$  couples de lapins adultes soit, en tout,  $2u_{n-2}$  couples de lapins. Pour avoir la population totale il faut ajouter à cette valeur les lapereaux nés le mois précédent qui deviennent adultes, leur nombre est donné par la différence des populations entre les générations  $n-2$  et  $n-1$ . Par conséquent la population totale de couples de lapins et de lapereaux pour la génération  $n$  se calcule à partir de la population pour les générations  $n-2$  et  $n-1$ . par la relation suivante :

$$u_n = 2u_{n-2} + (u_{n-1} - u_{n-2}) = u_{n-1} + u_{n-2}$$

Pour calculer  $u_n$  il faut se donner deux valeurs initiales  $u_0$  et  $u_1$ , en général on suppose que l'on commence en  $n=0$  avec un seul couple de lapereaux  $u_0=1$  qui deviennent adultes au bout d'un mois  $u_1=1$  et ainsi de suite. A partir de ces valeurs initiales les premiers termes de la suite de Fibonacci sont les suivants :

1, 1, 2, 3, 5, 8, 13, 21, 34, 55, 89, 144, 233, 377, 610, 987, 1597, 2584, 4181, 6765,...

La population de lapins augmente indéfiniment avec le temps.

## Le nombre d'or

Le nombre d'or, noté en général  $\varphi$  se retrouve dans de nombreux problèmes aux endroits les plus inattendus. La définition la plus simple et la plus courante est la suivante :

•  $\varphi = b/a$ , rapport entre deux grandeurs  $a$  et  $b$  telles que  $a < b$  où le rapport de la petite grandeur ( $a$ ) est à la grande ( $b$ ) ce que la grande ( $b$ ) est au tout ( $a+b$ ). On peut donc écrire :

$$\varphi = \frac{b}{a} = \frac{a+b}{b} = 1 + \frac{1}{\varphi}$$

Le nombre d'or est donc la racine positive de l'équation du second degré suivante :

$$\varphi^2 - \varphi - 1 = 0 \quad \text{d'où } \varphi = \frac{1+\sqrt{5}}{2} = 1.61803398875$$

On peut calculer  $\varphi$  de façon itérative comme la limite d'une suite de nombres. Pour cela prend comme point de départ  $x_0 = 1$  puis on calcule la valeur suivante à partir de la définition de  $\varphi$  :

$$x_1 = 1 + \frac{1}{x_0} = 2$$

Si l'on réitère le procédé on obtient la suite de valeurs fractionnaires suivante :

$$\frac{1}{1}, \frac{2}{1}, \frac{3}{1}, \frac{5}{2}, \frac{8}{3}, \frac{13}{5}, \frac{21}{8}, \frac{34}{13}, \frac{55}{21}, \frac{89}{34}, \frac{144}{55}, \frac{233}{89}, \frac{377}{144}, \dots$$

Dans cette suite les numérateurs et les dénominateurs croissent comme la suite de Fibonacci. Cela montre que pour la suite

de Fibonacci, lorsque le nombre de générations augmente, le rapport entre la population et la population précédente tend vers le nombre d'or :

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{u_n}{u_{n-1}} = \varphi$$

La suite de Fibonacci et le nombre d'or sont donc intimement liés.

## Pourquoi le nombre d'or intéresse-t-il le mathématicien ?

Tout nombre réel positif  $x$ , peut s'écrire de façon unique:

$$x = a_0 + 1/(a_1 + 1/(a_2 + 1/(a_3 + 1/(a_4 + 1/(a_5 + \dots$$

où les  $a_i$  sont des entiers positifs ;

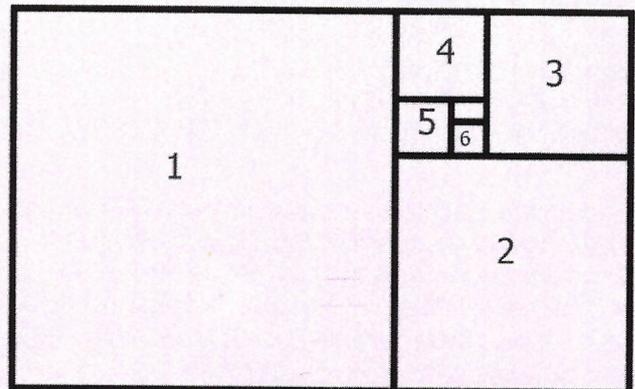
Pour le nombre d'or,  $\varphi$ ,

$$\varphi = 1 + 1/\varphi = 1 + 1/(1 + 1/(1 + 1/(1 + 1/(1 + \dots$$

autrement dit tous les nombres  $a_i$  sont égaux à 1 et donc **les plus petits possibles**, ce qui fait de  $\varphi$  un nombre singulier

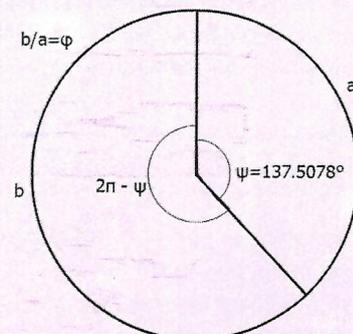
## Le rectangle d'or

Si l'on considère un rectangle de cotés  $a$  et  $b$  tel que leur rapport soit égal au nombre d'or, ce rectangle, dit rectangle d'or, possède une forme harmonieuse en étant ni trop large ni trop étroit. Les écrans des téléviseurs  $16/9=1.78$  sont d'ailleurs voisins de cette proportion. Si à ce rectangle on enlève un carré de côté  $a$  on obtient un nouveau rectangle d'or plus petit. Si l'on réitère ce processus jusqu'à l'infini on obtient une succession infinie de carrés disposés en spirale :



Le rectangle d'or

## L'angle d'or



Si l'on divise la circonférence d'un cercle en deux arcs de longueurs  $a$  et  $b$  selon le nombre d'or on obtient l'angle d'or :  $\psi = 137.50776405^\circ$ , en effet, les arcs étant proportionnels aux angles :

$$\frac{b}{a} = \frac{2\pi - \psi}{\psi} = \varphi \quad \text{d'où :}$$

$$\psi = \frac{2\pi}{\varphi + 1} = 2.400 \text{ rd} \quad \text{soit encore :}$$

$$\psi = \frac{360}{\varphi + 1} = 137.5077^\circ$$



# CANOPÉES : LA VIE DES CIMES

**BRUNO CORBARA**

*Maître de conférences, Laboratoire Microorganismes CNRS, UMR 6023 Université Blaise Pascal*

*La direction de Biofutur, mensuel européen de biotechnologie, nous a autorisé à reproduire l'article suivant, qui reprend la conférence de B. Corbara faite à l'Adasta courant décembre 2011*

*Au cours des dernières décennies, la canopée a fait l'objet d'un engouement scientifique qui a permis d'améliorer les connaissances sur cette partie haute de la forêt située à l'interface entre biosphère et atmosphère, et sur son rôle dans nombre de processus écologiques. Pour appréhender au mieux ce milieu qui demeure très difficile d'accès, des chercheurs ont mis au point des techniques et des outils originaux... et parfois spectaculaires.*

La canopée est un des derniers milieux naturels à avoir reçu la visite des scientifiques. Un certain nombre de précurseurs, non satisfaits par des investigations limitées à quelques mètres au-dessus du sol forestier, ont ouvert la voie à l'étude scientifique moderne de cette partie haute des forêts. Ainsi, en 1926, sur l'île de Barro Colorado, au Panama, le zoologiste américain Warder Clyde Allee, de l'université de Chicago, réalisa les premières mesures microclimatiques au sommet d'un arbre de forêt humide. Quelques années plus tard, en Guyane Britannique (actuel Guyana), les participants d'une expédition organisée par l'université d'Oxford construisirent une plate-forme dans les hautes branches d'un arbre et y installèrent des pièges pour capturer insectes, oiseaux et petits mammifères. Dans les années 1940, l'entomologiste français Renaud Paulian se fit construire, à l'aide de cordes et de poulies, un ascenseur lui permettant d'atteindre ce qu'on appelait alors la « voûte forestière », pour y récolter des insectes.

C'est cependant au cours des années 1970 qu'ont été mis au point la plupart des outils et des méthodes d'accès qui ont permis, dès la décennie suivante, aux recherches sur les canopées de prendre leur véritable essor. En divers points de la planète, des chercheurs de disciplines très variées se sont alors mis à grimper à la cime des arbres à l'aide de cordes et de poignées d'escalade, à installer des tours et des grues en forêt, à survoler les sommets des arbres à bord d'engins plus légers que l'air ou à scruter les cimes de plus haut encore, à travers l'oeil de caméras satellitaires. Toutes ces techniques, utilisées à plus ou moins grande échelle, ont contribué à une meilleure connaissance du milieu canopéen, des êtres vivants qui le constituent et qui y interagissent, et ont permis une meilleure appréhension de son importance dans le fonctionnement global des écosystèmes forestiers.

Ce sont les canopées des forêts tropicales qui ont d'abord attiré l'attention. De nos jours encore, elles restent les plus étudiées, sans doute pour leur étonnante biodiversité mais aussi parce qu'elles contrastent fortement avec les sous-bois qu'elles ombragent, même si les canopées des forêts tempérées ont fait – et font encore – l'objet d'études riches d'enseignements, en particulier dans le domaine des interactions entre biosphère et atmosphère.

## Qu'est-ce que la canopée ?

La langue anglaise utilise depuis longtemps le terme de « canopy » dans des contextes variés qui renvoient toujours à la notion de structure ou de surface qui recouvre<sup>\*1</sup>. Le mot « canopée » existe en revanche depuis peu de temps dans la langue française, où son usage s'est imposé en même temps que l'intérêt récent des scientifiques et du public pour ce milieu. À quoi la canopée correspond-elle précisément ? Si l'on se base sur les acceptions variées du terme rencontrées dans la littérature scientifique, la canopée

semble aussi problématique à définir qu'elle est difficile à appréhender physiquement. Ainsi, selon que l'on s'intéresse aux processus biochimiques permettant aux plantes de produire des substances à usage médical potentiel ou à l'éthologie des fourmis arboricoles, la canopée ne correspondra pas à la même « épaisseur de forêt ». Dans le premier cas, on considérera la canopée comme la couche très haute de la couronne des arbres, celle où les feuilles sont soumises au plus fort rayonnement solaire et où les processus photochimiques et les métabolismes associés sont les plus intenses. Dans le second cas, on désignera sous ce terme l'ensemble plus vaste du milieu arboricole (la totalité des branches et des feuilles) qui est caractérisé par des contraintes spécifiques en termes de déplacement dans l'espace.

Dans une tentative de normalisation sémantique, l'entomologiste américain Mark Moffet a proposé une définition plus extensive encore : pour lui, la canopée correspond aux « organes végétaux situés au-dessus du sol au sein d'une communauté », le terme valant dès lors aussi bien pour une pelouse, une prairie ou un tapis de mousses que pour une forêt (1). Dans les lignes qui suivent, l'acception du terme sera très large mais il ne sera question que de canopées forestières.

## La canopée, milieu extrême

Une façon de définir la canopée est de l'opposer à d'autres strates de la forêt. Ainsi les caractéristiques biotiques et abiotiques varient fortement entre la canopée et le sous-bois (2,3). Ceci est d'autant plus vrai que les latitudes sont basses et que la hauteur des arbres est grande.

De façon générale, dans une forêt tropicale, si les conditions de température et d'humidité relative restent assez stables en sous-bois, leurs fluctuations au niveau de la canopée sont très importantes. La partie haute de la canopée, directement soumise au rayonnement solaire, capte une grande partie de l'énergie dispensée. La quantité de lumière qui pénètre au niveau du sous-bois ne correspond plus qu'à 1 ou 2 % de cette valeur initiale. En termes de rayonnement, c'est aussi la haute canopée qui capte l'essentiel des rayons ultraviolets. C'est également la partie de la forêt soumise au contact direct avec la pluie et qui subit les mouvements d'air les plus violents. Par ailleurs, alors que la condensation nocturne qui provoque la formation de brouillards est fréquente en canopée tropicale, elle est généralement absente en sous-bois.

Les végétaux qui sont soumis aux conditions de haute canopée présentent des adaptations morpho-anatomiques et physiologiques qui reflètent ces conditions de vie extrêmes. Ainsi, leur feuillage est-il très différent de celui du sous-bois correspondant. Il présente en fait de nombreux caractères communs avec celui des arbustes du maquis méditerranéen : les feuilles sont petites, épaisses et résistent à la dessiccation.

\*1 Du grec konopeion désignant une moustiquaire installée au-dessus d'un lit

(1) Moffett MW (2000) *Biotropica* 32, 569-96

(2) Ozanne CMP et al. (2003) *Science* 301,183-6

(3) Lowman MD, Rinker IIB (eds.) (2004) *Forest canopies*. Elsevier, 517 pp.



© B. LUMBANA

La grue de la forêt de San Lorenzo, près du Canal de Panama.

La quantité d'énergie reçue au niveau de la canopée permet un niveau de photosynthèse très élevé et donc une productivité végétale très importante. Cela se traduit par un index de surface foliaire<sup>2</sup> très élevé mais aussi par une quantité de bourgeons, de fleurs et de fruits plus importante qu'en sous-bois. En conséquence, les herbivores, en particulier les insectes, qui trouvent une nourriture plus riche et plus abondante en canopée, y prolifèrent. En canopée, les plantes doivent donc davantage se protéger contre les prédateurs. Une partie de l'énergie disponible est ainsi utilisée par celles-ci pour produire des métabolites dont un grand nombre ont des propriétés défensives. On comprend dès lors pourquoi la canopée est considérée comme un réservoir potentiel de molécules à usage pharmaceutique.

Les canopées tropicales sont un lieu de grande diversité végétale et animale, et, par conséquent, le siège de nombreuses interactions entre les deux règnes. Certaines d'entre elles, comme la pollinisation, sont fondamentales pour les arbres qui structurent la forêt. Enfin, la canopée forestière, avec l'ensemble du feuillage qu'elle constitue, est le lieu par excellence des échanges gazeux entre la biosphère et l'atmosphère. Certains de ces échanges, indispensables aux plantes, sont bien connus et interviennent notamment dans la respiration et la fonction chlorophyllienne.

Mais une forêt émet également de nombreux composés volatils dont on commence seulement à découvrir l'importance (encadré).



© B. CORBARA

Le Radeau des cimes (ici dans sa dernière version ; le « Solvin-Bretzel ») permet l'accès d'une petite équipe scientifique à la canopée. Cette structure gonflable est transportable par ballon dirigeable.

## Canopée et climat d'Amazonie

La forêt amazonienne jouerait un rôle majeur dans la dynamique climatique régionale, entre autres via la production de composés organiques volatils (COV). Dans ses grandes lignes, le processus est le suivant. L'influence océanique sur l'Amazonie se fait par l'arrivée de masses d'air provenant de la partie équatoriale de l'Atlantique et pénétrant sur le continent par le nord. Chargées d'humidité, ces dernières constituent la source de vapeur d'eau qui permet les chutes de pluies sur les zones proches du littoral. Selon la saison humide ou sèche, la canopée intercepte de 12 à 25 % de la pluie qui tombe, cette eau étant ensuite restituée à l'atmosphère par évaporation. Par ailleurs, la présence de la forêt rend le sol poreux. L'eau qui parvient à sa surface s'y infiltre ce qui permet d'alimenter les racines qui absorbent 40 % de la pluie. Les plantes restituent cette eau par le biais de la transpiration des feuilles qui a lieu, essentiellement, au niveau de la canopée.

Ainsi, globalement, la couverture forestière amazonienne représente une énorme surface d'évapotranspiration qui fait que les masses d'air restent humides alors qu'elles continuent de migrer vers l'ouest. Par ailleurs, le feuillage des arbres en canopée produit une grande variété de COV, en particulier des molécules d'isoprène dont on a montré récemment qu'elles forment, à la suite de leur photooxydation, des aérosols\*. Des noyaux de condensation de nuage se forment alors à partir de ces derniers. Des pluies sont à nouveau produites plus à l'ouest, selon un régime toujours abondant. De cette façon, des masses d'air humide voyagent sur plus de 4 000 km au-dessus du tapis vert amazonien, selon ce cercle vertueux de production de pluies, jusqu'à d'atteindre les Andes. À travers des processus qui ont lieu à l'échelle microscopique, au niveau des feuilles, la canopée de la forêt est donc en partie, à l'échelle macroscopique, à l'origine d'un climat qui lui est favorable. Si l'impact du climat sur la forêt, sur sa possible présence en un lieu et sur son évolution était trivial, l'influence que peut avoir en retour la présence d'une forêt sur le climat était moins évidente. On voit donc quelles seraient les conséquences dramatiques d'une déforestation encore plus intense de la sylve amazonienne.

\* Claeys M et al. (2004) Science 303, 1173-6

### Techniques d'étude et moyens d'accès à la canopée

L'étude de la canopée et celle des êtres vivants qui la composent repose, selon les questions posées, sur le recueil d'informations et la collecte d'échantillons. Les informations sont obtenues par le biais d'instruments disposés à plus ou moins grande distance, voire installés *in situ*. La collecte d'échantillons est parfois effectuée à distance, mais plus généralement sur place.

Quelques données parcellaires sur les canopées ont été recueillies avant que l'on invente des techniques pour y accéder grâce à l'observation à distance depuis le sol. Elle peut aussi se faire par le dessus, avec des moyens modernes d'imagerie, en utilisant notamment des satellites.

<sup>2</sup> Rapport de la surface du feuillage à la superficie du sol correspondant.

<sup>3</sup> Celle-ci n'a fonctionné que de 1995 à 2000

La fumigation par insecticide (*fogging*) est une méthode originale de collecte à distance. Le chercheur ne monte pas capturer les arthropodes mais les fait descendre à lui, en masse, en projetant en hauteur un nuage d'insecticide avec une sorte de bazooka. Grâce à cette technique, la diversité exceptionnelle du milieu canopéen a été exposée au grand jour. Mais c'est avec la mise au point de moyens permettant aux chercheurs d'accéder physiquement à la canopée, et dans une certaine mesure de s'y déplacer dans les trois directions de l'espace, que les recherches y ont fait globalement le plus de progrès (4).

### Évoluer en canopée

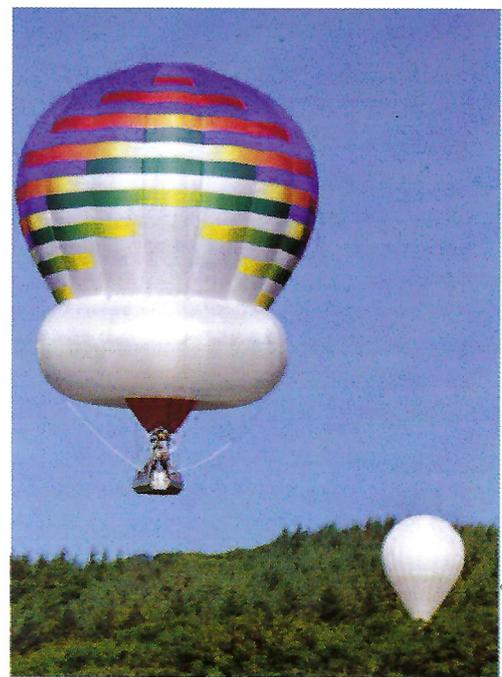
Les techniques d'escalade dérivées de la spéléologie (*single rope technique*) sont actuellement le mode d'accès à la canopée le plus répandu. Avantages principaux, un faible coût et le fait pour un chercheur de pouvoir monter seul, même si elles requièrent tout de même savoir-faire et bonne condition physique. De nos jours, quelques universités dispensent des « *canopy courses* » qui intègrent des formations pratiques d'escalade.

L'installation de dispositifs d'accès fixe « en dur » devient intéressante dès que l'on souhaite conduire des études à moyen ou à long terme sur un même site. Ceux-ci se déclinent sous la forme de plates-formes, passerelles, échafaudages, tours ou grues de construction, ces deux dernières options ayant véritablement révolutionné l'étude des canopées. Si les tours ne permettent d'atteindre qu'une partie limitée de feuillage et sont plutôt adaptées à l'installation d'instruments de mesure, les grues permettent quant à elles l'accès à un volume important de forêt. Qui plus est, les chercheurs installés dans une nacelle peuvent y travailler dans des conditions autrement plus confortables que suspendus à une corde. La première grue dédiée à l'étude des canopées forestières a été installée au Panama en 1997, sous l'égide du *Smithsonian Tropical Research Institute*. Il en existe actuellement une dizaine en activité sur la planète (5). Un des inconvénients des grues est qu'on ne peut aisément les déplacer, même si deux d'entre elles – l'une au Venezuela<sup>43</sup> et l'autre près de Leipzig, en Allemagne – sont montées sur quelques dizaines de mètres de rails, ce qui, au mieux, triple leur surface opérationnelle.



La luge des cimes (ci-dessus) permet d'emporter trois chercheurs en utilisant le ballon porteur du radeau des cimes. Parc de Masoala, Madagascar, 2001.

(4) Mitchell A et al. (eds.) (2002) *The global canopy handbook. Techniques of access and study in the forest roof*. GCP, 248 pp.  
 (5) Basset Y et al. (ed.) (2003) *Studying forest canopies from above : the International Canopy Crane Network*. UNEP, Panamerica Ed., 196 pp.  
<sup>43</sup> Solvin (groupe Solvay) étant son sponsor et fabricant.  
<sup>45</sup> Ballon mixte gonflé à l'hélium et à l'air chaud.



© E. BOÏTIER

L'arboglisser, engin mixte (rozière) à air chaud et à hélium, héritier de la luge des cimes. À l'arrière plan, la bulle des cimes. Forêt de la Comté d'Auvergne, 2008.

### Des moyens mobiles

Une autre approche, complémentaire, consiste à multiplier le nombre de sites étudiés et d'y travailler sur des périodes relativement brèves. Dans cette perspective, sont utilisés des engins volants opérant juste au-dessus de la canopée ou permettant de se poser à sa surface. Ce mode opératoire est une spécialité française puisque la quasi totalité des engins mobiles d'accès à la canopée ont été mis au point et utilisés dans le cadre d'expéditions scientifiques internationales et pluridisciplinaires d'initiative hexagonale : les missions dites Radeau des cimes et leurs héritières. Le radeau des cimes, *stricto sensu*, est un dispositif amovible posé au sommet de la canopée qui permet à quelques chercheurs d'évoluer et de travailler simultanément. Sa dernière version est constituée de boudins en PVC, gonflés et agencés selon une forme de bretzel (d'où son appellation de « Solvin-Bretzel »<sup>44</sup>), et d'un filet offrant 400 m<sup>2</sup> de surface praticable (photo page 16).

Le radeau des cimes est usuellement transporté à l'aide d'un ballon dirigeable à air chaud, puis déposé et arrimé sur le site choisi. Pendant quelques jours, ce laboratoire suspendu recevra la visite des chercheurs, l'accès se faisant par des techniques d'escalade classiques.

D'autres engins sont nés dans le même esprit (voir photo), comme la luge des cimes, sorte de mini radeau déplacé par le même ballon dirigeable. Elle permet à deux chercheurs embarqués d'effectuer des collectes à la cime des arbres, de déposer des pièges, etc., sur tout le rayon d'action de l'aérostat. La bulle des cimes est un ballon captif de 210m<sup>3</sup>, gonflé à l'hélium, qui se déplace le long d'une corde préalablement disposée sur la canopée. L'utilisateur est installé dans un siège suspendu sous le ballon et, à la force des bras ou à l'aide d'une poignée d'ascension, se déplace le long de la ligne. L'arboglisser, dernier-né de la série, est directement dérivé de la luge des cimes, la nacelle emportant les chercheurs étant portée par une rozière<sup>45</sup>.

Outre leurs contributions à la recherche fondamentale, ces moyens très spectaculaires et par là très médiatiques, ont fortement contribué à faire connaître les canopées au grand public.

## Des outils aux programmes

Au-delà des outils et des techniques, c'est à travers des programmes à grande échelle que les recherches sur les canopées forestières sont amenées à faire progresser les connaissances.

Dans cette optique, les quelques stations d'étude de la canopée érigées autour d'une grue se sont regroupées en réseau<sup>6</sup> pour tenter d'harmoniser certains programmes de recherches (5). De même, des programmes de suivi botanique et entomologique de parcelles forestières permanentes, intégrant des relevés en canopée, se mettent progressivement en place<sup>7</sup>. Pour ce qui concerne les interactions forêt-atmosphère, le réseau Fluxnet<sup>8</sup> coordonne les résultats obtenus par des dizaines de tours à flux<sup>9</sup> réparties sur la planète.

Les missions IBISCA<sup>10</sup>, héritières directes des missions Radeau

## Les missions IBISCA

IBISCA-Panama, qui s'est déroulé en 2003-2004, est un programme de recherche ayant pour objectif de quantifier les variations horizontales, verticales et temporelles (saisonnnières) de la répartition des arthropodes dans une forêt tropicale humide. Une grande partie des collectes ont été effectuées en canopée. Les différentes techniques de récolte ont été activées sur 12 sites standards de 400 m<sup>2</sup> où la végétation avait préalablement fait l'objet d'un inventaire précis (identification de tous les arbres). Ces techniques, qui ciblent des arthropodes ayant des modes de vie respectifs différents, s'appliquent selon les cas à différents niveaux de la forêt. Seules quatre concernaient uniquement le niveau du sol ou du sous-bois : le tamisage de litière (1), les pièges à trappe (4) pour la capture des arthropodes rampants au niveau du sol, les grands pièges d'interception en vol (12) et les Pièges Malaise (14) pour les insectes volants en sous-bois. Toutes les autres techniques s'appliquaient à la faune de la canopée :

(3) Collecte à vue des insectes sociaux : fourmis et termites ont été collectés, du sol à la canopée, selon plusieurs transects, incluant l'inspection des branches, du bois mort et des accumulations de litière.

(5) Fumigation de la canopée : les arthropodes soumis à un nuage d'insecticide tombent sur des bâches en plastique disposées au sol.

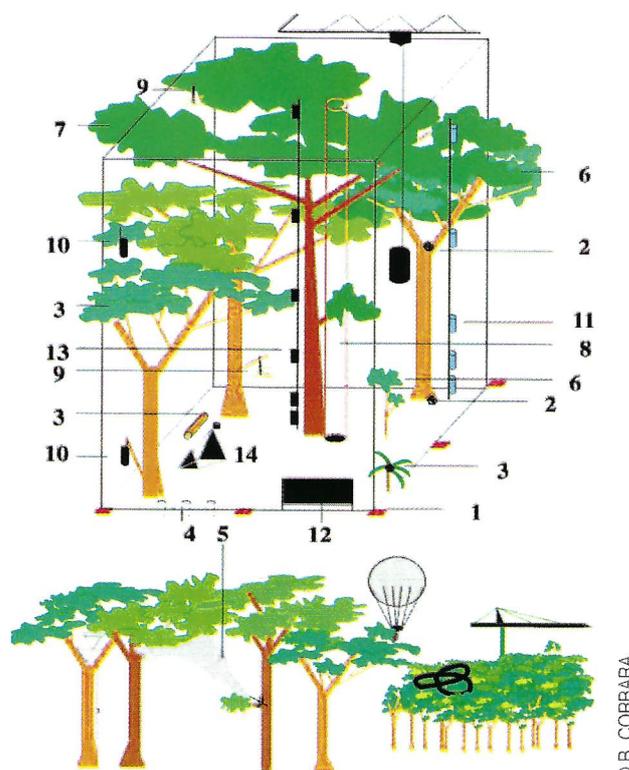
(6) Battage de la végétation et des branches mortes : cette méthode permet, en le frappant à l'aide d'un bâton, de récupérer, sur un carré de tissus de 1m<sup>2</sup>, les arthropodes qui vivent sur le feuillage.

(7) Pièges à appâts : cette méthode permet de capturer des hyménoptères pollinisateurs (euglosses, mélipones) en les attirant avec un appât odorant.

(8) Collecte des galles et herbivorie : ce programme a pour objectif d'échantillonner les galles et de quantifier l'impact des insectes herbivores sur le feuillage, le long de transects à la fois horizontaux et verticaux.

des cimes, sont des initiatives qui vont dans le même sens (voir encadré). Leur mode opératoire implique la collaboration de chercheurs réunis, au-delà de leurs problématiques propres relatives à l'étude d'un aspect de la biodiversité, pour apporter une réponse à une ou quelques questions posées quant à la structuration des communautés d'êtres vivants au sein de l'écosystème forestier étudié. Cette approche à grande échelle implique le déroulement coordonné d'un nombre très important de programmes de collecte d'échantillons et de données, et une analyse coordonnée des résultats (6,7).

Après le temps des pionniers, qui n'y ont fait que des incursions très discrètes, les canopées forestières sont donc devenues l'objet d'expéditions et de programmes de suivi de grande envergure. Elles demeurent néanmoins un milieu très difficile d'accès, où les déplacements restent peu aisés.



(9) Insectes xylophages : cette technique se base sur l'attraction des femelles pondueuses d'insectes xylophages (qui se nourrissent de bois) à l'aide d'appâts appropriés (petits fagots de bois appartenant à une quinzaine d'essences différentes).

(10) Pièges lumineux : ces pièges attirent les insectes nocturnes et les emprisonnent. Les taxons cibles sont ici les papillons de nuit.

(11) Petits pièges d'interception en vol : les insectes volants heurtent ces petits pièges (surface d'interception de 0,55 m<sup>2</sup>) en plexiglass et sont récupérés à leur base.

(13) Pièges collants : ces petits pièges qui présentent une double face collante sont attractifs du fait de leur couleur jaune vif. Ils permettent la capture de petits insectes volants.

(6) Basset Y et al. (2007) Bull Inst Roy Sc Nat Belg 77, 39-69

(7) Corbara B (2004) Insectes 133, 3-7

<sup>6</sup> International Canopy Crane Network

<sup>7</sup> C'est le cas du programme CTFS-SIGEO piloté par le Smithsonian Institute. [www.ctfs.si.edu](http://www.ctfs.si.edu)

<sup>8</sup> [www.fluxnet.ornl.gov](http://www.fluxnet.ornl.gov)

<sup>9</sup> Observatoires micrométéorologiques mesurant les flux d'énergie, d'eau et de CO<sub>2</sub> à l'interface forêt-atmosphère

<sup>10</sup> Inventaire de la biodiversité du sol à la canopée



# L'ARC-EN-CIEL

## OBSERVATIONS ET MODÉLISATIONS

### DE LA THÉORIE GÉOMÉTRIQUE DE DESCARTES ET NEWTON

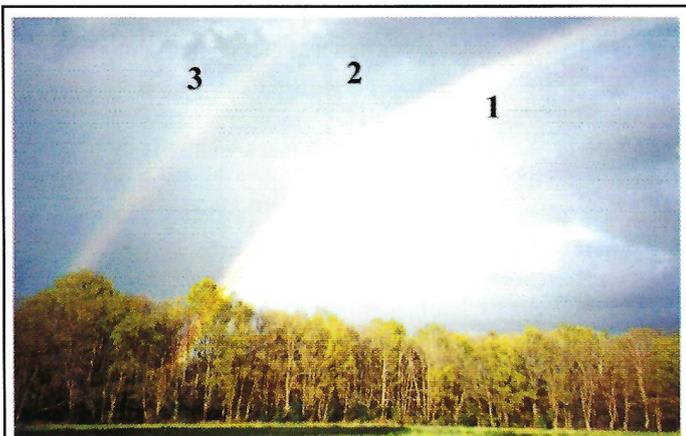
### À LA THÉORIE DU MOMENT CINÉTIQUE COMPLEXE.

**SYLVAIN HOUARD**

Ancien chercheur au Commissariat à l'Énergie Atomique

Professeur de physique en classes préparatoires (section PSI) au lycée Saint-Louis à Paris

## 1. INTRODUCTION



**Figure 1 :** Arcs-en-ciel primaire et secondaire.

**1 :** Arc-en-ciel primaire **2 :** Bande sombre d'Alexandre

**3 :** Arc-en-ciel secondaire © Béatrice Sandré

L'arc-en-ciel est un des phénomènes lumineux les plus spectaculaires et les plus couramment observés. Ses caractéristiques principales sont les suivantes (figure 1) :

**1** il est observé en fin d'après midi ou en début de matinée, l'observateur tournant le dos au Soleil ; selon les circonstances, un ou deux arcs de cercles colorés sont alors visibles ;

**2** le premier arc, situé le plus bas dans le ciel et observé sous un angle moyen de  $42^\circ$  est appelé **arc primaire**. Il montre une décomposition de la lumière solaire similaire à celle observée dans un prisme, du rouge à l'extérieur au bleu à l'intérieur ;

**3** le second arc, situé un peu plus haut dans le ciel et observé sous un angle moyen de  $51^\circ$  est appelé **arc secondaire**. Il est nettement moins lumineux que le premier, et plus rarement visible. L'ordre des couleurs y est inversé ;

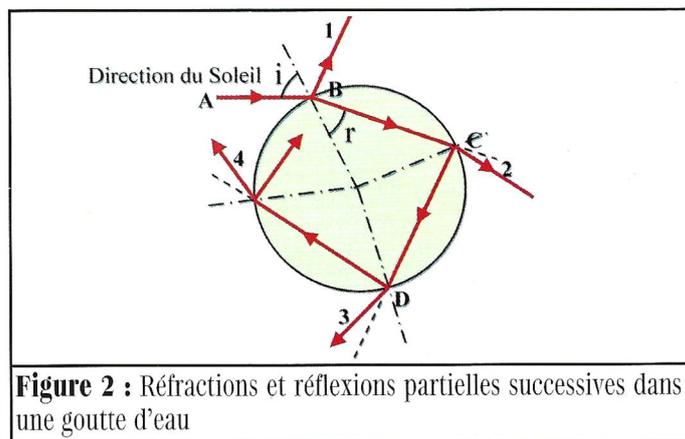
**4** la luminosité du ciel est beaucoup plus faible dans la zone située entre les deux arcs - appelée **bande sombre d'Alexandre** - et plus forte en dessous de l'arc primaire ;

**5** quelques arcs pâles alternativement verts et roses - appelés arcs surnuméraires - sont parfois observés juste en dessous de l'arc primaire (figure 10).

Phénomène connu depuis la nuit des temps, l'arc-en-ciel n'a trouvé d'explication physique exhaustive qu'à la fin du XX<sup>e</sup> siècle, avec notamment la « théorie du moment cinétique complexe » de H. Moysès Nussenzveig. Au fil des siècles, des théories de plus en plus élaborées et précises ont permis de tendre vers une compréhension de plus en plus complète de ce phénomène universel.

## 2. PREMIÈRES APPROCHES HISTORIQUES

Dès l'Antiquité, le philosophe grec Aristote (384-322 av J.C.) s'interroge sur l'origine physique de l'arc-en-ciel, sur l'ordre des couleurs et sur sa forme en arc de cercle. Il émet l'hypothèse - incorrecte - que le phénomène résulte de réflexions sur les nuages. Il comprend cependant que l'arc-en-ciel possède un axe de révolution autour de la direction Soleil-observateur et qu'il ne présente pas de localisation précise dans le ciel. Il faut attendre 1266 pour que le moine franciscain Roger Bacon (vers 1214-1294) détermine précisément à l'aide d'un astrolabe le rayon angulaire - égal à  $42^\circ$  - de l'arc-en-ciel primaire.

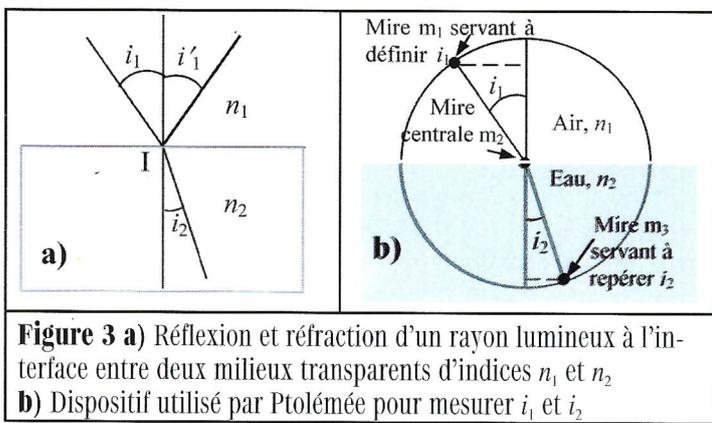


**Figure 2 :** Réfractions et réflexions partielles successives dans une goutte d'eau

En 1304, le moine allemand Théodoric de Freiberg émet l'hypothèse que chaque goutte d'eau est capable de créer son propre arc-en-ciel. Il entreprend une série d'expériences systématiques avec une fiole de verre sphérique remplie d'eau et met en évidence le trajet des rayons lumineux qui contribuent aux arcs primaire et secondaire (figure 2). Les premiers subissent une réfraction à l'entrée de la goutte, une réflexion sur la face arrière et une réfraction à la sortie (rayons de type 3). Les seconds subissent deux réflexions internes (rayons de type 4). Si l'origine physique de l'arc-en-ciel est désormais comprise, il faudra attendre le XVII<sup>e</sup> siècle pour que René Descartes retrouve par le calcul la valeur de  $42^\circ$  du rayon angulaire de l'arc primaire.

## 3. LOI DE LA RÉFRACTION

Pour modéliser l'arc-en-ciel, il est indispensable de connaître les lois de la réflexion et de la réfraction de la lumière à l'interface entre deux milieux transparents d'indices  $n_1$  et  $n_2$  (figure 3a). La première, qui exprime l'égalité des angles d'incidence et de réflexion,  $i_1 = i_2$ , est connue depuis l'Antiquité. La seconde, qui relie les angles d'incidence  $i_1$  et de réfraction  $i_2$  - mesurés par rapport à la normale à la surface de séparation - ne fut découverte puis démontrée qu'au XVII<sup>e</sup> siècle. Les premières mesures précises des angles de réfraction (et de réflexion) furent réalisées vers 150 après J.-C., par Claude Ptolémée, astronome, géographe et mathématicien de l'École d'Alexandrie.



**Figure 3 a)** Réflexion et réfraction d'un rayon lumineux à l'interface entre deux milieux transparents d'indices  $n_1$  et  $n_2$   
**b)** Dispositif utilisé par Ptolémée pour mesurer  $i_1$  et  $i_2$

Grâce à un dispositif constitué d'un disque gradué en cuivre immergé à moitié dans l'eau, et à une technique d'alignement visuel utilisant trois mires (figure 3b)<sup>1</sup>, Ptolémée obtient des tables de mesures de  $i_1$  et  $i_2$  qui serviront de référence pendant plus de dix siècles (table 1, colonnes 1 et 2). Il constate que l'importance de la réfraction dépend de la densité respective des deux milieux, mais n'en tire aucune loi quantitative.

Table 1 :

| Mesures de Ptolémée, interface air-eau |             |                                  | Valeurs théoriques |                    |
|--|-------------|----------------------------------|--------------------|--------------------|
| $i_1$ (deg)                            | $i_2$ (deg) | $\Delta i_2 = i_{2n} - i_{2n-1}$ | $i_{2corr}$ (deg)  | $\Delta i_{2corr}$ |
| 10                                     | 8           | -                                | 7°29'              | -                  |
| 20                                     | 15,5        | 7,5                              | 14°52'             | 7°23'              |
| 30                                     | 22,5        | 7                                | 22°08'             | 7°06'              |
| 40                                     | 29          | 6,5                              | 28°48'             | 6°40'              |
| 50                                     | 35          | 6                                | 35°03'             | 6°15'              |
| 60                                     | 40,5        | 5,5                              | 40°29'             | 5°26'              |
| 70                                     | 45,5        | 5                                | 44°47'             | 4°18'              |
| 80                                     | 50          | 4,5                              | 47°35'             | 2°48'              |

N.B : dans les colonnes  $i_{2corr}$  et  $\Delta i_{2corr}$  sont indiquées les valeurs théoriques obtenues avec la loi exacte de la réfraction, pour  $n_2 = 1,334$  et pour une longueur d'onde moyenne  $\lambda = 570$  nm.

Pendant tout le Moyen Âge, aucune avancée significative n'est réalisée. Au tout début du XVII<sup>e</sup> siècle, l'astronome allemand Johannes Kepler (1571-1630) réalise l'importance de prendre en compte la réfraction atmosphérique pour une exploitation précise des observations astronomiques. Il étudie l'optique et cherche à exprimer mathématiquement la loi de la réfraction. Dans son ouvrage *Ad Vitellionem Paralipomena* (1604), il émet l'hypothèse centrale suivante : «le rapport des densités de deux milieux est proportionnel au rapport trigonométrique de deux segments intervenant dans la représentation géométrique du rayon réfracté et reliés respectivement à l'angle d'incidence et à l'angle de réfraction». À partir d'un dessin représentant trois rayons incidents et trois rayons réfractés correspondants, il explore 11 rapports possibles et en tire différentes relations mathématiques entre  $i_1$  et  $i_2$ , dont quatre sont indiquées table 2. Cependant, il passe à côté de la bonne ligne trigonométrique et ne trouve pas la formulation correcte de la loi.

Table 2

$$\tan i_2 = \sin(i_1 - i_2) \quad (1) \quad \tan i_1 = k \tan i_2 \quad (2)$$

$$i_1 - i_2 = m i_1 + \ell \sec i_2 \quad (3) \quad i_1 - i_2 = k i_1 \sec i_2 \quad (4)$$

où  $\sec = 1/\cos$  et où  $k$ ,  $m$  et  $\ell$  sont des paramètres.

Plusieurs raisons peuvent expliquer son échec en dépit d'une hypothèse centrale pourtant correcte :

- dans sa modélisation, Kepler s'appuie sur la table de réfraction donnée par Witelo vers 1270, identique à celle de Ptolémée (hormis  $i_2 = 7^\circ 45'$  pour  $i_1 = 10^\circ$ ). Or il s'avère que les valeurs des angles de réfraction ont été arrondies pour faire apparaître une progression arithmétique décroissante, pratique courante issue de l'astronomie babylonienne (on comparera les valeurs de  $\Delta i_2$  et  $\Delta i_{2corr}$  obtenues avec les mesures de Ptolémée et avec la loi exacte, table 1). Les données sur lesquelles travaille Kepler sont donc faussées ;

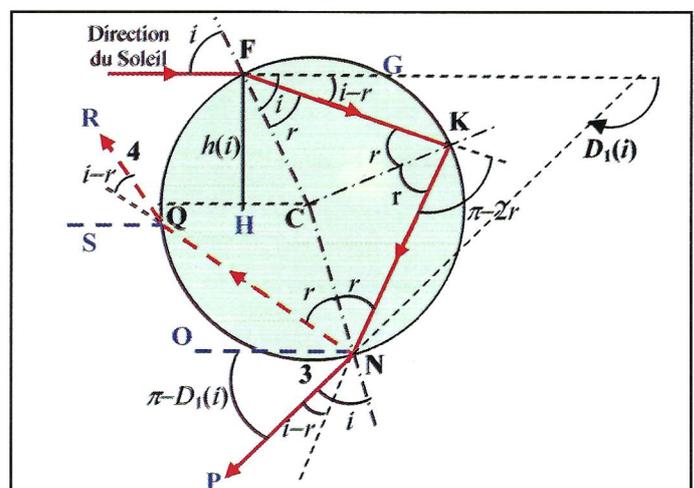
- à l'époque, l'accent est mis sur l'étude de la déviation  $i_1 - i_2$ , comme l'illustrent les formules (1), (3) et (4) ;

- Kepler, constatant que la déviation  $i_1 - i_2$  augmente plus vite que l'angle d'incidence  $i_1$  lui-même, cherche à décomposer celle-ci en une réfraction simple, proportionnelle à  $i_1$ , et en un terme secondaire (formules (3) et (4)).

En 1611, Kepler réalise une avancée essentielle en proposant dans son ouvrage *Dioptrique* une loi linéaire approchée  $i_1 = m i_2$ , compatible avec la formule (4) aux faibles angles d'incidence  $i_1$  - à condition de prendre  $k = 1 - n_1/n_2$ . *Même incomplète, il s'agit là de la première formulation mathématique de la loi de la réfraction.* C'est le mathématicien britannique Thomas Harriot qui semble avoir trouvé le premier la formulation mathématique exacte de cette loi en 1616, en procédant de manière empirique comme Kepler. Il est suivi de peu par le hollandais Snell entre 1621 et 1625. Mais aucun d'eux ne cherche à communiquer sa découverte, et c'est Descartes qui la publie et en fournit le premier une démonstration en 1637, dans sa *Dioptrique* : «Quels que soient les angles d'incidence et de réfraction, le rapport de leurs sinus est toujours égal à une même constante lors de passages de la lumière entre deux milieux donnés». Soit, mathématiquement :  $n_1 \sin i_1 = n_2 \sin i_2$ . Cependant, sa démonstration est fortement critiquée par le mathématicien Pierre de Fermat, qui redémontre cette loi en 1662 à partir d'un principe variationnel. De fait, elle est appelée «loi de Snell» dans les pays anglo-saxons. Nul doute que les travaux de Kepler, lus par Snell et Descartes, auront fourni les bases de cette découverte.

## 4. THÉORIE GÉOMÉTRIQUE DE L'ARC-EN-CIEL

### 4.1 Théorie de Descartes



**Figure 4** Trajet des rayons lumineux dans une goutte d'eau - Calcul de la déviation D

L'étude de l'arc-en-ciel constitue l'oeuvre maîtresse de Descartes en optique. Pourtant peu réputé pour ses talents d'expérimentateur, il reprend méthodiquement les travaux de Théodoric de Freiberg avec la fiole remplie d'eau, mais va plus loin en déterminant pour la première fois par le calcul l'angle d'observation de  $42^\circ$  de l'arc primaire.

<sup>1</sup> Cf. S. HOUARD, *Optique - Une approche expérimentale et pratique*, Éd. de boeck, (Bruxelles, 2011), pages 41 et 42.

Pour y parvenir, il procède comme suit. Le Soleil envoie un faisceau de rayons incidents parallèles sur une goutte d'eau de rayon  $R$ . Chaque rayon est caractérisé par un angle d'incidence  $i$  et par une hauteur d'incidence  $h(i) = R \sin i$  (figure 4).  $h(i)$  varie de 0, si le rayon passe par le centre de la goutte, à  $R$  s'il tangente le sommet ou la base de la goutte.

| LA LIGNE HF | LA LIGNE CI | L'ARC FG     | L'ARC FK     | L'ANGLE ONP  | L'ANGLE SQR  |
|-------------|-------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| 1000        | 748         | 168.30       | 171.25       | 5.40         | 165.45       |
| 2000        | 1496        | 156.55       | 162.48       | 11.19        | 151.29       |
| 3000        | 2244        | 145.04       | 154.04       | 17.56        | 136.08       |
| 4000        | 2992        | 132.50       | 145.10       | 22.30        | 122.04       |
| 5000        | 3740        | 120.00       | 136.04       | 27.52        | 108.12       |
| 6000        | 4488        | 106.16       | 126.40       | 32.56        | 93.44        |
| 7000        | 5236        | 91.08        | 116.51       | 37.26        | 79.25        |
| 8000        | 5984        | 73.44        | 106.30       | 40.44        | 65.46        |
| 8400        | 6283        | 65.44        | 102.09       | 41.26        | 61.43        |
| 8500        | 6358        | 63.34        | 101.02       | 41.30        | 60.32        |
| <b>8600</b> | <b>6432</b> | <b>61.22</b> | <b>99.56</b> | <b>41.30</b> | <b>58.26</b> |
| 8700        | 6507        | 59.04        | 98.48        | 41.28        | 57.20        |
| 8800        | 6582        | 56.42        | 97.40        | 41.22        | 56.18        |
| 9000        | 6732        | 51.41        | 95.22        | 40.57        | 54.25        |
| 9400        | 7031        | 39.54        | 90.38        | 38.38        | 52.00        |
| <b>9500</b> | <b>7106</b> | <b>36.24</b> | <b>89.26</b> | <b>37.32</b> | <b>51.54</b> |
| 9600        | 7180        | 32.30        | 88.12        | 36.06        | 52.06        |
| 9700        | 7255        | 28.08        | 86.58        | 34.12        | 52.46        |
| 10000       | 7480        | 0.           | 83.10        | 13.40        | 69.30        |

Le pas grossier en  $h(i)$  de 1000 à 10000 a été affiné entre 8400 et 8800, et entre 9400 et 9700. Les paramètres des rayons efficaces sont indiqués en rouge. Les notations décimales des angles correspondent en fait à des valeurs sexagésimales (ex. : 41.30 = 41°30').

Descartes applique les lois de la réflexion et de la réfraction et calcule numériquement les déviations angulaires subies par les rayons de type 3 et 4 pour une série croissante de hauteurs  $h(i)$ . Les valeurs obtenues par Descartes sont rassemblées dans la table 3. Les colonnes intitulées «la ligne HF», «l'angle ONP» et «l'angle SQR» représentent respectivement  $h(i)$ ,  $D_{01}(i) = \pi - D_1(i)$  et  $D_{02}(i) = -\pi + D_2(i)$ , ces deux derniers correspondant aux angles d'observation des arcs-en-ciel primaire et secondaire<sup>2</sup>. Descartes prend 10000 pour valeur arbitraire de  $R$ . Il constate que pour les rayons de type 3 et 4, il existe une valeur de  $i$ , donc de  $h(i)$ , pour laquelle les angles  $ONP = \pi - D_1(i)$  et  $SQR = -\pi + D_2(i)$  sont respectivement maximum et minimum (valeurs indiquées en rouge, table 3).

Pour le confirmer, traçons les courbes théoriques correspondantes. Pour cela, il faut exprimer mathématiquement les angles de déviation  $D_1(i)$  et  $D_2(i)$ .  $D_1(i)$  est l'angle de déviation entre la direction d'incidence FG et la direction d'émergence NP d'un rayon de type 3 (figure 4). Lors de la première réfraction en F, le rayon subit une déviation d'un angle  $i - r$ . Lors de la réflexion interne en K, il subit une déviation de  $\pi - 2r$ . Enfin, lors de la deuxième réfraction en N, il subit à nouveau une déviation de  $i - r$ . D'où  $D_1(i) = (i - r) + (\pi - 2r) + (i - r) = 2(i - r) + (\pi - 2r)$ . Pour un rayon subissant  $k$  réflexions internes ( $k = 1, 2, 3, \dots$ ), le principe reste le même. À chaque entrée ou sortie de la goutte, le rayon subit une déviation d'un angle  $i - r$ . À chaque réflexion interne, le rayon subit une déviation de  $\pi - 2r$ . On a donc un angle total de déviation :  $D_k(i) = 2(i - r) + k(\pi - 2r)$ . (1)

<sup>2</sup> Comme on le verra plus loin, un rayon contribuant à l'arc secondaire tombe sur la goutte dans sa partie inférieure et «tourne» dans le sens trigonométrique et non horaire. Pour cette raison, on trace  $-\pi + D_2(i)$  et non  $\pi - D_2(i)$ .

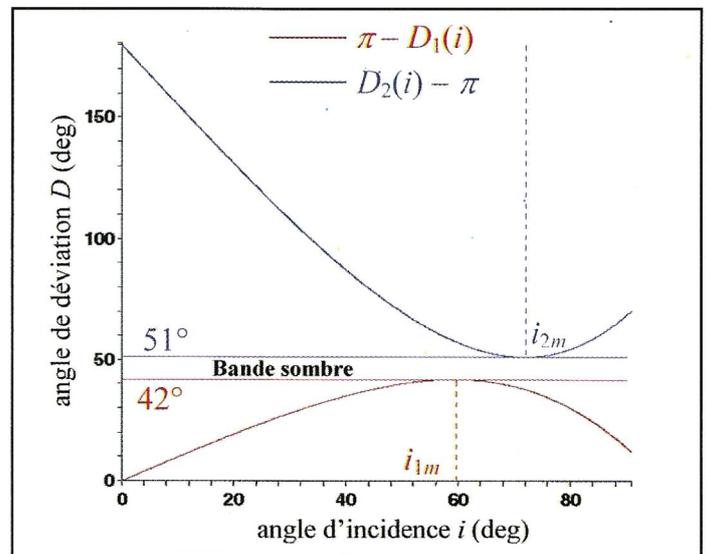


Figure 5 : Courbes théoriques représentant les angles ONP =  $\pi - D_1(i)$  et SQR =  $-\pi + D_2(i)$

Les courbes théoriques de  $D_{01}(i) = \pi - D_1(i)$  et  $D_{02}(i) = -\pi + D_2(i)$ , calculées pour  $n = 1,334$ , sont représentées figure 5.  $D_{01}(i)$  présente une valeur maximale  $D_{01m} = 42^\circ$  pour  $i_{1m} = 59,6^\circ$ , et  $D_{02}(i)$  une valeur minimale  $D_{02m} = 51^\circ$  pour  $i_{2m} = 71,9^\circ$ . Ces valeurs sont en accord avec celles trouvées par Descartes :  $ONP_{max} = 41^\circ 30'$  et  $SQR_{min} = 51^\circ 54'$  (figurées en rouge, table 3). Les rayons correspondants, appelés **rayons efficaces**, ont des hauteurs d'incidence sur la goutte  $h_{1m} = 0,86 R$  (HF = 8600) et  $h_{2m} = 0,95 R$  (HF = 9500). Les angles d'observation  $D_{01}(i)$  et  $D_{02}(i)$  ne varient pas beaucoup au voisinage des rayons efficaces (figure 5 ou table 3). Descartes en conclut que le phénomène d'arc-en-ciel résulte d'une concentration de lumière au voisinage des rayons efficaces, dans des directions égales à  $42^\circ$  (arc primaire) et  $51^\circ$  (arc secondaire). La figure 6 illustre ce phénomène d'accumulation de lumière, appelé **caustique**, dans le cas des rayons de type 3 (arc primaire).

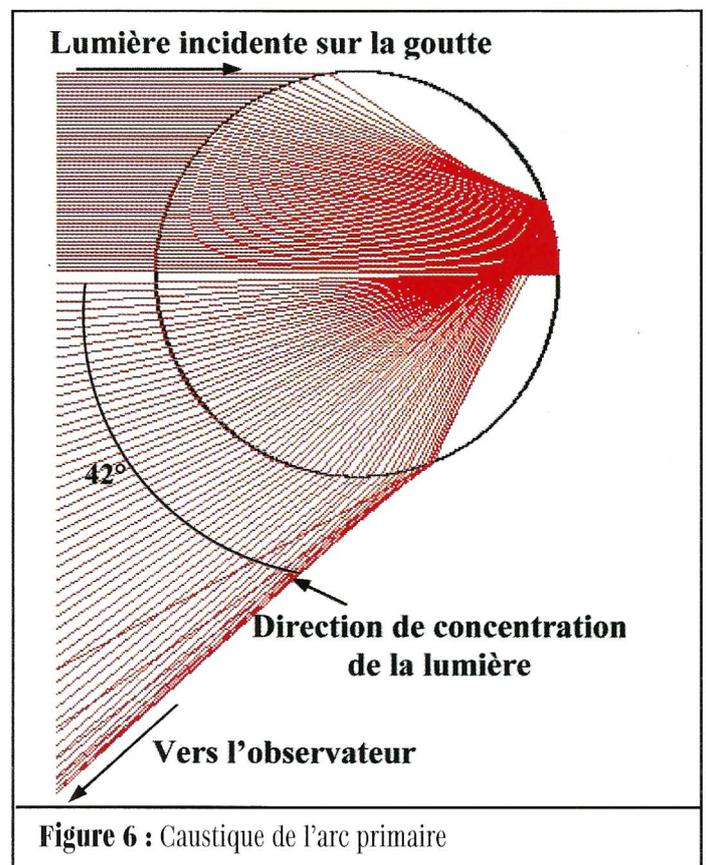


Figure 6 : Caustique de l'arc primaire

## 4.2 Théorie de Newton

La méthode suivie par Descartes est numérique et présente deux défauts majeurs : elle nécessite de lourds calculs et ne permet pas de justifier l'ordre d'apparition des couleurs. À la fin des années 1660, Newton met à profit ses talents de mathématicien<sup>3</sup> et sa théorie de la lumière hétérogène pour fournir une réponse satisfaisante sur ces deux points. Selon sa théorie, les phénomènes colorés résultent non pas de la modification de la lumière homogène, mais de la *séparation ou analyse de la lumière solaire hétérogène en ses différentes composantes* par un milieu dispersif (prisme, goutte d'eau). Newton donne peu de détails de son traitement mathématique de l'arc-en-ciel, excepté dans les *Lectioe Opticae*, recueil posthume (1729) de leçons d'optique données à Cambridge<sup>4</sup> entre 1669 et 1671. Il obtient une formule mathématique unique donnant l'angle d'incidence  $i_{km}$  du rayon efficace pour un arc-en-ciel d'ordre  $k$  quelconque ( $k = 1, 2, 3, \dots$ ) :

$$\cos i_{km} = \sqrt{\frac{n^2 - 1}{k^2 + 2k}} \quad (2)$$

où  $n$  est l'indice de réfraction de la goutte d'eau.

Cette formule permet de prédire mathématiquement les rayons angulaires de  $42^\circ$  et  $51^\circ$  des arcs primaire et secondaire. Sa démonstration est détaillée dans l'encadré, dans un formalisme plus moderne.

### Applications numériques

On prend  $n = 1,334$  pour l'indice de l'eau.

$k = 1$  (arc-en-ciel primaire) :

$$\cos i_{1m} = \sqrt{\frac{(1,334)^2 - 1}{3}} = 0,51, \text{ d'où } i_{1m} = 59,4^\circ \text{ puis}$$

$$h_{1m} = R \sin i_{1m} = 0,86 R, \quad r_{1m} = 40,2^\circ \text{ et}$$

$$D_{01m} = \pi - D_{1m} = \pi - 2(i_{1m} - r_{1m}) - (\pi - 2r_{1m}) = 42^\circ.$$

$k = 2$  (arc-en-ciel secondaire) :

$$\cos i_{2m} = \sqrt{\frac{(1,334)^2 - 1}{8}} = 0,31, \text{ d'où } i_{2m} = 71,8^\circ \text{ puis}$$

$$h_{2m} = R \sin i_{2m} = 0,95 R, \quad r_{2m} = 45,4^\circ \text{ et}$$

$$D_{02m} = -\pi + D_{2m} = -\pi + 2\pi + 2i_{2m} - 6r_{2m} = 51^\circ.$$

Avec un peu de manipulations trigonométriques, on montre que pour l'arc primaire ( $k = 1$ ), l'angle de déviation  $D_{1m}$  peut s'exprimer en fonction du seul indice  $n$  :

$$D_{1m} = D(i_{1m}) = 2 \arccos \left[ \frac{1}{n^2} \left( \frac{4 - n^2}{3} \right)^{\frac{3}{2}} \right]$$

Cependant, l'indice de réfraction  $n$  de l'eau varie avec la température  $\theta$  et avec la longueur d'onde  $\lambda$  des radiations lumineuses : comme le verre, l'eau est un milieu dispersif. Dans le domaine du visible,  $400 \text{ nm} \leq \lambda \leq 700 \text{ nm}$ , et pour une température  $\theta = 20^\circ\text{C}$ ,  $n$  et  $D_{1m}$  décroissent ainsi de  $n_{\max} = 1,3445$  et  $D_{1m,\max} = 139^\circ 34'$  pour  $\lambda = 400 \text{ nm}$  (violet) à  $n_{\min} = 1,3314$  et  $D_{1m,\min} = 137^\circ 41'$  pour  $\lambda = 700 \text{ nm}$  (rouge profond), tandis que l'angle d'observation  $D_{01m} = \pi - D_{1m}$  croît de  $40^\circ 26'$  à  $42^\circ 19'$ .

<sup>3</sup> À la fin du XVII<sup>e</sup> siècle, il crée conjointement avec Leibniz le calcul infinitésimal, domaine des mathématiques qui permet, par un traitement de grandeurs infiniment petites, de calculer les aires contenues sous des courbes d'équation donnée (problème intégral), ou bien de calculer la tangente à une courbe en un point donné (problème inverse de dérivée).

### Démonstration de la formule de Newton

Cherchons l'angle d'incidence  $i_{km}$  qui rende  $D_k(i)$  stationnaire. Mathématiquement, cette situation se produit lorsque la dérivée de  $D_k(i)$  est nulle.

$$\frac{dD_k(i)}{di} = 2 \left( 1 - \frac{dr}{di} \right) - 2k \frac{dr}{di} = 2 \left( 1 - (k+1) \frac{dr}{di} \right) \quad (3)$$

Exprimons la dérivée  $\frac{dr}{di}$  en fonction du seul angle  $i$ .

Pour cela, dérivons par rapport à  $i$  la loi de la réfraction à l'entrée de la goutte :  $\sin i = n \sin r$  d'où

$$\cos i = n \cos r \frac{dr}{di} \text{ puis } \frac{dr}{di} = \frac{\cos i}{n \cos r} \quad (4)$$

Reportons la relation (4) dans la relation (3) :

$$\frac{dD_k(i)}{di} = 2 \left( 1 - (k+1) \frac{\cos i}{n \cos r} \right) \quad (5)$$

La dérivée est nulle si et seulement si  $i$  vaut  $i_{km}$ , et l'angle de réfraction  $r$  vaut  $r_{km}$ , tels que :

$$(k+1) \frac{\cos i_{km}}{n \cos r_{km}} = 1 \Leftrightarrow (k+1) \cos i_{km} = n \cos r_{km}$$

Élevons cette dernière relation au carré :

$$(k+1)^2 \cos^2 i_{km} = (k^2 + 2k + 1) \cos^2 i_{km} = n^2 \cos^2 r_{km} \quad (6)$$

En élevant la loi de la réfraction  $\sin i = n \sin r$  au carré,

$$\text{on obtient : } \sin^2 r = 1 - \cos^2 r = \frac{\sin^2 i}{n^2} = \frac{1 - \cos^2 i}{n^2}$$

$$\text{puis } \cos^2 r = \frac{n^2 - 1 + \cos^2 i}{n^2} \quad (7)$$

Reportons alors la relation (7) dans la relation (6) :

$$(k^2 + 2k + 1) \cos^2 i_{km} = n^2 - 1 + \cos^2 i_{km},$$

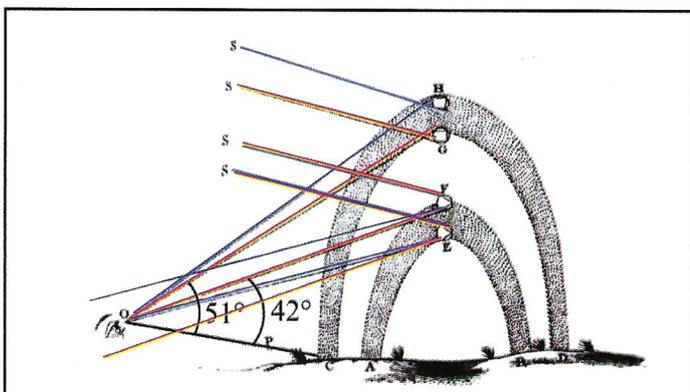
$$\text{d'où } (k^2 + 2k) \cos^2 i_{km} = n^2 - 1.$$

En prenant la racine carrée de cette relation, on obtient

$$\text{la formule de Newton : } \cos i_{km} = \sqrt{\frac{n^2 - 1}{k^2 + 2k}}$$

Cette hypothèse d'hétérogénéité de la lumière solaire permet d'interpréter l'arc-en-ciel observé dans la Nature comme la superposition d'arcs monochromatiques, légèrement décalés les uns par rapport aux autres, et de justifier l'ordre des couleurs dans l'arc primaire : du violet vers l'intérieur au rouge vers l'extérieur. Des calculs numériques similaires montrent que  $D_{2m}$ , et donc l'angle d'observation  $D_{02m} = D_{2m} - \pi$ , décroît lorsque  $\lambda$  augmente : l'ordre des couleurs est donc inversé dans l'arc secondaire, avec le rouge à l'intérieur et le bleu à l'extérieur (figure 7). Enfin, Newton calcule la largeur angulaire des arcs primaire et secondaire en tenant compte du fait que le Soleil n'est pas ponctuel, mais est vu depuis la Terre sous un diamètre apparent égal à  $31'$ , de sorte que les rayons lumineux n'arrivent pas tous parallèles sur la goutte.

<sup>4</sup> Newton occupait alors la chaire lucasienne de mathématiques. Celle-ci tient son nom du révérend Henry Lucas, membre du conseil de l'université de Cambridge, qui décida en 1663 d'octroyer un don pour financer un poste de mathématiques appliquées. Isaac Newton succéda à Isaac Barrow, premier titulaire de cette chaire. Parmi ses occupants les plus prestigieux, on peut citer Paul Dirac et Stephen Hawking.

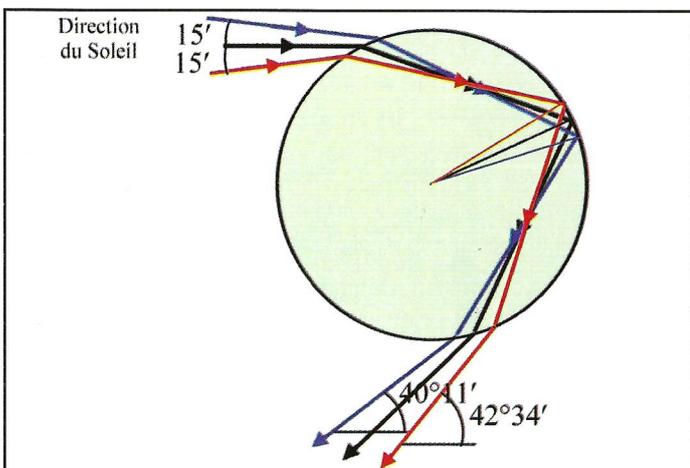


**Figure 7 :** Arc-en-ciel selon Newton et ordre des couleurs

© Bibliothèque Nationale de France

On notera que le rayon « bleu » (resp. « rouge ») qui émerge de la goutte marquée F (resp. E) ne rencontre pas l'œil de l'observateur.

Pour l'arc primaire, l'angle d'observation maximum (resp. minimum) correspond aux radiations rouges (resp. violettes) émises par le bord inférieur (resp. supérieur) du Soleil (figure 8) et vaut  $42^{\circ}19' + 15' = 42^{\circ}34'$  (resp.  $40^{\circ}26' - 15' = 40^{\circ}11'$ ). La largeur angulaire est donc égale à  $42^{\circ}34' - 40^{\circ}11' = 2^{\circ}23'$ . Newton calcule historiquement :  $42^{\circ}02' + 15' - (40^{\circ}17' - 15') = 2^{\circ}15'$  ; pour l'arc secondaire, il trouve :  $54^{\circ}07' + 15' - (50^{\circ}57' - 15') = 3^{\circ}40'$ . L'arc secondaire est donc plus large.



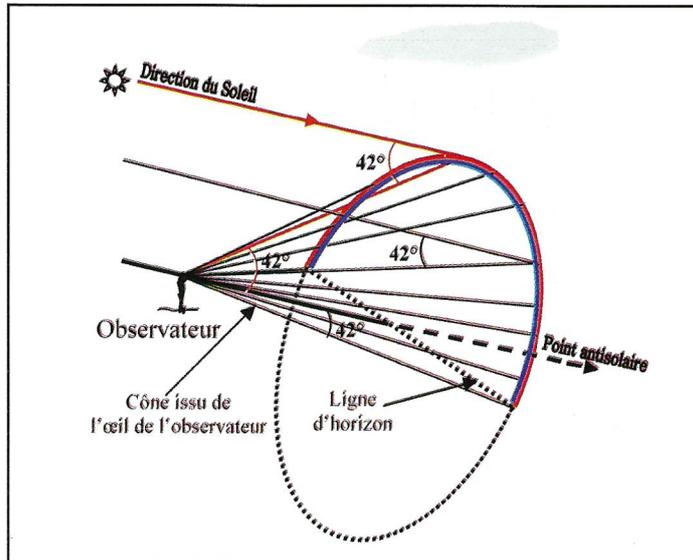
**Figure 8 :** Trajets des rayons extrêmes déterminant la largeur angulaire de l'arc primaire

### 4.3 L'arc-en-ciel et son observation

Pour observer un arc-en-ciel, l'observateur doit se placer dos au soleil, car les déviations  $D_{1m}$  et  $D_{2m}$  sont supérieures à  $90^{\circ}$ . L'axe Soleil-observateur constitue un axe de symétrie du phénomène. On appelle **point antisolaire** le point de la sphère céleste situé sur cette droite et opposé au Soleil, et **direction antisolaire** la direction allant de l'observateur au point antisolaire (figure 9). En pratique, cette dernière est indiquée par l'ombre de la tête de l'observateur sur le sol. Vus depuis l'œil de celui-ci, les rayons émergents efficaces des arcs primaire et secondaire font avec la direction antisolaire les angles  $D_{01m} = \pi - D_{1m} = 42^{\circ}$  et  $D_{02m} = -\pi + D_{2m} = 51^{\circ}$ . Les gouttes qui contribuent aux arcs primaire et secondaire sont donc nécessairement situées sur des cônes dont le sommet est l'œil de l'observateur et dont les rayons angulaires sont égaux respectivement à  $42^{\circ}$  et  $51^{\circ}$  (figures 7 et 9).

Malgré la symétrie de révolution, l'observateur n'aperçoit qu'une portion de cercle, car le point antisolaire est situé en dessous de l'horizon, usuellement. Plus le Soleil est haut dans le ciel, plus cette portion est réduite. L'arc-en-ciel primaire n'est plus visible lorsque le Soleil possède une hauteur sur l'horizon supérieure

à  $42^{\circ}$ . La fin d'après midi ou le début de matinée sera donc un moment d'observation privilégié sous nos latitudes. L'arc-en-ciel ne possède ni réalité matérielle ni dimension propre dans le rideau de pluie car il résulte d'une adéquation angulaire entre la direction antisolaire et la direction des rayons solaires arrivant dans l'œil de l'observateur. Il n'y a pas un arc-en-ciel, mais autant d'arcs-en-ciel que d'observateurs, chacun étant engendré par des familles de gouttes différentes. Une goutte ne peut pas se trouver à la fois sur deux cônes de même axe et même sommet, mais de rayons angulaires différents. Pour un observateur donné, les gouttes contribuant à l'arc secondaire sont situées plus haut dans le rideau de pluie que celles contribuant à l'arc primaire, et pour ce dernier, les gouttes contribuant à la partie rouge sont situées plus haut que celles contribuant à la partie bleue (cf. figure 7, tirée de l'Opticks de Newton).



**Figure 9 :** Cône d'observation de l'arc-en-ciel primaire

Les rayons subissant une seule réflexion interne dans la goutte - rayons de type 3 - sont reçus par l'œil de l'observateur sous un angle compris entre  $0^{\circ}$  et  $42^{\circ}$  par rapport à la direction antisolaire, tandis que ceux subissant deux réflexions internes - rayons de type 4 - sont reçus sous un angle supérieur à  $51^{\circ}$  (figure 5). Par conséquent, aucun des rayons de type 3 ou 4 ne pourra atteindre l'œil de l'observateur dans la bande angulaire comprise entre  $42^{\circ}$  et  $51^{\circ}$ . Cette bande, perçue plus sombre, est appelée **bande sombre d'Alexandre**, d'après le nom du philosophe grec Alexandre d'Aphrodisias qui en fit le premier la description vers l'an 200 avant Jésus Christ. L'assombrissement à l'intérieur de la bande d'Alexandre est apparent sur la figure 1.

Est-il possible d'observer des arcs-en-ciel d'ordre trois, quatre, voire plus ? Dans la Nature, seules quelques rares observations sont attestées<sup>5</sup>. Newton en imputait la raison à une intensité trop faible des rayons après trois ou quatre réflexions internes. Calculons, à l'aide des formules (1) et (2), les angles de déviation correspondant aux arcs d'ordre 3 et 4. Pour  $n = 1,334$  ( $\lambda = 570$  nm), on trouve :

$$i_{3m} = 76,82^{\circ} \quad r_{3m} = 46,87^{\circ} \quad D_{3m} = 318,7^{\circ} = 360^{\circ} - 41,3^{\circ}$$

$$i_{4m} = 79,62^{\circ} \quad r_{4m} = 47,50^{\circ} \quad D_{4m} = 404,3^{\circ} = 360^{\circ} + 44,3^{\circ}$$

Les arcs d'ordre 3 et 4 sont donc théoriquement observables, cette fois à environ  $40^{\circ}$  de la direction du Soleil. En pratique, c'est la grande luminosité du ciel au voisinage du Soleil - bien plus que leur faible intensité - qui interdit leur observation.

<sup>5</sup> cf. <http://www.petapixel.com/2011/10/07/first-ever-photograph-of-a-fourth-order-rainbow/>. Des arcs-en-ciel d'ordre bien supérieur à trois peuvent être observés en laboratoire en envoyant un faisceau laser assez puissant sur une goutte d'eau.

## 5. ARCS SURNUMÉRAIRES

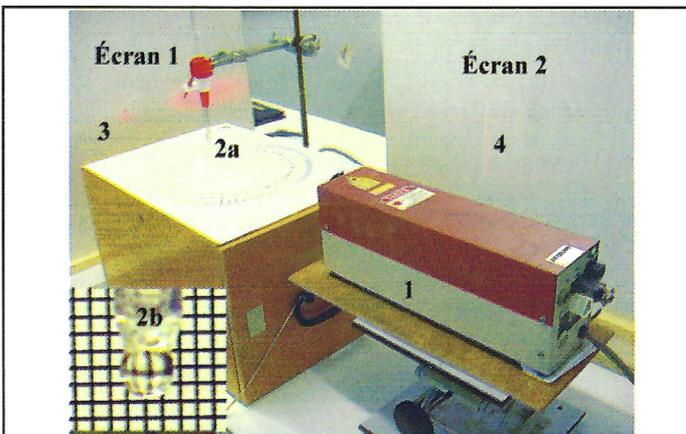
### 5.1 Observations



**Figure 10 :** Arcs surnuméraires (indiqués par la flèche) de l'arc-en-ciel primaire

Dans les années 1720, Sir Henry Pemberton (1694-1771) remarque l'existence de quelques franges alternativement vertes et pourpres juste en dessous de l'arc primaire de l'arc-en-ciel<sup>6</sup> (figure 10). L'origine de ces arcs, appelés **arcs surnuméraires**, est longtemps restée inexplicée. Leur existence montre clairement l'insuffisance de la théorie géométrique de Descartes et de Newton, incapable de les prédire. Il faudra attendre 1803 pour que Thomas Young en donne une première interprétation à l'aide de son principe d'interférences. Si leur manifestation naturelle se limite généralement à quelques franges peu contrastées, leur existence peut être mise en évidence de manière spectaculaire en laboratoire avec la lumière monochromatique d'un laser.

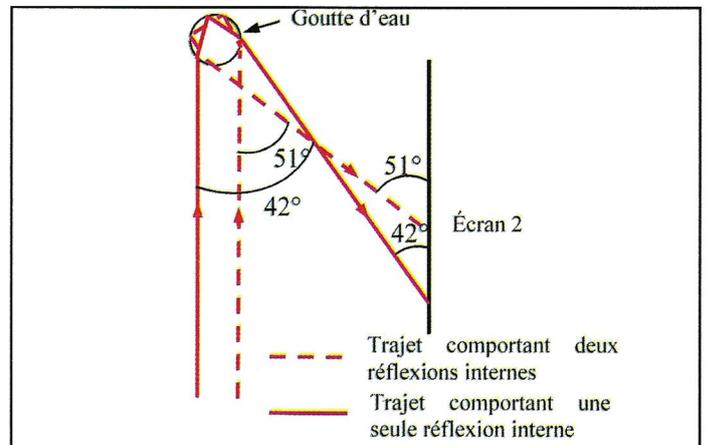
Le dispositif de l'expérience est représenté figure 11. Une burette remplie d'eau est maintenue verticalement à l'aide d'une pince. En ouvrant légèrement le robinet d'arrêt, on forme une goutte d'environ 3 millimètres de diamètre, qui reste en suspension à l'extrémité inférieure de la burette (2b, figure 11)<sup>7</sup>. On envoie alors la lumière monochromatique rouge d'un laser Hélium-Néon de 5 milliwatts (1, figure 11) sur la goutte d'eau.



**Figure 11 :** Arcs surnuméraires, montage expérimental  
**1 :** Laser **2a :** Burette **2b :** Goutte en gros plan avec quadrillage de pas 1,03 mm en arrière-plan **3 :** Ombre de la goutte sur l'écran 1 **4 :** Arcs surnuméraires sur l'écran 2

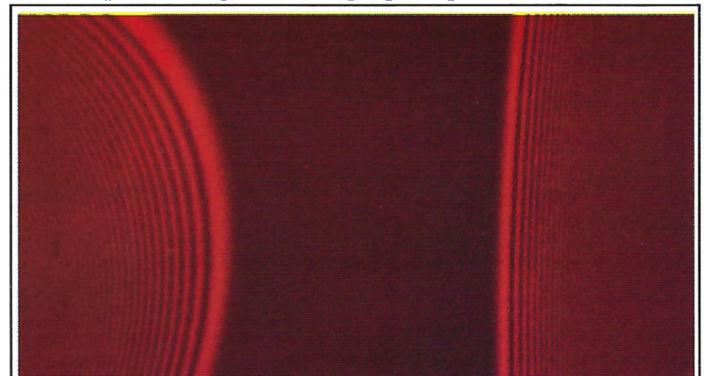
<sup>6</sup> Des arcs surnuméraires existent également juste au-dessus de l'arc secondaire, mais ils sont plus rarement visibles.

<sup>7</sup> Pour obtenir des gouttes plus petites, de 1 ou 2 millimètres de diamètre, on prendra plutôt une seringue munie d'un embout métallique d'environ 1 mm de diamètre.



**Figure 12 :** Trajet des rayons efficaces contribuant à l'arc primaire (traits pleins) et à l'arc secondaire (traits pointillés)

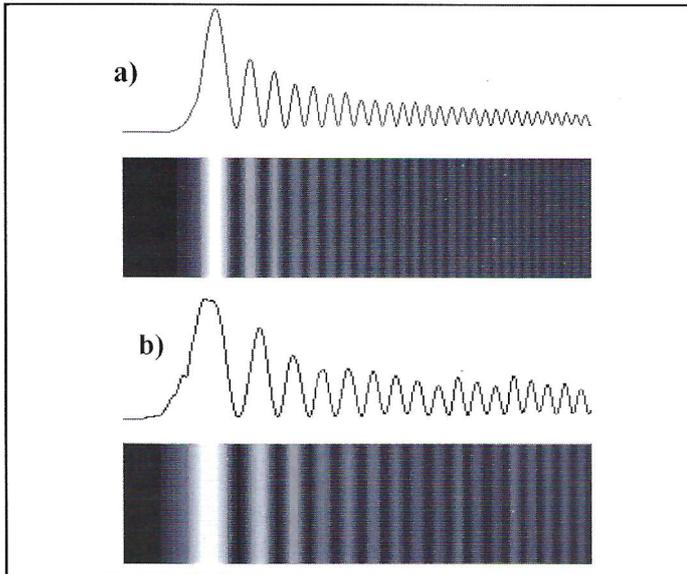
Sur la figure 12, on remarque que les rayons efficaces contribuant à l'arc primaire (resp. secondaire) parcourent la goutte dans le sens horaire (resp. trigonométrique) et « attaquent » celle-ci près de son bord gauche (resp. droit) à une distance de son centre ou hauteur d'incidence  $h_{1m} = R \sin i_{1m} = 0,86R$  (resp.  $h_{2m} = R \sin i_{2m} = 0,95R$ ). Or le faisceau laser a un diamètre de 1 mm seulement. Pour pouvoir observer simultanément les arcs surnuméraires des arcs primaire et secondaire sur l'écran 2, il est donc nécessaire de l'élargir pour qu'il couvre toute la goutte. Le plus simple est de reculer le laser à une distance d'environ cinq mètres, en utilisant l'élargissement naturel du faisceau avec la distance. Après alignement, on obtient alors sur l'écran 2 deux séries de franges rouges et noires très contrastées : les arcs surnuméraires (figure 13). La série de gauche, observée pour des angles supérieurs à 51°, correspond aux arcs surnuméraires de l'arc secondaire. Celle de droite, observée pour des angles inférieurs à 42°, correspond aux arcs surnuméraires de l'arc primaire. La zone sombre entre les deux est la bande sombre d'Alexandre. Les deux franges qui la bordent, appelées franges principales, sont les franges les plus brillantes et les plus larges. Elles constituent la partie rouge des arcs-en-ciel primaire et secondaire observés dans la Nature. Leurs angles d'observation sont voisins de 42° et 51°. On remarque que les franges des arcs surnuméraires ne sont pas équidistantes, mais de plus en plus resserrées, et de plus en plus faible luminosité, à mesure qu'on s'éloigne des franges principales.



**Figure 13 :** Arcs surnuméraires des arcs primaire (à droite) et secondaire (à gauche). La zone sombre observée entre les deux séries de franges constitue la bande sombre d'Alexandre.

À l'aide d'une barrette de photodiodes et d'un boîtier d'acquisition, on peut enregistrer le profil d'intensité des arcs surnuméraires. Les deux enregistrements de la figure 14 montrent l'évolution du profil d'intensité et de l'aspect des arcs surnuméraires pour deux rayons de goutte différents :  $2R = 3,1$  mm (figure 14. a), et  $2R = 1,7$  mm (figure 14. b).

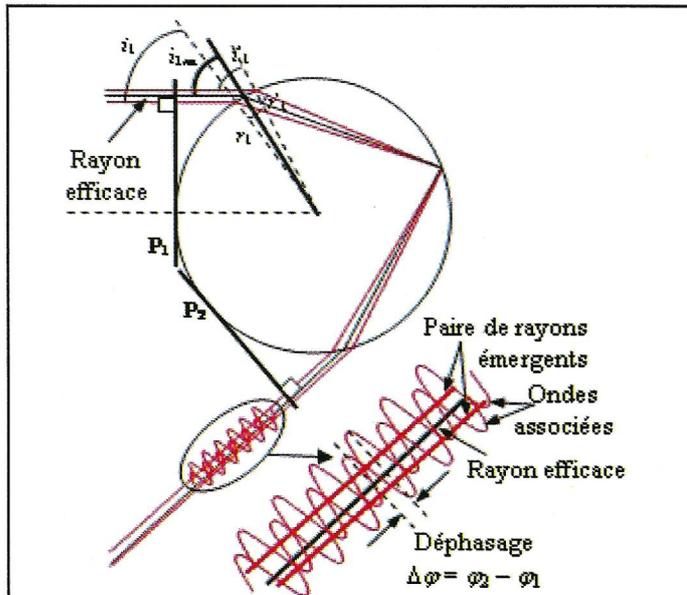
Lorsque le rayon de la goutte diminue, les arcs surnuméraires s'élargissent et leur écartement angulaire augmente. On observe ainsi, pour une plage identique de distance sur le capteur, 17 franges brillantes pour  $2R = 1,7$  mm, contre 28 pour  $2R = 3,1$  mm. Par ailleurs, la position angulaire de la frange principale s'écarte d'autant plus de la valeur prédite par la théorie géométrique que le rayon de la goutte diminue.



**Figure 14 :** Évolution du profil d'intensité et de l'écartement des arcs surnuméraires lorsque le diamètre de la goutte diminue a)  $2R = 3,1$  mm b)  $2R = 1,7$  mm.

## 5.2 Théories de Young et Airy

La théorie géométrique, basée uniquement sur le calcul de l'angle de déviation  $D$ , ne fait pas intervenir le rayon des gouttes d'eau. Elle est par conséquent incapable de prédire l'existence des arcs surnuméraires et l'évolution de leur position angulaire et de leur écartement avec la taille de celles-ci.



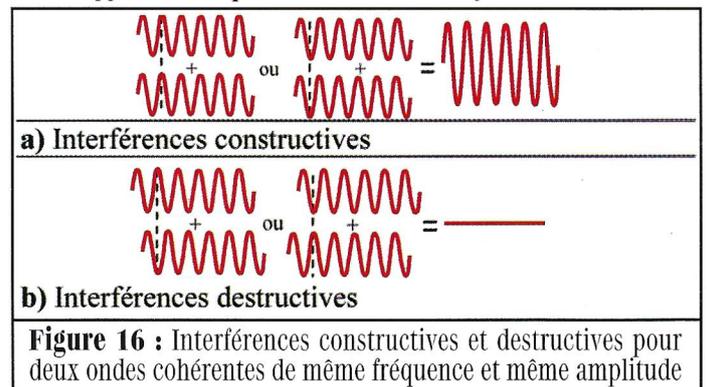
**Figure 15 :** Paire de rayons incidents (en rouge) situés de part et d'autre du rayon efficace (en noir) et émergeant dans la même direction après avoir suivi deux trajets différents dans la goutte.

Essayons maintenant d'interpréter l'existence des arcs surnuméraires de l'arc primaire à l'aide du principe d'interférences de Thomas Young. Plaçons-nous au voisinage de l'angle de déviation minimal  $D_{1m}$ . Considérons deux rayons incidents parallèles (en rouge), situés de part et d'autre du rayon efficace (en noir) et tels

qu'ils émergent parallèles de la goutte (figure 15): Ils sont donc perçus dans la même direction par l'observateur, mais présentent des trajets différents dans celle-ci. Cette différence de trajet se traduit par une différence de temps de propagation, et donc par un déphasage entre les ondes associées aux deux rayons (zoom en bas à droite, figure 15). À chaque paire de rayons correspond un angle de déviation  $D_1$  - et donc une direction d'observation - légèrement différent de  $D_{1m}$ . On montre que le déphasage  $\Delta\varphi$  entre les deux ondes peut se mettre sous la forme :

$$\Delta\varphi = \frac{16\pi R}{9\lambda} \left( \frac{(n^2 - 1)^3}{4 - n^2} \right)^{\frac{1}{4}} (D_1 - D_{1m})^{\frac{3}{2}}$$

On constate que ce déphasage est proportionnel au rayon  $R$  de la goutte, et à la puissance  $3/2$  de l'écart angulaire  $D_1 - D_{1m}$ . On peut alors appliquer le **principe de superposition ou d'interférences** énoncé pour la première fois par Thomas Young, lors de ses *Bakerian lectures* en 1801 : *lorsque deux ondes lumineuses sont cohérentes, c'est-à-dire lorsque leur déphasage est indépendant du temps<sup>8</sup>, leurs amplitudes en un point donné de leur zone de recouvrement - appelée **champ d'interférences** - s'ajoutent.*



**Figure 16 :** Interférences constructives et destructives pour deux ondes cohérentes de même fréquence et même amplitude

Ce principe de superposition donne lieu à deux configurations remarquables :

- si le déphasage  $\Delta\varphi$  entre les deux ondes cohérentes est un multiple de  $2\pi$ , alors les maxima et minima de vibration des deux ondes coïncident et l'onde résultante a une amplitude maximale (double, figure 16.a) : on dit qu'il y a **interférences constructives**.

- si le déphasage  $\Delta\varphi$  entre les deux ondes cohérentes est un multiple impair de  $\pi$ , alors les maxima de la première onde coïncident avec les minima de la seconde - et vice versa - de sorte que la vibration résultante a une amplitude minimale (nulle, figure 16.b) : on dit qu'il y a **interférences destructives**.

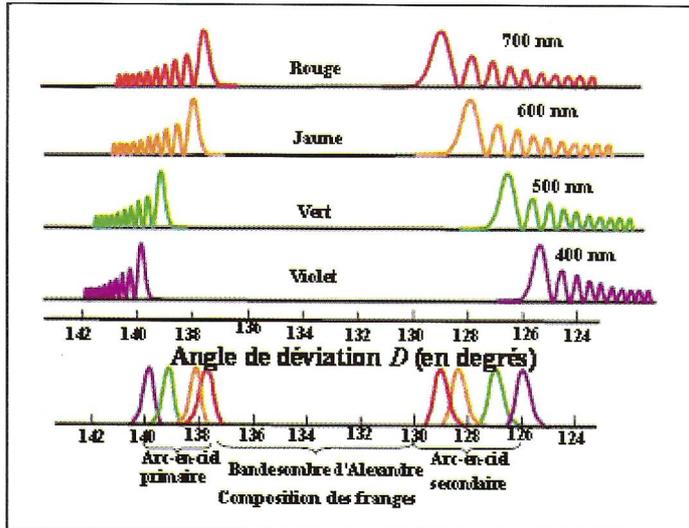
Dans le cas de l'arc-en-ciel, les deux ondes associées aux rayons qui émergent parallèles dans une direction angulaire commune, donnent lieu à des interférences à l'infini - en pratique sur la rétine de l'œil de l'observateur. Ce dernier perçoit donc une alternance de franges sombres dans les directions  $D'_N$  pour lesquelles  $\Delta\varphi = (2N+1)\pi$ , et de franges brillantes - les arcs surnuméraires - dans les directions angulaires  $D_N$  pour lesquelles

$$\Delta\varphi = 2\pi N \Leftrightarrow D_N - D_{1m} = \left( \frac{9\lambda N}{8R} \right)^{\frac{2}{3}} \frac{(4 - n^2)^{\frac{1}{6}}}{\sqrt{(n^2 - 1)}}$$

Les écarts angulaires  $D_N - D_{1m}$  au voisinage de  $D_{1m}$  croissent comme la puissance  $2/3$  de leur numéro d'ordre  $N$ , et décroissent comme la puissance  $2/3$  du rayon  $R$  de la goutte : on retrouve bien que plus la goutte est grosse, plus l'écartement angulaire  $D_{N+1} - D_N$  entre deux arcs surnuméraires consécutifs est faible.

<sup>8</sup> Ceci n'est possible que si elles ont même fréquence  $f$ .

L'arc primaire de l'arc-en-ciel, observé pour  $D_1 = D_{1m}$ , correspond au premier arc surnuméraire ( $N = 0$ ), et au cas limite où les deux rayons de la paire sont confondus ( $i'_1 = i_1$ ) et suivent exactement le même trajet dans la goutte ( $\Delta\varphi = 0$ ). Ces arcs n'ont en fait rien de surnuméraire : ils font partie intégrante du phénomène d'arc-en-ciel, et doivent être modélisés.



**Figure 17 :** Figures d'interférences des arcs surnuméraires des arcs primaire et secondaire en fonction de l'angle de déviation  $D$ , pour quatre radiations distinctes en lumière blanche

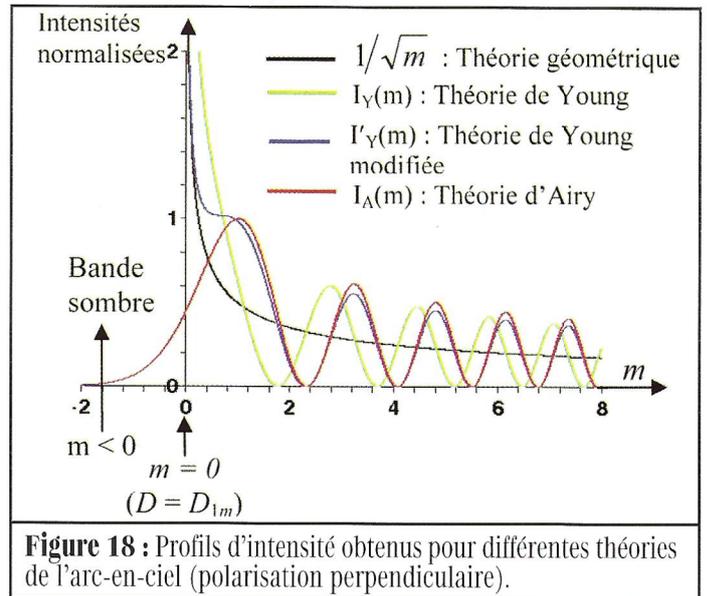
Lorsque les gouttelettes d'eau possèdent des tailles très variables, les directions  $D_N$  précédentes prennent des valeurs très variées, de sorte que les différents systèmes de franges d'interférences se brouillent en se recouvrant mutuellement, et le contraste des franges devient très faible. Ainsi, les arcs surnuméraires s'observeront plus facilement en haut de l'arc primaire, là où les gouttelettes sont encore petites et sphériques, non déformées par les forces de freinage aérodynamiques. Enfin, lorsque la goutte est éclairée en lumière solaire, chaque radiation de longueur d'onde  $\lambda_0$  engendre sa propre figure d'interférences, légèrement décalée par rapport aux autres (figure 17). Là encore, les différents systèmes de franges d'interférences se brouillent progressivement et seules les franges principales (figure 17, en bas) et quelques arcs surnuméraires peu contrastés restent visibles.

Dans le cadre de la théorie de Young, on montre que la répartition angulaire de l'intensité lumineuse dans le ciel est donnée par la formule :  $I_Y(m) \propto \frac{1}{\sqrt{m}} (1 + \cos \Delta\varphi(m))$ ,

$$\text{où } m = \left( \frac{16\pi^2 R^2}{9\lambda^2} \right)^{\frac{1}{3}} \frac{\sqrt{n^2 - 1}}{(4 - n^2)^{\frac{1}{6}}} (D_1 - D_{1m}) = k(D_1 - D_{1m})$$

est un paramètre sans dimension proportionnel à l'écart angulaire  $D_1 - D_{1m}$ .  $\frac{1}{\sqrt{m}}$  représente le facteur d'expansion géométrique du faisceau lumineux entre la face d'entrée et la face de sortie de la goutte, et  $(1 + \cos \Delta\varphi(m))$  un terme d'interférences à deux ondes, où  $\Delta\varphi(m) = \frac{4}{3} m^{\frac{3}{2}}$  est le déphasage entre les deux ondes ré-exprimé en fonction de  $m$ . Les courbes représentant  $\frac{1}{\sqrt{m}}$  et  $I_Y(m)$ , sont tracées respectivement en noir et en vert sur la figure 18. Les positions des arcs surnuméraires correspondent aux maxima successifs de  $I_Y(m)$  obtenus pour  $\Delta\varphi = 2\pi N$ , et sont données

par les valeurs  $m_N = \left( \frac{3\pi N}{2} \right)^{\frac{2}{3}}$ .



**Figure 18 :** Profils d'intensité obtenus pour différentes théories de l'arc-en-ciel (polarisation perpendiculaire).

Grâce au principe d'interférences, la théorie de Young permet donc d'expliquer l'origine des arcs surnuméraires. Cependant, elle repose sur le trajet géométrique des rayons, et est de fait incorrecte sur un point essentiel : tout comme la théorie géométrique de Descartes et Newton (courbe  $1/\varphi m$ ), elle prédit une intensité infinie pour  $m = 0$  ( $D_1 = D_{1m}$ ) et une intensité nulle à l'intérieur de la bande sombre d'Alexandre ( $m < 0$ ).

La première théorie réellement quantitative de l'arc-en-ciel fut proposée par George Airy en 1838. S'appuyant sur les travaux de son collègue Richard Potter, il traite le problème de l'arc-en-ciel comme un phénomène de diffraction au voisinage d'une caustique. Airy montre que l'intensité au voisinage de la caustique de l'arc-en-ciel s'exprime approximativement sous la forme :

$$I(m) \propto \left[ \frac{1}{\pi} \int_0^{\infty} \cos \left( \frac{t^3}{3} - mt \right) dt \right]^2 = [Ai(-m)]^2, \text{ où}$$

$$Ai(x) = \frac{1}{\pi} \int_0^{\infty} \cos \left( \frac{t^3}{3} + xt \right) dt \text{ est l'intégrale d'Airy,}$$

et où  $m = k(D_1 - D_{1m})$  est le paramètre défini dans la théorie de Young. Le profil d'intensité  $I_A(m)$  prédit par la théorie d'Airy est représenté en rouge sur la figure 18. Contrairement aux théories de Newton et de Young, l'intensité lumineuse  $I_A(m)$  est non nulle et diminue graduellement à l'intérieur de la bande sombre d'Alexandre ( $m < 0$ ), conformément aux observations. Au niveau de l'arc primaire, la courbe  $I_A(m)$  ne présente plus d'asymptote verticale, mais un pic principal de diffraction, légèrement décalé par rapport à la position de l'arc géométrique ( $m = 0$ ). La théorie d'Airy prédit également l'existence d'arcs surnuméraires, dont les positions angulaires sont décalées par rapport à celles prédites par la théorie de Young (courbe en vert). En fait, Young ignorait qu'une onde sur un rayon passant par une caustique subit un déphasage retard supplémentaire de  $\pi/2$ . Si on tient compte de ce dernier, le déphasage intervenant dans la théorie de Young devient

$$\Delta\varphi'(m) = \Delta\varphi(m) - \frac{\pi}{2} = \frac{4}{3} m^{\frac{3}{2}} - \frac{\pi}{2},$$

et les positions des arcs sont maintenant données par

$$m'_N = \left( \frac{3\pi(N + 1/4)}{2} \right)^{\frac{2}{3}}$$

La théorie de Young modifiée et la théorie d'Airy (courbes bleu et rouge, figure 18) prédisent alors les mêmes positions angulaires des arcs surnuméraires. Cependant, la théorie d'Airy n'est à son tour qu'une théorie approchée de l'arc-en-ciel. Ses prédictions s'avèrent incorrectes pour l'arc secondaire, et plus généralement lorsque la lumière est polarisée parallèlement au plan d'incidence.

À la fin du XIX<sup>e</sup> siècle, l'avènement de la théorie électromagnétique permet de traiter le problème de l'arc-en-ciel comme l'interaction d'une onde plane électromagnétique avec une sphère homogène. C'est la théorie de Mie, qui est exacte, mais dont la solution peut comporter plusieurs milliers de termes ou ondes partielles, et ne peut être calculée que numériquement par ordinateur. Une approche plus physique est alors développée au début du vingtième siècle grâce à une transformation mathématique appelée transformation de Watson. Celle-ci permet de remplacer les contributions des milliers d'ondes partielles par celles d'un petit nombre de points dans le plan complexe, appelés pôles et points cols. La transformation de Watson a été appliquée avec succès au problème de l'arc-en-ciel en 1969, par Moysés Nussenzveig, avec sa **théorie du moment cinétique complexe**. Dans celle-ci, le phénomène d'arc-en-ciel résulte de la coalescence de deux points cols réels, et la décroissance graduelle de l'intensité dans la bande sombre d'Alexandre vient de leur transformation en un point col complexe. Que l'explication d'un phénomène naturel si universel requière des mathématiques aussi ardues doit nous inviter à réfléchir sur la nature même de la modélisation en physique et sur son essence intrinsèquement... mathématique.

## Bibliographie :

### \* Vulgarisation ou premier cycle universitaire :

- M. BLAY, *Les figures de l'arc-en-ciel*, Éd. Belin Pour la Science, 2005.
- A. HEEFFER, « Kepler's near discovery of the sine law : A qualitative computational model », In : Claudio Delrieux & Javier Legris (eds.) *Computer Modeling of Scientific Reasoning*, Universidad Nacional Del Sur. EDIUNS, Bahía Blanca, Argentina, 2003, pp. 93-102.
- S. HOUARD, *Optique, une approche expérimentale et pratique*, éd. de boeck, juin 2011.
- R. JOUANISSON, « L'arc-en-ciel : observations et expériences », *Bull. Un. Phys.* n° 809 (cahier n° 1), décembre 1998, p. 1765-1788.
- R. L. Lee Jr. et A. B. Fraser, *The Rainbow Bridge : Rainbows in Art, Myth and Science*, Pennsylvania State University Press, 2001.
- B. MAITTE, « L'arc-en-ciel de la discorde », *Les génies de la science*, Pour la Science, février-mai 2006, p. 28-31.
- M. NUSSENZVEIG, « La théorie de l'arc-en-ciel », dans *Les phénomènes naturels*, Bibliothèque pour la science, diffusion Belin, 1978, p. 18-30.
- J. WALKER, « Le mystère des arcs-en-ciel et des arcs surnuméraires, si peu observés », rubrique « expériences d'amateur », *Pour la Science*, n° 34, août 1981, p. 109-115.

### \*\* Second cycle universitaire :

- J. A. Adam, *The mathematical Physics of rainbows and glories*, *Physics reports* 356 (2002) 229-365.
- G. B. AIRY, « On the Intensity of Light in the neighbourhood of a caustic », *Camb. Phil. Soc. Trans.*, 1838, p. 379-402.
- M. NUSSENZVEIG, *Complex angular momentum theory of the rainbow and the glory*, *J. Opt. Soc. Am.*, vol. 69 n° 8, august 1979, p. 1068-1079.
- <http://www.philiplaven.com> : comparaison des prédictions des théories de Young et d'Airy.
- <http://www.ams.org/samplings/feature-column/fearcrainbows> (*The Mathematics of Rainbows*).

## ACTIVITÉS DE L'ADASTA

### Sorties et Conférences de l'ADASTA

#### Conférences:

**mardi 18 septembre 2012**

« **reconstitution de matière osseuse à partir de nouveaux bio-matériaux** »  
par J-L Irigaray et J. Lao

**mercredi 3 octobre 2012 (18h30 à l'IFMA) : grande conférence régionale**

« **les ondes électromagnétiques et leurs effets sur l'organisme** »  
par Jean Chandezon et Anne Perrin

**mercredi 24 octobre 2012 : « Police technique et scientifique »**

par Mesdames Gisèle Blaison et Emmanuelle Ahr de la police judiciaire.

**mercredi 14 novembre 2012 : « le mouvement de la Terre »** par Luc Dettwiller

**mercredi 12 décembre 2012 :**

« **comportement social des fourmis** » par Bruno Corbara  
(ce sujet, ou le titre pourra être modifié le moment venu par le conférencier)

**mercredi 23 janvier 2013 « le calcul numérique »** par Francis Asporid

### Prévision visites 2<sup>e</sup> semestre 2012 :

- Papeterie à GIROUX près d'Ambert (aspect énergie)
  - Centrale 3CB Bayet (Allier)
  - Ecole de Chimie (début 2013)

## ADASTA

### Adhésions et Abonnements

Adhésions à titre individuel : 30 €

Adhésions à titre collectif : 80 €

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

Permanences - elles sont assurées par les bénévoles:

lundi de 14h à 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](mailto:adasta@wanadoo.fr)

Site internet : [www.adasta.fr](http://www.adasta.fr)

Dépôt légal septembre 2012 - N° ISSN - 1166-5904

# VISITE UKAD

COMPTE-RENDU RÉDIGÉ PAR ROBERT TAVERNIER



En fin d'après midi du 21 juin 2012, une bonne vingtaine de membres de l'ADASTA se sont retrouvés aux Ancizes sur le plateau des Combrailles venté mais ensoleillé pour visiter l'atelier UKAD (Unité Kazakhstan Aubert & Duval) de transformation des lingots de Titane.

Nous avons été reçus par l'un des responsables du projet UKAD qui nous a présenté à l'aide d'un film vidéo son origine et les opérations réalisées dans cet atelier.

Le groupe EADS (Airbus), qui a souhaité diversifier et sécuriser ses approvisionnements en alliage de Titane, a donc sollicité Aubert & Duval pour son expérience et son savoir-faire dans le domaine des alliages spéciaux.

Les alliages de Titane sont de plus en plus utilisés dans l'industrie aéronautique pour ses

grandes performances mécaniques alliées à une relative faible densité (environ 4) en particulier pour la réalisation de support d'accrochage des réacteurs.

Il y a seulement 2 fournisseurs au monde de ce type d'alliages, les USA et la Russie.

Airbus a souhaité avoir un fournisseur européen. Une des anciennes républiques de l'ex URSS, le Kazakhstan cherche à développer des partenariats avec des entreprises occidentales en raison des richesses de son sous-sol. Le Kazakhstan possède des sables titanifères. Il y a environ 2 ans, une coopération a été établie entre le Kazakhstan et Aubert & Duval, pour le développement et la transformation des alliages à base de Titane. Il s'en est suivi la construction aux Ancizes (Puy-de-Dôme) d'un atelier spécifique.

Après avoir été équipé de casque, gilet jaune et de protections de chaussures, nous avons investi cet atelier, où en compagnie de notre interlocuteur, nous avons remonté le processus de fabrication avec des machines à l'arrêt. En effet l'homologation des produits transformés est en cours et Aubert & Duval attend le feu vert d'Airbus pour démarrer la production. Ces deux inconvénients ont été

largement compensés par la très grande compétence de notre interlocuteur qui a répondu avec beaucoup de pertinence et de patience à de nombreuses questions.

Toute la métallurgie du Titane est réalisée au Kazakhstan. Aubert & Duval reçoit des lingots d'environ 40 t de l'alliage TiAluVa à 6% d'Aluminium et à 3% de Vanadium, le plus couramment utilisé, pour le transformer en billettes de 2,4 t destinées à la réalisation de pièces mécaniques.

L'alliage est chauffé dans des fours, puis forgé à l'aide d'une presse allemande par pas de 150 mm sans à-coups, le niveau sonore ne dépassant pas 80 db. Ensuite, cet alliage est tronçonné et meulé pour enlever la croûte d'oxydes formés en surface. Les machines de tronçonnage ou de meulage sont d'origine canadienne ou italienne. Quand à l'infrastructure du bâtiment, elle a été réalisée par des entreprises françaises.

Après cette visite d'environ 1h30, nous nous sommes séparés en nous souhaitant de bonnes vacances, avec la certitude de se retrouver en pleine forme pour redémarrer un nouveau cycle de conférences en septembre prochain ainsi que d'autres visites.

## VISITE DE LA STATION RADIOASTRONOMIQUE DE NANÇAY

COMPTE-RENDU RÉDIGÉ PAR JEAN-PIERRE MICHEL

Le 5 juin 2012, pas de fusée mais un confortable car pour emporter une quarantaine d'adhérents de l'ADASTA, non au septième ciel, mais dans le Cher, au cœur de la Sologne.

Après la visite, le matin, du Musée LAUMONIER de la machine à vapeur à Vierzon et le déjeuner dans cette ville, le groupe s'est rendu sur le site de la station de radioastronomie, proche du village de Nançay.

Cette station située à 20 km de Vierzon, 204 km de Paris, 236 km de Clermont-Ferrand et 40 132 418 664 688 km de Proxima du Centaure (Sources Via Michelin et Pôle des étoiles) est gérée conjointement par l'Observatoire de Paris et le CNRS.

Sa situation a été choisie, au début des années 1950, pour satisfaire à plusieurs exigences, dont :

- éloignement des lieux où l'activité humaine génère des radiofréquences polluant les ondes venant de l'espace ;
- terrain à peu près plat, nécessitant peu de terrassement pour la mise à niveau et l'alignement d'antennes selon des axes nord-sud et est-ouest longs d'au moins 1,5 km ;
- accès relativement rapide depuis Paris pour les astronomes.

### VISITE DU PÔLE DES ÉTOILES

À côté de cette station, le Conseil Général du Cher a édifié en 1997 un bâtiment « Ciel ouvert sur les étoiles » destiné à accueillir et informer le public.



Agrandi et modernisé en 2010 ce bâtiment, rebaptisé « Pôle des étoiles » d'une capacité d'accueil de 20 000 visiteurs/an, présente des expositions permanentes concernant l'astronomie et des expositions temporaires dans des domaines pouvant s'y rattacher (en 2012 : les maths en Méditerranée). Il comprend en outre un planétarium de quarante places, une salle de conférence, une salle pédagogique et un espace boutique.

Après une visite, hélas trop rapide, des salles d'exposition le groupe ADASTA a rejoint le planétarium où un médiateur scientifique lui a présenté les constellations et objets les plus facilement repérables de l'hé-

misphère nord dans un confort et une obscurité parfois propices à une petite sieste digestive.

### VISITE DE LA STATION DE RADIOASTRONOMIE

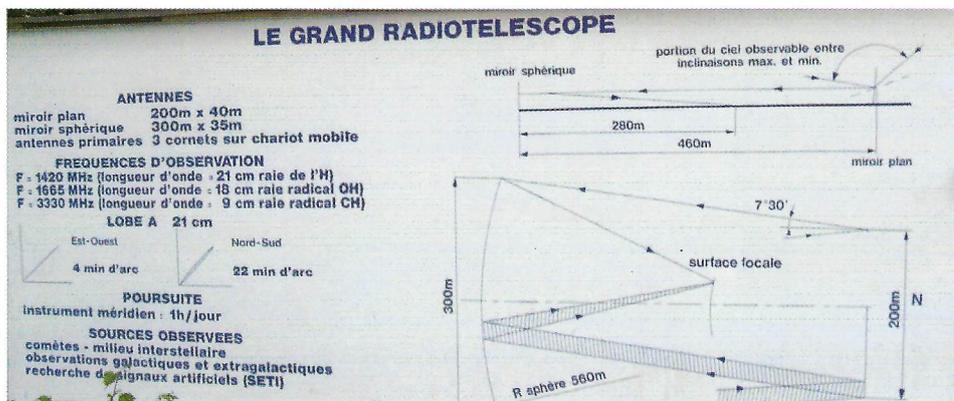
Sous la conduite du même mentor, excellent communicant, le groupe s'est rendu sur le site de la station de radioastronomie pour découvrir les instruments qui y sont utilisés et s'informer de leurs caractéristiques et de leur mode de fonctionnement.

L'atmosphère terrestre filtre le rayonnement venant de l'espace. Dans la gamme des ondes électromagnétiques elle n'est perméable qu'à certaines bandes de fréquences dont celles correspondant à la lumière visible, aux proches infrarouge et ultraviolet, domaine de l'astronomie optique, mais aussi à certaines fréquences moins élevées, relevant de la radioastronomie.

### LE GRAND RADIOTÉLESCOPE DÉCIMÉTRIQUE (NRT)

Inauguré en 1965 par le Président de la République Charles De Gaulle, il est l'un des cinq plus grands radiotélescopes du monde.

Dans un télescope optique la lumière reçue par l'appareil est « concentrée » au moyen de miroirs paraboliques.



Dans un radiotélescope les miroirs sont remplacés par des treillis métalliques qui réfléchissent le rayonnement électromagnétique incident.

Le grand radiotélescope est destiné à couvrir de façon continue la bande de fréquences de 1,060 GHz à 3,500 GHz et à capter plus spécialement les rayonnements correspondant aux longueurs d'onde 21 cm (hydrogène), 18 cm (radical OH) et 9 cm (radical CH). Ses réflecteurs sont constitués par un treillis métallique à mailles carrées de 12,5 mm de côté.

Le rayonnement en provenance du ciel est reçu sur un ensemble de dix réflecteurs parfaitement juxtaposés et pouvant pivoter autour d'un axe horizontal de direction est-ouest pour pointer la zone du ciel à étudier. Cet ensemble forme une surface de 8 000 m<sup>2</sup> avec des défauts de planéité n'excédant pas quelques millimètres. La masse de chaque réflecteur est de 40 tonnes et celle du châssis qui les supporte de 250 tonnes, soit un total de 650 tonnes.



Le rayonnement réfléchi est envoyé sur un réflecteur en forme de calotte sphérique de 300 m de longueur et 35 m de hauteur. Cette charpente a une masse de 750 tonnes et sa forme ne s'écarte pas de plus de 5 mm de celle d'une sphère de 560 m de rayon.

Les ondes ayant subi cette seconde réflexion convergent vers les antennes réceptrices montées sur le chariot placé au point focal entre le réflecteur plan et le réflecteur sphérique. Ce chariot se déplace sur des rails selon une direction est-ouest afin de compenser la rotation de la terre pendant la durée de l'observation (1 h environ) et l'altitude des antennes est réglable avec une précision millimétrique pour assurer une bonne focalisation des signaux.

Les signaux captés par les antennes, environ un milliard de milliards de fois plus faibles que ceux reçus par un téléviseur, subissent une première amplification à l'aide de transistors spéciaux refroidis à 20°K puis sont acheminés par câbles enterrés jusqu'au bâtiment où ils seront traités, situé à quelques centaines de mètres et entièrement entouré d'un grillage jouant le rôle de cage de Faraday pour éviter que les émissions parasites émises par les appareils d'amplification, d'analyse et de stockage des données ne polluent le rayonnement reçu par le radiotélescope.

### LE RADIOHÉLIOGRAPHE (NRH)

Il s'agit d'un radiotélescope dédié à l'étude de la couronne solaire. Très différent du NRT il se compose de 48 antennes réparties sur deux lignes perpendiculaires formant un T; la branche horizontale du T est orientée Est-Ouest et la branche verticale Nord-Sud.



Le radiohéliographe est utilisé comme interféromètre pour des longueurs d'ondes comprises entre 0,7 m et 2 m qui correspondent à des altitudes différentes dans l'atmosphère du soleil : il permet donc d'obtenir des images en 3D.

La ligne de base, vecteur qui joint deux antennes travaillant en interférométrie, détermine le pouvoir séparateur de l'instrument ; à Nançay elle mesure 3 200 m dans la configuration maximale.

Le soleil étant une source puissante du fait de sa proximité de notre terre, les antennes utilisées sont petites : certaines,

montées sur un châssis orientable pour suivre la course du soleil, sont équipées de réflecteurs paraboliques de 5 à 10 m de diamètre, d'autres sont semblables à des an-



tennes de téléviseur.

### LES AUTRES INSTRUMENTS

Les autres installations ne sont pas ouvertes à la visite. Il s'agit :

- du RÉSEAU DÉCAMÉTRIQUE (DAM) conçu dans les années 1975 à 1978 et composé de 144 antennes fixes qui observe par spectrométrie des sources très intenses (couronne solaire, Jupiter) entre 3 et 30 m de longueur d'onde (10 à 100 GHz) ;

- de LOFAR (Low Frequency Array) constitué de plusieurs dizaines de milliers d'antennes réparties dans toute l'Europe, mais surtout aux Pays-Bas à l'origine du projet, pour étudier le ciel par interférométrie aux plus basses fréquences accessibles depuis le sol (30 à 240 MHz) : 1 600 antennes et 96 récepteurs associés sont installés à Nançay depuis 2011 ;

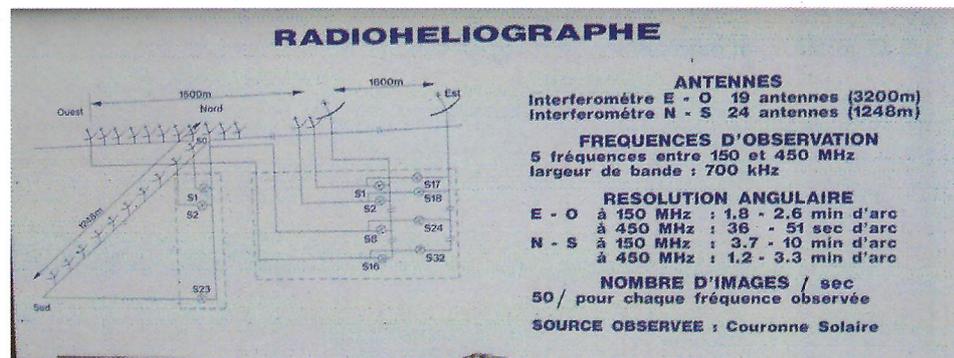
- de CODALEMA (Cosmic ray Detection Array with Logarithmic ElectroMagnetic Antennas), expérience de radiodétection pour l'étude des rayons cosmiques ;

- de l'ANTENNE TBF (Très Basse Fréquence) qui constitue une station d'un réseau mondial de récepteurs EBF/TBF pour la télédétection de phénomènes dans l'ionosphère et la magnétosphère ;

- de l'ANTENNE DE SURVEILLANCE : placées au sommet d'un mât métallique de 22 m pour dominer la végétation environnante des antennes explorent les bandes de 1 à 4 GHz et de 100 à 500 MHz pour détecter les émissions liées à l'activité humaine (Téléphonie mobile par ex.) susceptibles de polluer les signaux reçus par le radiotélescope décimétrique (NRT) et par le radiohéliographe (NRH) afin d'apporter à ces signaux les corrections nécessaires.

A l'issue de la visite et d'une journée bien remplie le groupe a rejoint le car pour le retour à Clermont-Ferrand.

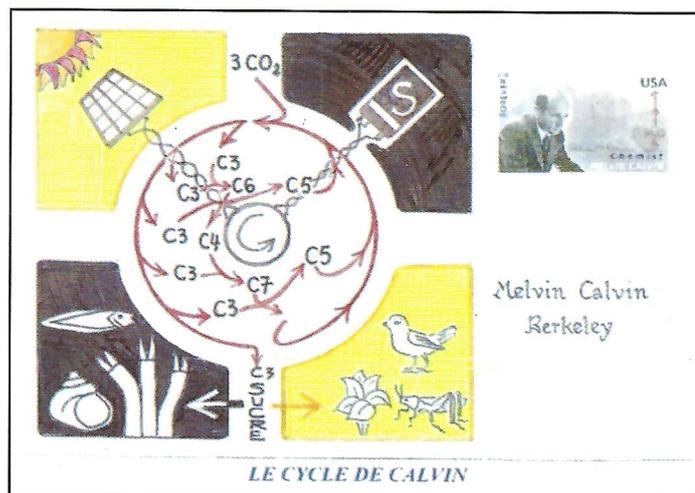
Les renseignements concernant le «Pôle des étoiles» et la «Station radioastronomique de Nançay» se trouvent sur les sites <http://www.poledesetoiles.fr> et <http://www.obs-nancay.fr>



# HISTOIRES DE PLANTES ET AUTRES ...

PAR MICHEL GENDRAUD (DESSINS ET TEXTES)

## LE CYCLE DE CALVIN



En 1945, disposant de carbone radioactif, Melvin Calvin se mit à étudier la photosynthèse qui, du gaz carbonique, fait le sucre. En illuminant des microalgues, il leur offrit ce <sup>14</sup>CO<sub>2</sub> dont il suivit la radioactivité jusqu'au terme. Le cycle métabolique qu'il décrit porte son nom et lui valut le Prix Nobel de Chimie 1961.

Le cycle est dans le chloroplaste, point vert de la cellule, bactérie domestiquée, animé par l'énergie que prend la chlorophylle à la lumière. Par le sucre qui sourd, la plante croît et nourrit l'herbivore qui nourrit le carnivore. Tout le carbone de la chaîne alimentaire du soleil, sur terre et en mer, passe par le cycle de Calvin.

Pour autant, le chloroplaste n'a pas l'exclusivité. Aux sources sulfureuses des abysses, des bactéries font tourner leur cycle de Calvin par l'énergie prise à l'oxydation du soufre. Elles peuplent les cellules d'un ver géant qui s'édifie par le sucre qui les quitte. Et le ver nourrit l'animal qui nourrit l'animal... Tout le carbone de la chaîne alimentaire des ténèbres passe aussi par le cycle de Calvin.

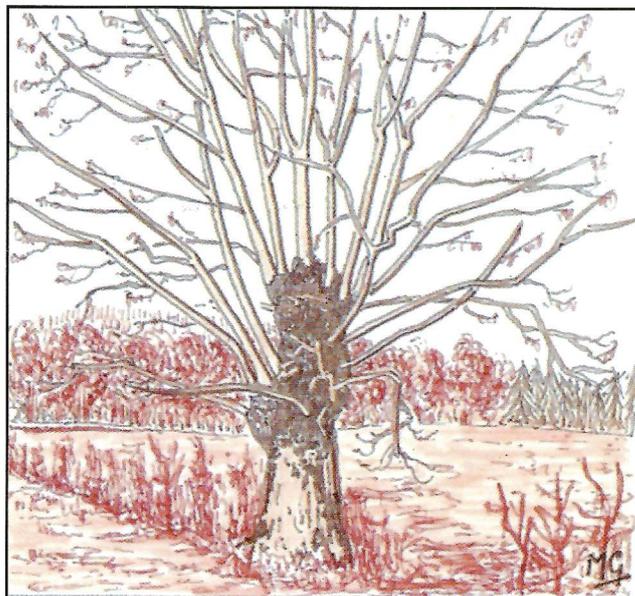
## LE FRÈNE, SA FEUILLE

Le Frêne, c'était le fourrage du mois d'août. Par la hache, les branches de son houppier étaient livrées au bétail, feuillage vert sur la pâture jaunie. Dans la haie, le tronc dénudé passait ainsi l'hiver.

Au printemps, de minuscules bourgeons de secours utilisaient ses réserves pour lancer de puissants rejets. Dans une décennie ils porteraient assez de feuille pour la donner.

Ce régime faisait au Frêne ce port particulier qu'ont les vieux arbres en retraite de l'élagage. Ceux qui n'ont jamais subi la hache sont autres. Patriarches, ils expriment une architecture puissante et ramifiée, comme leur ancêtre qui inspira aux Scandinaves Yggdrasil, l'Arbre-Monde.

Mais, retraits des haies ou patriarches des parcs, les Frênes de chez nous gardent la mémoire des longs hivers des hautes latitudes: ils sont les premiers à perdre leurs feuilles et les derniers à en prendre de nouvelles.



LE FRÈNE, SA FEUILLE