

# AUVERGNE

# Sciences

N° 60 - mars 2005

**LES PUCES À ADN**

**M. CHARLES**

PHYSICIEN NOUVEAU

**LE TRAMWAY SUR PNEUS**

À CLERMONT-FERRAND

**BULLETIN DE L'ADASTA**

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

# Éditorial

L'année 2005 a été choisie pour célébrer les sciences physiques dans le monde entier. Exactement cent ans après la parution des travaux révolutionnaires d'Albert Einstein sur trois théories fondamentales qui ont ouvert la voie à pratiquement tous les développements de la physique du 20<sup>e</sup> Siècle : le quantum de lumière, la relativité et le mouvement brownien. En s'appuyant sur l'image emblématique et populaire d'Einstein, tout particulièrement auprès des jeunes, cette manifestation tentera de soulever l'intérêt et l'enthousiasme de tous ceux qui sont curieux de la science d'aujourd'hui.

Les progrès spectaculaires accomplis par la physique depuis quelques dizaines d'années, par exemple les transistors, les ordinateurs et les lasers, ouvrent à la science d'enthousiasmantes perspectives en direction de l'infiniment petit des particules, de l'infiniment grand du cosmos, de l'infiniment complexe des états de la matière



Le Président  
Jean-Claude CAPELANI

Mesurons l'impact, en ce début d'année, des sciences physiques sur le développement des nouvelles technologies : le 14 janvier le module Huygens plongea dans les nuages de Titan, cette manœuvre, parmi les plus osées de la conquête spatiale doit nous dévoiler un monde encore largement mystérieux ; le gigantesque Airbus A380 présenté au monde entier ....

On doit aussi prendre conscience de son importance pour l'indispensable progression des pays en développement.

A cet égard les responsabilités éthiques des physiciens sont très grandes.

La physique est une matière réputée difficile, dont l'apprentissage suppose, non seulement l'observation et la compréhension des phénomènes, mais aussi l'utilisation et la maîtrise des outils mathématiques pour exprimer ses lois.

Il faut renforcer les actions de sensibilisation en montrant qu'on peut se faire plaisir en apprenant des principes et des sciences en général: un bel exemple les membres bénévoles expérimentés de l'ADASTA s'investissent auprès des jeunes 7/12 ans les mercredis : ce sont les « Jeunes Pousses » qui font de l'expérimentation dans la bonne humeur et avec enthousiasme. Dans la plupart des cas les scientifiques en herbe peuvent reproduire chez eux bon nombre d'expériences et aussi grâce à leur encadrement, rêver qu'ils deviendront un jour des passionnés de la science.

L'année mondiale de la physique se prépare partout sous le patronage de l'UNESCO. En France c'est la Société Française de Physique, en partenariat avec l'Union des professeurs de physique et de chimie, avec l'ADASTA ainsi qu'avec les sociétés savantes concernées par les sciences

physiques qui animent cette manifestation. Ces activités se dérouleront dans les régions à l'initiative de tous les physiciens de l'enseignement et de la recherche.

Le Président du Haut Comité de parrainage de cette opération pour la France est Claude Cohen Tannoudji, prix Nobel de Physique en 1977.

## Merci à nos sponsors



### Comité de rédaction de la Revue Auvergne-Sciences

Président : Paul Avan

Rédactrice en chef : Jocelyne Allée

Membres : Mathilde Abad, Nathalie Andréoletti, Georges Anton, Vincent Barra, Jean-Claude Capelani, Jean Chandezon, Luc Dettwiller, Paul-Louis Hennequin, Michel Naranjo.

Photo de couverture : Crédit, Guy Kieffer (prismation des laves volcaniques).

Impression : Imprimerie Porçu - Clermont-Ferrand

# SOMMAIRE

M. Charles, Physicien novateur .....	3
Introduction aux puces à ADN .....	14
Le tramway sur pneus à Clermont-Ferrand .....	20
Visite de la centrale nucléaire de Saint Alban - Saint Maurice .....	24

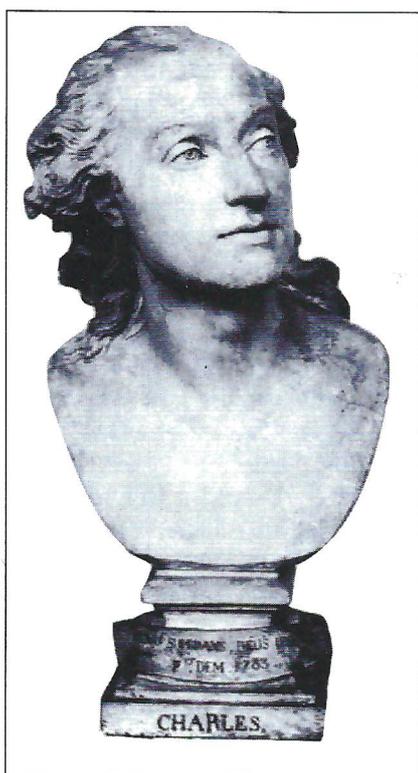
# Monsieur CHARLES

Physicien novateur, Pédagogue émérite, Homme généreux

Par Bernard LEFRANÇOIS

Ingénieur de l'Ecole Supérieure de Physique et Chimie Industrielles  
Docteur ès Sciences Physiques

Professeur Honoraire du Conservatoire National des Arts et Métiers  
Titulaire de la Chaire de Chimie Industrielle de 1980 à 1998



Buste de Charles par Boizot  
Musée des Arts et Techniques  
Conservatoire National des Arts et Métiers



Maison Natale de Charles. Beaugency

**« Monsieur Charles, professeur ès sciences expérimentales, prend des élèves auxquels il enseigne l'électricité et la physique, en son cabinet de la place des Victoires, près de la rue du Mail »**

C'est grâce à cette annonce, publiée en 1780 dans plusieurs gazettes, que Jacques Charles, récemment licencié d'un premier emploi, tente sa reconversion vers les sciences exactes. En vérité, Jacques Alexandre César Charles, né en 1746 à Beaugency, n'est pas un novice en sciences. Après de bonnes études littéraires, il postule une place modeste dans l'administration des haras. Ses obligations professionnelles n'étant pas très contraignantes, Charles se passionne pour la physique et la chimie, et achète quelques appareils de physique. Il assiste aux cours de Rouelle, professeur au Jardin du Roi, savant célèbre au comportement très original, qui enseigne avec fougue la théorie du phlogistique. Charles suit aussi les conférences que l'abbé Nollet dispense au collège de Navarre. Esprit curieux qui s'intéresse surtout à l'électricité statique. « ardent apôtre de la physique mondaine », l'abbé Nollet soumet ses auditeurs aux décharges d'une bouteille de Leyde. C'est aussi un scientifique rigoureux, inventeur de l'électroscope à feuilles d'or.

Lorsqu'en 1779, victime de compressions budgétaires, Charles est remercié, il lui faut trouver de

nouvelles occupations. Son penchant pour les sciences, ses connaissances nouvellement acquises et l'engouement du public l'incitent à ouvrir, lui aussi, un cours de physique expérimentale (1). Il loue un local place des Victoires, achète du matériel et se lance dans l'enseignement.

Charles se révèle rapidement un excellent professeur, son éloquence est facile (2), ses cours sont clairs. Ainsi ses élèves sont nombreux et son succès est total. Conté (1755-1805), connu pour son invention de la mine de crayon, et Robertson (1763-1837), illusionniste à la lanterne magique, ont suivi son enseignement. Charles prendra plus tard pour assistant Coutelle (1784-1835), que nous retrouverons, pendant la révolution, commandant d'une compagnie d'aérostation militaire.

Charles est aussi un expérimentateur très doué. Il prépare les manipulations qui illustrent ses cours avec un soin extrême, leur réalisation provoque « l'enchantement de l'assistance ». Nous avons à ce sujet le témoignage de Franklin (1706-1790). Rappelons que Franklin, autodidacte, ancien directeur d'imprimerie, fut l'un des premiers à comprendre que la foudre est une décharge électrique. Son expérience du « cerf-volant paratonnerre » de 1752 le rendit célèbre. Il savait monter des expériences amusantes d'électrostatique, comme l'araignée

électrique. Priestley (3) rapporte qu'en 1748, Franklin et ses amis tuèrent un dindon par commotion électrique, le firent rôti dans un feu allumé par les étincelles d'une bouteille de Leyde, et burent à la santé de tous les physiciens dans des verres électrisés.

Après deux courts séjours, Franklin était revenu en France en 1776 (4) pour représenter les Provinces Unies et obtenir l'appui de Versailles dans leur lutte pour l'indépendance.

Avec un sens très sûr de la publicité on le voyait, habillé simplement en « quaker », dans tous les salons, dans toutes les expositions, et aussi dans les cabinets de physique. C'est ainsi qu'il assista aux expériences de Charles et le félicita en ces termes :

*« Jeune homme, la nature semble vous obéir, puissiez-vous l'asservir pour le bonheur de l'humanité »*

## La chimie

La seconde moitié du dix-huitième siècle voit la naissance de la chimie moderne.

Jusqu'à la dernière décennie du siècle, la chimie est dominée par la théorie du phlogistique, inventée par Stahl, professeur à l'université de Halle et médecin du Roi de Prusse. Cette théorie repose sur une constatation simple : au cours d'une combustion, il s'échappe un principe volatil ; c'est le phlogistique. Si, par exemple, une huile brûle facilement, c'est qu'elle contient beaucoup de phlogistique ! Les métaux que l'on calcine perdent leur phlogistique. L'ennui, c'est que les oxydes, appelés chaux métalliques, ont une masse supérieure à celle des métaux, car leur phlogistique est négatif !

Stahl interprétait les combinaisons chimiques par l'intervention d'un principe mystérieux : l'affinité. Ce terme a d'ailleurs perduré, on le trouve aujourd'hui dans les cours de thermodynamique, mais avec une définition précise. Les grands chimistes de l'époque sont « phlogisticiens » ce qui ne les empêche pas de découvrir quelques corps purs gazeux. Black (1728-1799) découvre en 1757 l'air fixe (le dioxyde de carbone) qui se dégage pendant la combustion du charbon ou au cours de la respiration. Cavendish (1731-1810) prépare l'air inflammable

(l'hydrogène) en 1766, par action de l'huile de vitriol (acide sulfurique) diluée sur le fer. Dès 1772, Lavoisier, en chauffant du plomb, reconnaît que son poids augmente, il en conclut qu'il a absorbé une partie de l'air ambiant. En soumettant la chaux formée à une haute température, il retrouve le plomb initial. Priestley (1733-1804) découvre en 1774 l'air déphlogistiqué (l'oxygène). Toujours en 1774, Scheele obtient pour la première fois du chlore.

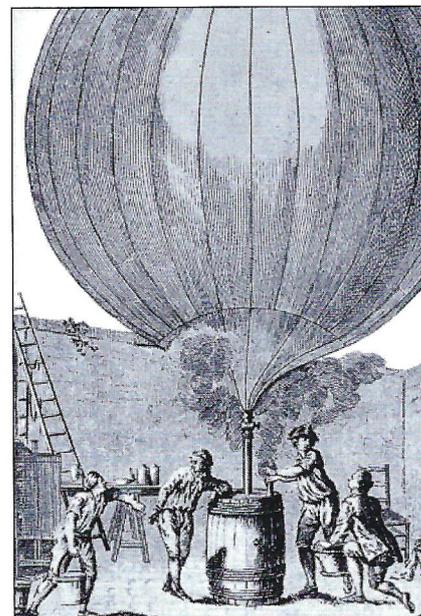
Charles se tient au courant de ces découvertes et, plus physicien que chimiste, mesure la densité des gaz et leur compressibilité (leur « ressort »). C'est ainsi que notre physicien mesure la densité de l'hydrogène (14 fois plus léger que l'air) et amuse ses élèves en gonflant des bulles de savon avec ce gaz.

## Les ballons

En 1783, les frères Montgolfier (5), fabricants de papier, envisagent de s'élever dans les airs au moyen d'un ballon rempli d'air chaud. Profitant de la réunion des états particuliers du Vivarais, à Annonay, ils décident de réaliser une expérience publique. Ils construisent une enveloppe de toile d'emballage renforcée d'une triple épaisseur de papier, de 11,4 mètres de diamètre (840 mètres cubes) et la gonflent à l'air chaud. Le ballon s'élève à 2000 mètres (environ) et se pose deux kilomètres plus loin (4 juin 1783). Le Roi charge l'Académie d'étudier ce nouveau procédé.

A cette époque, tous ceux qui s'intéressent aux ballons savent qu'il existe deux possibilités de s'élever dans les airs : utiliser l'air chaud ou l'hydrogène. Charles qui connaît bien l'hydrogène et sait le fabriquer, du moins en petite quantité, par action de l'acide sulfurique dilué sur la limaille de fer, discute avec les frères Robert de la seconde possibilité. Les frères Robert sont constructeurs d'instruments de physique et leur atelier est situé place des Victoires, à côté du cabinet de Charles.

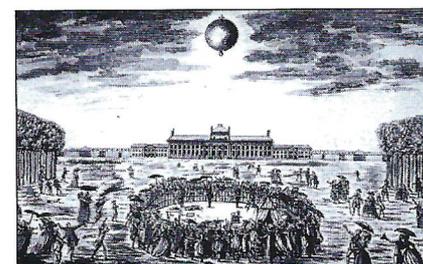
Le problème consiste à réaliser une enveloppe légère, élastique et imperméable à l'hydrogène, qui diffuse beaucoup plus rapidement que l'air. Les frères Robert préconisent l'utilisation de taffetas, revêtu de gomme



Gonflement du ballon à hydrogène de Charles et Robert. 1783. Eau forte par Sellier.

de caoutchouc. Il s'agit de la gomme ramenée d'Amérique en 1745 par La Condamine (1701-1774), gomme que les Indiens appellent « cahuchu », le bois qui pleure. En 1747, Fresneau (1703-1770), ingénieur militaire à Cayenne, réussit à identifier l'arbre producteur du latex que les Indiens font coaguler sur un feu de bois. Revenu en France en 1748, il essaye de nombreux solvants en vue d'obtenir par évaporation une gomme imperméabilisante : le jus de citron, l'eau de vie, l'huile de noix... Enfin, en 1763, il trouve l'essence de térébenthine : « l'esprit de térébenthine, si l'on peut venir à bout d'en avoir de véritable, produirait l'effet désiré ». Le résultat est confirmé par Macquer en 1768 (6).

Les frères Robert réalisent (7), dans leur atelier de la place des Victoires, un ballon sphérique de 3,90 m de diamètre (volume 32 m<sup>3</sup>), constitué de 24 fuseaux cousus, réalisés en taffetas enduit d'une gomme de caoutchouc. Charles, qui supervise l'opération, s'occupe particulièrement



Première ascension libre d'un ballon gonflé à l'hydrogène, le 27 août 1783. Collection Association Les Ailes Brisées

de la fabrication d'hydrogène. Le 24 août 1783 le ballon est terminé et l'opération de gonflement commence. A vrai dire, la fabrication d'hydrogène est rudimentaire. La réaction de l'acide sulfurique sur la limaille est obtenue dans un tonneau dont la partie supérieure est percée de deux trous : dans l'un on verse alternativement l'acide et la limaille, l'autre est relié au ballon par un tuyau de cuir qui véhicule l'hydrogène formé. Il faut trois jours pour fabriquer les 32 m<sup>3</sup> utiles car les fuites sont nombreuses. Nous ne connaissons pas la dilution de l'acide employé mais on sait que le gaz produit réchauffe l'enveloppe et qu'il faut refroidir celle-ci par une aspersion d'eau. Le caoutchouc, qui n'est pas vulcanisé (la vulcanisation sera inventée par Goodyear en 1839), devient en effet poisseux à la chaleur.

Dans la nuit du 26 au 27 août, le ballon, provisoirement gonflé – il y a toujours des fuites – et le tonneau générateur d'hydrogène sont transportés sur le Champ-de-Mars par la rue des Petits Champs, le Carrousel, le pont Royal, les Invalides. Le gonflement est achevé sur le Champ-de-Mars, le ballon est obturé et le « lachez tout » intervient à 17 heures devant une foule enthousiaste, évaluée à trois cent mille personnes. Le ballon disparaît rapidement dans les nuages car le ciel est couvert. Il éclate en altitude et tombe à Gonesse, à 16 kilomètres de Paris. Il est dépecé par les villageois comme le montrent les gravures de l'époque.

Désormais les frères Montgolfier et Charles sont concurrents, les deux conceptions, l'air chaud et l'hydrogène sont en compétition. Les essais vont s'accélérer.

Etienne Montgolfier (8) s'installe dans la propriété de l'un de ses clients : Réveillon, marchand de papiers peints, rue de Montreuil, au Faubourg Saint-Antoine. Il construit, aidé des ouvriers de Réveillon, un ballon de 1000 m<sup>3</sup>. Un vol probatoire, devant une commission de l'Académie des Sciences, est tenté le 12 septembre.

Après une ascension de quelques mètres, un orage éclate, endommage le ballon et le rend inutilisable. Or il est prévu de faire une démonstration

de vol habité, à Versailles, devant le Roi, six jours plus tard. Etienne et les ouvriers de Réveillon reprennent leur activité et fabriquent un nouveau ballon de 1200 m<sup>3</sup>. Le 19 septembre, une « Montgolfière » s'élève dans la cour du château de Versailles, emportant dans une petite nacelle en osier, un coq, un canard et un mouton. Les académiciens ont jugé que le comportement d'un mouton serait plus riche d'enseignement que celui d'un canard ou d'un coq, voguant dans leur milieu naturel.

Le ballon se pose, dix minutes plus tard, dans une clairière du bois de Vaucresson ; les animaux sont sains et saufs.

En toute logique, le prochain envol doit emporter des hommes, malgré l'avertissement de l'astronome Lalande, en réalité Lefrançois de Lalande : « *il est démontré impossible, dans tous les sens, qu'un homme puisse s'élever et se maintenir en l'air* » (9).

Etienne Montgolfier et l'équipe de Réveillon se remettent au travail, aidés par Pilâtre de Rozier (1756-1785), autodidacte très remuant, doué d'entregent, mais aussi remarquablement efficace :

*« Un étourdi, quoique savant,  
Aimable, vif et pétillant,  
Regarde tout, par trop de zèle.  
Il veut tout voir, tout ordonner,  
Tout à sa guise, retourner. »* (10).

Le ballon, grossièrement un ellipsoïde (hauteur : 18 mètres, diamètre : 15 mètres) a un volume de 2200 m<sup>3</sup>. Réalisé en toile de coton doublée de papier, il est magnifiquement décoré. Il emporte une galerie circulaire en osier, divisée en quatre compartiments, deux pour les aéronautes et deux pour la paille. Celle-ci doit être enfournée, pendant le vol, dans un foyer central, constitué d'un grillage. Le ballon, retenu par des cordages, est essayé par Pilâtre de Rozier le 12 octobre, puis par le marquis d'Arlandes, le duc de Chartres, monseigneur Dillon.

Les essais étant jugés concluants, la « Montgolfière » est transportée sur une pelouse du château de la Muette, dans le bois de Boulogne (aujourd'hui rue d'Andigné, près de l'allée Pilâtre de Rozier). Le 21 novembre, le ballon s'élève, emportant Pilâtre de Rozier et le marquis d'Arlandes devant un

public choisi. La « machine » monte à 3000 pieds (920 mètres) et au bout de vingt-cinq minutes se pose sans encombre entre le Moulin des Merveilles et le Moulin Vieux de la butte aux Cailles, approximativement sur l'actuelle place d'Italie. Nous avons une relation du voyage, écrite par le marquis d'Arlandes qui signale un début d'incendie, mais montre surtout l'énergie et l'énerverment de Pilâtre devant les réactions trop lentes du marquis.

Tout Paris a vu la « Montgolfière » qui a décrit un arc de cercle entre Passy et la place d'Italie. Les gazettes indiquent 400.000 personnes, alors que Paris comptait à l'époque environ 500.000 âmes. De nombreuses chansons populaires sont écrites, elles vantent, pour la plupart, les mérites des aéronautes. Dans l'une, on se moque gentiment de l'astronome Lalande :

*« Dans un char aérien de Pilâtre et d'Arlandes,  
Doit s'élever, dit-on l'astronome Lalande.  
C'est fort bien fait à lui de visiter les cieux,  
Peut-être, à son retour, en parlera-t-il mieux ! »* (11).

## La « Charlière »

Pendant ce temps que fait Charles ? Il prépare dans une salle du palais des Tuileries, un nouvel aérostat sphérique, de 26 pieds de diamètre (8,44 mètres), d'un volume de 315 m<sup>3</sup>, dont il faut souligner le caractère novateur.

Depuis un mois, Charles et les frères Robert (12) travaillent à sa réalisation. Il est constitué d'une cinquantaine de fuseaux de taffetas, alternativement jaunes et rouges, mais légèrement jaunis par l'enduit en caoutchouc. Une nacelle en osier, surnommée « le Char », doit accueillir deux aéronautes, leurs instruments : baromètre et thermomètre, ainsi que des couvertures et des victuailles. La nacelle est suspendue au ballon par un filet. Une manche d'appendice, ouverte, permet au gaz de s'échapper lorsque, en altitude, la pression atmosphérique décroît. Une soupape, au sommet (en laiton avec joint de cuir), est commandée par un câble qui traverse le ballon et sort par la manche. Elle est utile pour dégonfler

rapidement l'enveloppe. Enfin, l'équilibre aérostatique étant délicat, Charles a prévu d'emporter un lest, lui permettant d'augmenter, à volonté, l'altitude.

Le 26 novembre la « machine » est transportée jusqu'au jardin des Tuileries, à l'emplacement actuel du grand bassin. Le gonflement peut commencer. La production d'hydrogène, bien qu'améliorée, est restée dangereuse. Le tonneau générateur du gaz, fort sagement, n'a pas été extrapolé, mais remplacé par douze tonneaux identiques, placés en cercle autour de l'enveloppe. Trois personnes servent régulièrement les tonneaux en y introduisant successivement l'eau, l'acide et la limaille de fer. Vraisemblablement les douze conduites sortant des tonneaux et véhiculant l'hydrogène aboutissent à un barboteur unique dans lequel le gaz est refroidi et lavé avant d'entrer dans l'enveloppe.

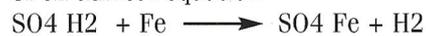
Les fuites sont nombreuses, et la présence d'une lanterne provoque une forte explosion, l'un des assistants est projeté à terre. Le second mémoire de Charles sur l'aérostatique nous renseigne sur les poids de fer, d'acide sulfurique et d'eau utilisés pour la production d'un pied cube d'hydrogène :

2 onces - 2 gros de fer  
soit 68,84 g

6 onces - 6 gros d'acide sulfurique  
soit 206,51 g

27 onces d'eau  
soit 826,04 g

Si on admet l'équation



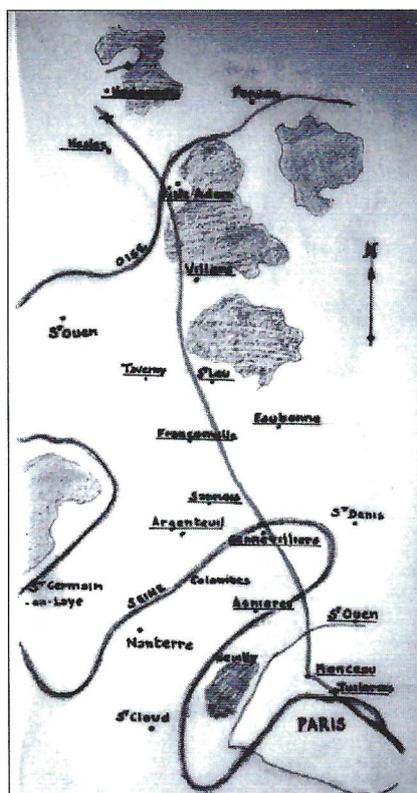
on remarque que le volume d'hydrogène obtenu est surévalué par rapport au fer utilisé (à moins que le volume d'hydrogène ait été mesuré à 65°C). En prenant pour base la consommation de fer et en supposant la réaction totale, on calcule une concentration de l'acide sulfurique de 58 %, ce qui n'est pas étonnant si cet acide a été fabriqué dans les chambres de plomb de Holker à Rouen (1766). L'importante quantité d'eau est destinée à limiter la température de l'hydrogène, jugée excessive au cours de l'essai du Champ-de-Mars. Nos estimations nous amènent à penser que la température du gaz est inférieure à 35°C.

L'envol est prévu le lundi premier décembre 1783.

Dans la nuit de dimanche à lundi un officier de la garde Royale s'approche de Charles et lui dit : « *Monsieur, par ordre du Roi, je vous ordonne de surseoir à votre expérience, en raison des dangers qu'elle présente* ». Notre physicien, exténué par trois jours de gonflement, se précipite au pavillon de Flore où habite Breteuil, secrétaire d'état, et obtient l'autorisation de celui-ci, qui promet de convaincre le Roi.



Départ des Tuileries le 1er décembre 1783. Eau forte gravée par Boutelou. Collection du Musée de l'Air et de l'Espace

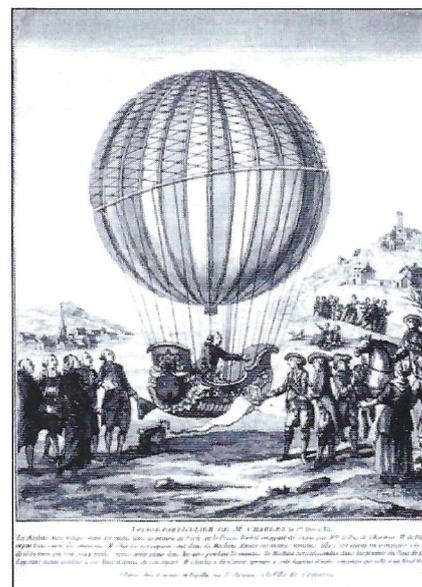


Trajet de Charles et Robert le 1er décembre 1783

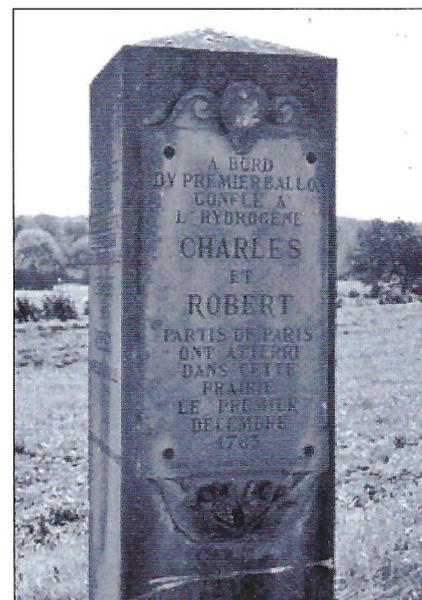
Le premier décembre, juste avant le départ de l'aérostate, Charles prévoit de lancer un petit ballon d'essai pour connaître la direction du vent, ce qui est important, car les arbres des Tuileries sont proches. Il demande à Etienne Montgolfier de couper le lien qui retient ce ballon en lui disant gracieusement : « *Coupez la corde,*

*Monsieur, car c'est à vous qu'il revient de nous ouvrir la route des cieux* ».

Dans « le Char » ont pris place Charles et Marie Noël Robert. L'envol a lieu à 13h45. La foule qui assiste au départ, très impatiente, est considérable et les grilles des Tuileries sont forcées. Sans difficulté de navigation, la « Charlière » conduit les deux aéronautes jusqu'à Nesle la Vallée, à 36 kilomètres au nord-ouest de Paris, en deux heures. Des cavaliers ont suivi le ballon depuis Paris, parmi eux on trouve le duc de Chartres. L'altitude est restée sensiblement constante, voisine de 585 mètres (300 toises). Charles dépose Marie Noël Robert au lieu-dit : « la Plaine » à Nesle la Vallée, signe le procès-verbal du vol et repart seul.



Arrivée à Nesle la Vallée  
Gravure du 18<sup>e</sup> siècle  
Esnauts et Rapilly. Paris



Monument commémoratif de l'atterrissage de Charles et Robert à Nesle la Vallée

Il est seize heures cinq minutes et le soleil vient de se coucher. N'ayant pas trouvé, dans sa hâte, un lest pour compenser le poids de son compagnon, il monte dans les airs à très grande vitesse, plus de 5 mètres par seconde au départ, et atteint l'altitude de 3000-3300 mètres. La température descend à  $-10^{\circ}$  ou  $-15^{\circ}\text{C}$ . Il assiste à un deuxième lever du soleil, puis, ayant manœuvré la soupape supérieure, descend rapidement et retourne dans l'obscurité. Charles semble très secoué par ce second vol qui n'a duré que trente-cinq minutes : « *Je fus rappelé à moi-même par une douleur très extraordinaire que je ressentis dans l'intérieur de l'oreille droite et dans les glandes maxillaires.* »

L'atterrissage a lieu de nuit à deux kilomètres au nord-est d'Hédouville, près de la lisière ouest du bois de la tour du Lay, proche du hameau des Tuileries, au lieu-dit : « le grand Arpent », en face de la chapelle Saint-Robert, construite au dix-neuvième siècle. Notre physicien a donc quitté les Tuileries de Paris pour rejoindre, trois heures plus tard les Tuileries d'Hédouville.

Charles nous a laissé une description très détaillée de ses deux voyages aériens. Outre les noms des sites survolés, on y trouve les températures et pressions relevées ainsi que les manœuvres effectuées. Les impressions et sensations personnelles, bien dans le goût de l'époque, ne sont pas oubliées.

Les mesures de pression et de température permettent de calculer les altitudes atteintes, et de vérifier leur cohérence, bien que les données relatives au second vol, obtenues dans la précipitation, soient plus difficilement exploitables. Nos calculs montrent que le ballon a atteint une altitude moyenne comprise entre 3040 et 3230 mètres.

Il faut souligner la grande maîtrise de Charles dans la conduite de son aérostat et son sang froid lorsqu'il a dû subir une vitesse ascensionnelle de 5 à 10 mètres par seconde, qui pouvait entraîner l'explosion de l'enveloppe et la chute. Il se trouvait alors dans des conditions assez inconfortables, écoutons-le : « *D'abord, afin d'observer le baromètre et le thermomètre placés à l'extrémité du Char, sans*

*rien changer au centre de gravité, je m'agenouillai au milieu, la jambe et le corps tendus en avant, ma montre et un papier dans la main gauche, ma plume et le cordon de la soupape dans la main droite* ».

On peut essayer de dresser un bilan, à la fois scientifique et technique, de l'équipée du premier décembre 1783. La production d'hydrogène est toujours longue, laborieuse, voire dangereuse, malgré les modifications apportées depuis l'essai du Champ-de-Mars : le refroidissement et le lavage du gaz. Le procédé sera amélioré par Alban et Vallet, industriels qui fabriquent du chlore au Moulin de Javel. C'est ainsi que Blanchard (1753-1809), vétéran de l'aérostation, au printemps de 1784, peut remplir son ballon en quelques heures.

Examinons la « Charlière ».

L'ensemble a été bien conçu et montre toute l'habileté de Charles et des frères Robert. Le filet, la soupape, la manche, la nacelle ont donné toute satisfaction, même dans les conditions acrobatiques du second vol. Le lest a montré son utilité pendant le premier vol (altitude sensiblement constante) et son absence a été cruellement ressentie au cours du second vol.

Une critique cependant : le cercle en bois qui fait la liaison entre le filet et les suspentes (appelé « cercle de charge ») est équatorial et risque de provoquer l'usure de l'enveloppe par frottement (il avait été enveloppé d'un tissu). D'autre part, les gravures de l'époque montrent qu'il pouvait se déplacer et incliner dangereusement la nacelle. Le « cercle de charge » a été rapproché de la nacelle dès le début du dix-neuvième siècle.

On peut dire que les réalisations de Charles et ses principes de navigation sont toujours d'actualité. Il a créé, en cinq semaines, les techniques de l'aérostation. Les seules innovations à venir seront le guide-rope et le panneau de déchirure.

Une comparaison, même sommaire, entre les deux procédés en compétition : l'air chaud et l'hydrogène, s'impose. Les Montgolfières sont d'une conception très simple : elles utilisent la force ascensionnelle d'un fluide commun et gratuit, l'air, dont il faut élever la température. Ceci

impose l'emport d'un combustible et une certaine maîtrise dans l'alimentation d'un foyer pendant le vol, tout en veillant à ce que le feu ne se propage pas vers l'enveloppe. Les ballons à l'hydrogène, d'un manière plus aisée et plus souple, exigent la fabrication d'un gaz coûteux (au dix-huitième siècle) qui peut s'enflammer, voire exploser. La réalisation de l'enveloppe demande beaucoup de soin, car celle-ci doit être imperméable à l'hydrogène.

En compensation de ces difficultés, les « Charlières » ont une force ascensionnelle de  $1140\text{ g/m}^3$  (si l'air est à  $15^{\circ}\text{C}$  et à la pression atmosphérique contre  $200\text{ g/m}^3$  pour les « Montgolfières »). Cette dernière valeur dépend évidemment des températures de l'air à l'intérieur et à l'extérieur du ballon (nous avons pris respectivement  $70^{\circ}\text{C}$  et  $15^{\circ}\text{C}$ ). La différence explique que, pour enlever la même masse, les ballons remplis d'hydrogène ont un volume beaucoup plus faible que les ballons à air chaud, dans un rapport variant de 1/5 à 1/7.

D'un principe très simple, les « Montgolfières » auraient pu voir le jour un siècle ou deux siècles plus tôt, alors que les « Charlières », qui bénéficient des progrès de la chimie : fabrication de l'acide sulfurique (Ward en 1740), découverte de l'hydrogène (Cavendish en 1766), découverte du caoutchouc et de son solvant (Fresneau en 1747-1763, Macquer en 1768), ne pouvaient exister avant 1770.

Les premiers vols humains ont un succès médiatique considérable, du jour au lendemain la « ballomanie » se répand. On trouve des représentations des ballons sur les gilets, les tabatières, les assiettes, les meubles, et même les coiffures. Les chansonniers s'en donnent à cœur joie :

« Ecoute ma mie,  
Dans les Tuileries  
On a vu Charles et Robert  
S'allant promener en l'air,  
Ça faisait envie..... » (13)

L'Académie des Sciences, dès le mois de décembre 1783, reconnaît les mérites des frères Montgolfier en les nommant membres correspondants. Charles est reçu à l'académie le 4 décembre et gratifié, honneur insigne, d'un jeton de la docte

assemblée. Meusnier de Laplace a calculé l'altitude maximale atteinte au dessus d'Hédouville et a trouvé 1643 toises, soit 3204 mètres, proche des 1524 toises, soit 2972 mètres revendiqués par Charles et des 3135 mètres de nos évaluations (valeur moyenne entre 3040 et 3230 mètres).

L'Académie des Sciences, pour répondre au désir du Roi, crée en décembre 1783 une commission pour le perfectionnement des aérostats. Elle lui assigne, sous l'impulsion de Lavoisier, quatre objectifs : la production d'hydrogène, en grande quantité et à moindre coût, l'étanchéité des enveloppes, les possibilités de mouvement dans le plan vertical et horizontal. On voit que l'Académie penche désormais pour les ballons à hydrogène. Ce qui intéresse surtout Lavoisier, c'est la composition de l'eau, car en juin 1783, aidé de Laplace, il en a réalisé la synthèse. Le perfectionnement des globes à hydrogène est une occasion de poursuivre ses expériences : « *La commission dont nous fûmes chargés pour le perfectionnement des machines aérostatiques nous conduisit nécessairement à la recherche sur le moyens de faire de l'air inflammable (de l'hydrogène) en grand. Il était naturel que nous nous attachions à le tirer de l'eau* » (14).

Si sur les quatre objectifs de la commission, trois ont trouvé une solution provisoire grâce aux travaux de Charles et des frères Robert, il n'en va pas de même pour le quatrième : la maîtrise du déplacement horizontal. Tous les essais tentés en 1784-1785 pour diriger les ballons par des palmes, rames, voiles ou panneaux demeurent vains. Citons les expériences de Blanchard le 2 mars 1784 (Champ-de-Mars-Billancourt), puis le 7 janvier 1785 (traversée de la Manche : Douvres-forêt de Guînes), ou celle des frères Robert le 5 juillet 1784 (Parc de Saint-Cloud-Parc de Meudon) qui n'ont apporté aucune solution.

La maîtrise du déplacement horizontal ne sera réalisée qu'en 1852 par Giffard, grâce à une hélice mue par un moteur à vapeur.

Poursuivant son programme, Lavoisier, aidé de Meusnier de Laplace, produit de l'hydrogène, par

action de l'eau sur un canon de fusil chauffé au rouge, en mars 1785. L'opération est répétée devant un aréopage de chimistes, ainsi que la recombinaison de cet hydrogène avec l'oxygène d'une expérience préalable, pour synthétiser l'eau.

Les bilans réalisés détruisent définitivement la théorie du phlogistique.

C'est aussi en 1785 que Pilâtre de Rozier construit un aérostat mixte : un ballon à air chaud, cylindrique, surmonté d'un ballon sphérique gonflé à l'hydrogène. Il envisage de traverser la Manche avec cette « machine », en partant de Boulogne. Charles l'en avait dissuadé : « *J'avais dit, en parlant du procédé de Monsieur Montgolfier et du mien : malheur à qui voudrait nous réunir* ». Peu après son envol, le ballon prend feu, non par extension du foyer, mais vraisemblablement par l'inflammation de l'hydrogène provoquée par une étincelle d'origine électrostatique. En effet le cordon de la soupape, courant le long du globe supérieur, frotte sur l'enveloppe et peut ainsi induire des charges électriques. Le ballon chute et entraîne la mort de Pilâtre et de son coéquipier Romain. Les corps sont inhumés dans le cimetière de Wimille, près de Boulogne.

L'engouement pour les ballons va s'apaiser. Les aérostats, faute de pouvoir être dirigés, ne seront plus qu'un moyen de promenade aléatoire, en attendant les applications militaires de la fin du dix-huitième siècle.

### Les aérostats militaires

Huit années plus tard, en 1793, la République Française est en danger. Une commission du comité de Salut Public, la « commission des essais » (15) est chargée de trouver une application militaire aux récentes découvertes. Sous la présidence de Guyton de Morveau, on y trouve : Monge, Berthollet, Lavoisier, Fourcroy. La commission préconise l'utilisation de ballons captifs gonflés à l'hydrogène pour l'observation du champ de bataille. Le soufre étant réservé à la fabrication de la poudre à canon, il n'est plus question d'utiliser l'acide sulfurique pour produire de l'hydrogène. On décide donc de mettre en pratique l'oxydation du fer par la vapeur d'eau, comme l'avait réalisée, à petite échelle, Lavoisier en 1785.

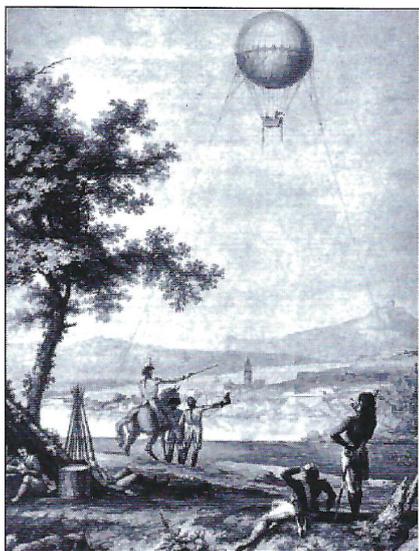
Le 25 octobre 1793, le comité de Salut Public arrête : « *qu'il serait préparé le plus promptement possible un ballon capable de porter deux hommes, pour faire, sous cordes, des observations à l'armée du Nord* ». La « commission des essais » fait appel à Jean-Marie Coutelle, ancien assistant de Charles, et à Nicolas Conté (16), qui eut un destin extraordinaire. Artiste peintre, formé dans l'atelier de Greuze, il mène dès 1785 une double vie : il fait des portraits le jour et le soir il étudie des publications de physique et de chimie. C'est aussi un habitué du cabinet de physique de Charles, où il côtoie Coutelle. Ce dernier lui demande de construire le premier four de production d'hydrogène par oxydation du fer. Dans ce four, dont nous possédons les plans signés de Conté (17), est logée une batterie de tubes de fonte remplis de copeaux de fer, chauffés à 980-1000°C en présence de vapeur d'eau. On pouvait ainsi gonfler un ballon de 600 m<sup>3</sup> en quinze heures. Conté doit aussi améliorer l'étanchéité des enveloppes car les aérostats militaires doivent pouvoir rester en observation pendant plus de douze heures. Après un vol captif réussi aux Tuileries, le comité de Salut Public installe les futurs aérostats, leur ballon et leur four, dans l'orangerie du ci-devant Château Neuf de Meudon. L'ensemble du Château Neuf et du Château Vieux est devenu le Centre National de l'Artillerie et des Machines de guerre. Berthollet et de Laclos y expérimentent des boulets creux, invention de l'auteur des « Liaisons dangereuses ».

En avril 1794 une première compagnie d'aérostats est créée, sous les ordres de Coutelle, et envoyée à l'armée de Sambre-et-Meuse. Elle se distingue en juin à Maubeuge, Charleroi et Fleurus.

Toujours en juin 1794, une seconde compagnie est créée. A Meudon plusieurs ballons sont construits. Conté instruit les aérostats, dirige la réalisation des ballons, construit des fours à hydrogène, codifie les manœuvres, définit des moyens de communication avec le sol. Il a laissé de belles aquarelles représentant les différentes phases de fabrication des enveloppes.

L'année 1794 lui est bénéfique : entre deux cours dispensés à Meudon, il invente la mine de crayon en graphite et en argile, destinée à remplacer la plombagine d'origine anglaise.

Il est nommé démonstrateur au Conservatoire National des Arts et Métiers, en compagnie de Leroy et de Vandermonde. En 1795, une explosion provoquée par une fuite d'hydrogène dans l'atelier de Meudon, coûte à Conté son œil gauche.



Ballon captif devant Mayence en 1795. Aquarelle de Conté. Collection du Musée de l'Air et de l'Espace

A partir de 1796, les compagnies d'aéroliers ne sont plus employées, et Hoche demande leur dissolution. Il faut reconnaître que la guerre de mouvement n'est pas favorable aux ballons captifs. Le gonflement peut durer, comme nous l'avons vu, quinze heures, mais quelquefois vingt heures ou vingt quatre heures ! Les déplacements des ballons remplis sont lents, enfin le transport des matériaux et la construction des fours posent beaucoup de problèmes pour une armée en campagne.

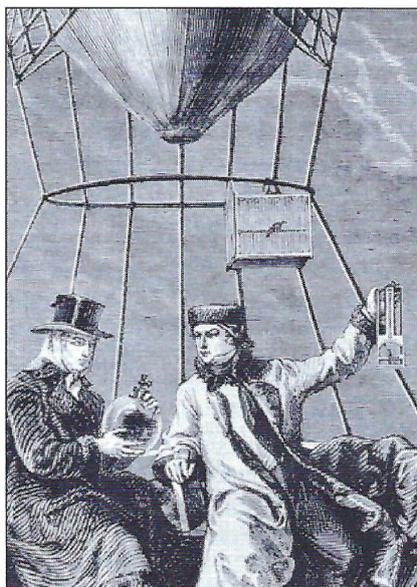
Conté convainc cependant Napoléon d'emmener une compagnie d'aéroliers en Egypte. Malheureusement les deux navires transporteurs du matériel sont détruits, l'un en baie d'Alexandrie, l'autre à Aboukir. Après le désastre d'Aboukir, l'armée est coupée de tout ravitaillement. Conté donne alors toute sa mesure en construisant les moyens de subsistance d'une armée de 48.000 hommes : métiers à tisser, moulins à farine, forges, ateliers d'armes...

A son retour d'Egypte il se charge de

l'impression des vingt-neuf volumes de la « Description de l'Egypte » ; il invente à cette occasion une machine à graver les ombres pour l'impression des neuf cents planches de cette œuvre monumentale. Cette machine est exposée au Musée des Arts et Techniques.

### Les missions scientifiques

Les « Charlières » sont utilisées pour deux missions scientifiques au début du dix-neuvième siècle. Le 18 juillet 1803, Robertson, accompagné de Lhoest, effectue à Hambourg une ascension au cours de laquelle il atteint 7.400 mètres. Il constate, à haute altitude, un affaiblissement du champ magnétique terrestre et une diminution de la « force » (?) d'une pile de Volta. Robertson avait, rappellons-le, suivi les cours de Charles et monté des spectacles où, à l'aide d'une lanterne magique, il projetait des « fantasmagories » plus ou moins terrifiantes sur de la fumée. Il a très mauvaise réputation parmi les physiciens et les académiciens accordent peu de crédit à ses travaux. Ils chargent Gay-Lussac et Biot de vérifier les observations de Robertson (19).



Ascension de Gay-Lussac et Biot le 24 août 1804. Gravure de Deschamps. Revue La Nature, premier semestre 1874

Ceux-ci s'envolent, aidés par Conté, du jardin du Conservatoire National des Arts et Métiers le 4 août 1804. Ils emportent thermomètre, baromètre, boussole, pile de Volta, ampoule vide pour analyse de l'air en altitude et quelques animaux : hirondelle, grenouille, abeilles. Le ballon trop chargé, n'atteint que 4.000 mètres. C'est le premier vol réellement scien-

tifique. Gay-Lussac fait une seconde ascension, seul, le 16 septembre 1804 et atteint 7.000 mètres. Les mesures effectuées contredisent les observations de Robertson. Gay-Lussac devient alors célèbre. A vrai dire, il est déjà connu des physiciens. Il vient de calculer (en 1802) le coefficient de dilatabilité thermique des gaz à pression constante. La valeur trouvée : 0,00375 est proche de la valeur admise aujourd'hui : 0,003661.

### Les cours et travaux scientifiques de Charles



Médaille commémorative des vols de Pilâtre de Rozier & d'Arlandes et de Charles & Robert. 1784. Musée de la Monnaie

Nous avons quitté Charles en décembre 1783, après sa réception à l'Académie des Sciences. Le Roi lui octroie, malgré sa désobéissance, une pension de 2000 livres et un logement au Louvre. En 1784, une médaille est frappée. Elle représente la « montgolfière » et au second plan, la « Charlière », avec les noms : L.F. d'Arlandes et F. Pilâtre – J.A.C. Charles et M.N. Robert.

Charles abandonne définitivement l'aérostation, pourquoi ? On peut penser que sa seconde ascension lui a laissé un très mauvais souvenir. C'est un homme d'études, un homme de laboratoire, paisible.

Contrairement à Pilâtre, il n'est pas séduit par le côté aventureux, voire risqué, des ascensions. D'autre part, il n'a aucune fortune personnelle et le matériel coûte extrêmement cher. Le recours aux souscripteurs ou commanditaires, en aliénant sa liberté, lui déplait fortement.

Il reprend donc ses cours avec enthousiasme. Nous avons le détail des 60 leçons (20), qui constituent l'ensemble du cursus proposé à ses auditeurs. En voici la composition :

- 3 leçons sur les propriétés générales de la matière
- 10 leçons de mécanique
- 4 leçons d'hydrostatique
- 3 leçons de pneumatique
- 3 leçons d'hydraulique
- 2 leçons sur les thermomètres et les baromètres
- 10 leçons de chimie : l'acide carbonique, l'hydrogène, la combustion, l'oxygène, la soude, la potasse, l'acide sulfurique, l'acide nitrique, la théorie de la poudre à canon. Histoire et théorie de l'aérostation. Récit de mon ascension.
- 13 leçons d'électricité : machines « électriques », carillon électrique et autres, machine de Nairn, bouteille de Leyde, cadre des conjurés, identité de la foudre et du fluide électrique, décomposition de l'eau, le paratonnerre, les aimants.
- 8 leçons d'optique : lois de la vision, miroirs plans, héliostat, miroirs convexes, miroirs concaves, microscopes, champ des lunettes, lunette de Galilée, chambre noire.
- 4 leçons d'acoustique : cordes, propagation, timbre, poids tendants, notes, violon, violoncelle, alto, contrebasse, harpe, piano forte. Les instruments à vent : hautbois, basson, cor de chasse...

Ces cours, calligraphiés d'une belle écriture, sont consultables à la bibliothèque de l'Institut. On y trouve aussi le recueil des expériences accompagnant les leçons. L'ensemble reflète bien la somme des connaissances, en physique et en chimie, acquises à la fin du dix-huitième siècle.

L'élément féminin est fortement représenté dans l'auditoire de Charles. Celui-ci est bel homme et, semble-t-il, sait profiter de l'ascendant du professeur sur ses élèves. Les 60 leçons sont précédées d'un long discours d'introduction en tête duquel une lettre montre que notre physicien fait grand cas de ses auditrices :

« Ma chère écolière,  
...Que de choses j'ajouterais ici, si je

*croyais que vous voulussiez les entendre. Il ne faut pas qu'une épître dédicatoire ressemble à une déclaration...*

*Permettez-moi que, quelque jour, vous me mènerez à l'école de Platon. C'est à lui que veux dire, et devant vous, combien je vous aime et vous révère. »*

Georges Lenôtre s'est intéressé aux « écolières » de Charles. Il cite une lettre (21) d'une amoureuse de son professeur : « *vous êtes devenu l'objet de toute ma pensée, le héros de mon cœur, le génie qui devait le fixer... Si vous remontez dans le char aérien que mes yeux pleins de larmes ont suivi si longtemps, mon âme y sera...* ». Elle lui écrit encore : « *Je vous demande une seule chose, lors de votre prochain cours de physique, portez cette rose que je vous envoie* ». Charles s'exécute, il épingle la rose sur son cœur. Et l'amoureuse lui exprime sa gratitude : « *Je l'ai aperçue, c'est là que je l'aurais placée* ».

Une chansonnette évoque les succès féminins de Charles :

« *Chanson pour Charles.  
Craignez fillettes, quelque tour,  
J'ai vu le petit dieu sourire ;  
Ce char, en doublant son empire,  
Fournit des ruses à l'amour.  
Cœurs tendres, cœurs ingénus,  
Gardez d'y suivre un téméraire !  
Ce char en sa course légère  
Va jusqu'à l'astre de Vénus* ». (22)

A côté des cours et des expériences destinés aux élèves, Charles mène des recherches personnelles. On a vu qu'il s'est intéressé très tôt aux gaz nouvellement découverts et comment ses connaissances sur l'hydrogène l'ont conduit vers l'aérostation.

Au cours de ses mesures physiques, il remarque, dès 1787, que l'oxygène, l'azote, l'hydrogène, l'acide carbonique, l'air atmosphérique, présentent à volume constant, une même variation relative de pression pour une même variation de température. Malheureusement il ne divulgue pas ses résultats qui ne seront révélés par Gay-Lussac qu'en 1802. (23). Ce dernier précise, dans les Annales de Chimie de l'an 10 : « Le citoyen Charles avait remarqué depuis 15 ans la même propriété de ces gaz (oxygène, azote...), mais

n'ayant jamais publié ses résultats, c'est par le plus grand hasard que je les ai connus ». La postérité a reconnu les mérites de Charles et nous trouvons aujourd'hui, dans nos manuels de physique, au chapitre des propriétés des gaz, la loi de Charles à côté de la loi de Gay-Lussac.

C'est une difficulté réelle rencontrée par tous les biographes scientifiques : Charles ne publiait pas. Nous ne trouvons dans les mémoires de l'Académie des Sciences, entre 1771 et 1790 qu'une seule référence ! Ainsi la plupart de ses travaux ne sont connus que par des témoignages de ses contemporains.

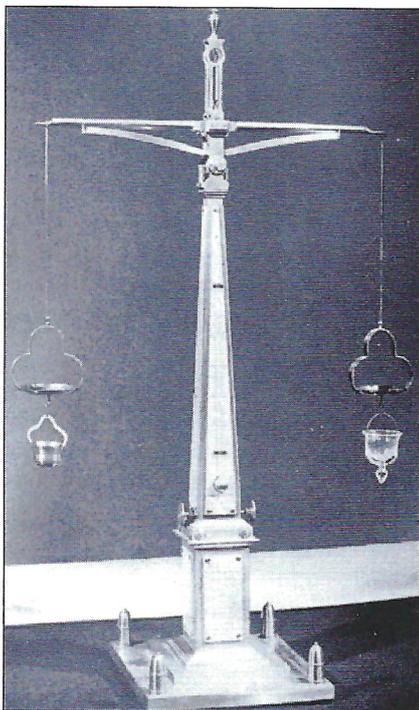
Charles apporte des améliorations aux appareils existants : perfectionnement de l'aréomètre de Fahrenheit, mise au point des aréomètres à masse constante, perfectionnement des goniomètres, modification des lanternes magiques de manière à projeter l'image de petits objets opaques - il invente ainsi le mégascope. On lui doit aussi l'invention d'un aréomètre-thermomètre (ou hydromètre-thermomètre) dont on n'a retrouvé aucune trace. Il s'agit vraisemblablement d'un aréomètre à masse constante, celle-ci étant essentiellement constituée par le mercure du réservoir d'un thermomètre. On pourrait ainsi, avec un seul appareil, mesurer la masse volumique d'un liquide en fonction de sa température.

Enfin, au début du dix-neuvième siècle, notre physicien, éclectique, s'intéresse aux instruments de musique et spécialement à la modulation du son émis par les instruments à corde et à clavier : claveau et clavichord. Une solution à ce problème est trouvée par Schmidt qui réalise et brevète en 1803 un « piano-harmonica » qui est, en réalité, un « piano-violon ».

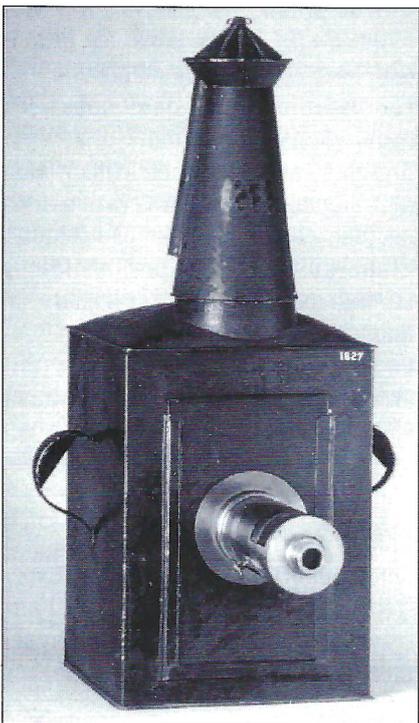
On ne peut énumérer les travaux de Charles sans citer les appareils de son cabinet de physique, qui est selon Fourier, le plus beau d'Europe. Nous avons la chance de posséder, au Musée des Arts et Techniques, plus de cent de ces appareils : aréomètres, baromètres, hygromètres, mégascope, microscopes, bouteilles de Leyde, monocorde à clavier, balance... En 1805 Charles place au Conservatoire des Arts et Métiers plusieurs instruments de physique

provenant du Louvre. En 1807 l'Empereur acquiert les appareils du cabinet de Charles et décide qu'ils seront déposés au Conservatoire, qui en devient propriétaire en 1814.

Ci-dessous l'image d'une très belle balance hydrostatique qui servait à Charles pour l'étalonnage de ses aréomètres et d'un mégascope utilisé comme projecteur dans ses cours.



*Balance hydrostatique du laboratoire de Charles - Musée des Arts et Techniques Conservatoire National des Arts et Métiers*



*Mégascope du laboratoire de Charles Musée des Arts et Techniques Conservatoire National des Arts et Métiers*

## Les honneurs

Dès la naissance de l'Institut de France, successeur des Académies Royales, Charles est nommé membre résident de la section de physique expérimentale de la première classe de l'Académie des Sciences (arrêté du Directoire du 20 novembre 1795). C'est un académicien assidu, très coopératif puisqu'il participe, en 28 ans, à 270 commissions, présente 76 rapports et accepte volontiers de travailler avec ses collègues de l'Académie des Beaux-Arts. Il est nommé bibliothécaire de l'Institut en 1813 puis président de la première classe de l'Académie des Sciences en 1816.

En cette année 1816, Charles crée un laboratoire de physique expérimentale au Conservatoire et propose de faire gratuitement un cours de mécanique et d'hydraulique aux meilleurs élèves de l'école de dessin. Ce cours ne dure que deux ou trois ans, et est supprimé au départ de Charles, malade en 1819.

La chaire de physique appliquée aux arts, que l'on peut considérer comme l'héritière de ce premier cours, n'apparaîtra qu'en 1829, Pouillet en sera le titulaire. En 1817, le nouveau règlement du Conservatoire Royal des Arts et Métiers prévoit la création d'un Conseil d'Amélioration et de Perfectionnement. Charles fait partie de ce conseil en compagnie de deux autres académiciens, Thénard et Héron de Villefosse.

## Julie Bouchaud

Entre-temps, l'académicien Charles a rencontré Julie Bouchaud et cet événement va bouleverser sa vie et lui apporter, bien malgré lui, une seconde immortalité. Cette rencontre a été, semble-t-il, provoquée par des amis de Charles au printemps 1804. Qui était Julie Bouchaud ? Elle est née en 1784, à Saint-Domingue où son père, propriétaire de la plantation des Hérettes, s'autorisait à se faire appeler Bouchaud des Hérettes. La situation en 1790, à Saint-Domingue, est explosive. L'abbé Grégoire écrit en octobre 1790 une « Lettre aux philanthropes sur les malheurs, les droits et les réclamations des gens de couleur à Saint-Domingue ». En effet, selon les décisions de la Convention, seuls les mulâtres, fils d'hommes libres,

obtiennent l'égalité des droits avec les blancs. Exaspérés de cette discrimination, les noirs se révoltent et incendient la plantation des Hérettes.

Arrivée en France en 1792 (24), Julie est recueillie avec ses deux sœurs par une tante pauvre qui loge dans les combles de l'hôtel de Coigny (à Paris, rue des Orties). Pendant quatre ans, elle connaît la misère. Un frère de sa mère, Michel-Louis de Bergey, qui possède une propriété à Saint-Paterne près de Tours, la prend sous sa protection et la place dans un pensionnat où elle bénéficie d'une éducation soignée.

On ne sait quels sont les attraits de Julie qui retiennent l'attention, puis les désirs de Charles. Peut-être la grâce d'une jeune créole que l'on dit jolie ? La rencontre de Charles est pour elle, sans dot, sans relations une chance inespérée. Il y a bien la différence d'âge : elle a vingt ans et son prétendant cinquante huit ans, mais Charles est célèbre ! Le mariage est conclu en juillet 1804, à Saint-Paterne.

Les premières années de vie commune sont heureuses. Dans leur nouveau logis de la Grange-Batelère Julie tient salon (25). On y reçoit Louis de Fontane (1757-1821) grand maître de l'Université, Louis de Bonald (1754-1840) philosophe catholique, Edouard Mounier secrétaire de l'Empereur, Jean-Baptiste Suard (1733-1817) secrétaire perpétuel de l'Académie Française. Charles ayant été nommé bibliothécaire de l'Institut en 1813, le couple s'installe quai Conti, dans un appartement de fonction.

La santé de Julie, qui ne fut jamais florissante, s'altère. Elle est phthisique, comme le furent sa mère et ses deux sœurs, qui toutes trois ont succombé à la tuberculose. Elle crache le sang, est sujette à des troubles nerveux, et passe la plus grande partie de l'hiver au lit. Charles l'appelle : « la pauvre dolente ». Malgré sa santé chancelante, elle suit le Roi Louis XVIII à Gand ; son mari, malade de la « pierre » reste à Paris. En 1815, après l'équipée de Gand, l'état de santé de Julie empire. Son médecin lui conseille de passer quelque temps en Savoie.

Le 17 septembre 1816, elle arrive aux environs d'Aix-les-Bains et s'ins-

talle dans la modeste pension du docteur Perrier (26). Le 6 octobre, un beau jeune homme, âgé de 26 ans, Alphonse de Lamartine, prend place dans la pension. Il vient se reposer et soigner une maladie de foie.

L'idylle entre Julie et Alphonse est évoquée avec discrétion dans le poème : « Le Lac » qui fait partie du recueil des « Méditations poétiques » édité en 1820 :

*« Que le vent qui gémit, le roseau  
qui soupire,  
Que le parfum léger de ton air  
embaumé,  
Que tout ce qu'on entend, l'on voit  
et l'on respire,  
Tout dise : ils ont aimé »*

Un récit plus circonstancié paraît en 1849, dans le roman : « Raphaël, pages de la vingtième année » où Elvire prend les traits de Julie.

Si l'on en croit Lamartine, c'est au cours d'une promenade sur le lac du Bourget que tout a commencé. La barque de Julie a failli chavirer, elle est secourue par Alphonse... et alors son cœur chavire...

Ils furent très intimes en quelques jours, puis décidèrent de ne plus l'être.

Lequel des deux amants a pris cette décision ? Nous pensons qu'elle fut imposée par Alphonse, qui, en langage du temps, « épuise rapidement son carquois ». En effet, Julie lui écrit : « N'avez-vous pas dit, ne suis-je pas sûre que vous avez pour moi une passion filiale ? Cher Alphonse, je tâcherai qu'elle me suffise ». Et Lamartine précise : « Nous avons été amants et nous ne sommes plus que des amis exaltés, un fils et une mère. Nous ne voulons être que cela ». Les « amis » se quittent à Mâcon le 26 octobre 1816. Lamartine retrouve sa famille et madame Charles son mari.

Alphonse vient à Paris et apparaît dans le salon de Julie le 8 janvier 1817. Il est présenté à Charles et aux amis du couple. Il est certain que Charles, qui aime profondément son épouse et la sait condamnée, comprend son dernier rêve de bonheur et ferme les yeux. Julie est très faible, mais au printemps, fait quelques promenades en compagnie d'Alphonse, aux Tuileries, à Meudon, à Saint Cloud. Ils se quittent le 5 mai et espèrent se revoir à

Aix pendant l'été.

Hélas ! L'état de santé de Julie s'aggrave et au début du mois d'août, elle ne se lève plus. « Après deux mois et demi d'angoisse, de douleur et d'agonie profonde » elle s'éteint le 18 décembre devant son mari qui ne quitte pas son chevet et en présence de l'abbé de Keravenant.

La peine de Lamartine est, selon ses dires, violente et, de toute évidence, très démonstrative, mais peu durable. Quelques mois après la mort de Julie, il s'enflamme pour une Italienne, madame de Larche, qui deviendra la « Princesse Florentine ». Nous avons vu que Lamartine a des « ressources » limitées, il écrira (27) en 1819 : « Je n'ai pas une force vitale en harmonie avec un tempérament, même médiocre, et, à plus forte raison, un tempérament d'Italie ».

La peine de Charles est beaucoup plus profonde. Son médecin rapporte : « Cet homme respectable, ne me parle de son épouse que les larmes aux yeux et avec un profond attendrissement », les dernières années de Charles sont tristes et désenchantées. Malade, recueilli chez sa belle-sœur, madame de Talmouses, il ne sort plus que pour participer aux séances de l'Académie des Sciences. Il y est encore présent le 17 mars 1823, séance au cours de laquelle ses collègues lui présentent leurs vœux de rétablissement.

Les douleurs devenant intolérables, il est opéré de la « taille », le 4 avril, par le docteur Roux, lui aussi membre de l'Institut. Il meurt des suites de l'intervention chirurgicale le 7 avril 1823, assisté et administré par l'abbé de Keravenant.



On peut voir la tombe de Charles au Père Lachaise, dans la onzième division. Il est entouré de l'horloger Breguet (1747-1823), membre de l'Académie des Sciences, et du chanteur Garat (1764-1823), professeur au Conservatoire de Musique.

Sur la stèle du modeste monument, on lit l'épithaphe de l'académicien Le Mercier :

*O CHARLES  
La science aérostatique  
Que tu as créée,  
Transporta ton corps au dessus des  
nues,  
Et la sagesse conseillère de Socrate  
Eleva ton âme  
Au dessus des passions.  
Tu avais essayé  
Ton vol vers les cieux  
Avant de nous quitter pour jamais*

### Un homme généreux

Après avoir suivi Charles tout au long d'une vie laborieuse, mais aussi comblée d'honneurs, nous pouvons mieux discerner les traits de sa personnalité.

Charles était un chercheur. Si la plupart de ses travaux scientifiques, à l'exception de ses études sur la dilatation des gaz, sont des mises au point, des perfectionnements, son chef-d'œuvre est d'ordre technologique. C'est de toute évidence, la préparation et la réalisation de ses vols du premier décembre 1783. Il a alors inventé, en un mois, les principes, le matériel et les manœuvres de l'aérostation tels que nous les connaissons aujourd'hui.

Il aimait, avant tout, enseigner. Bon pédagogue, il possédait, avons-nous dit, une élocution facile et brillante. Etant aussi un expérimentateur talentueux, il illustrait ses cours de manipulations remarquables.

Fourier, dans son éloge funèbre (28) précise : « Sous sa main tout devenait spectacle et pour ainsi dire un événement qu'aucun des témoins ne pouvait oublier ».

Enfin ? fait relativement nouveau, la place importante réservée aux expériences, nous dirions aujourd'hui aux travaux pratiques, dans l'enseignement des sciences. Ces qualités expliquent le succès de ses cours pendant plus de trente ans.

Sur le plan affectif, Charles était un être sensible, qui recherchait avant

tout la tranquillité et qui ne fut jamais obnubilé par sa célébrité. On trouve, à ce sujet, deux phrases révélatrices dans son second mémoire sur l'aérostatique : « *Ce que je sais le mieux dans ce monde, c'est le prix de la paix, et j'ai appris à mes dépens qu'il n'y a guère de bonheur pur et durable que dans le silence et l'obscurité* » (29).

« *J'ai pesé tranquillement la gloire, je connais tout ce qu'elle vaut, et je sais ce que les hommes la font payer à ceux à qui ils la dispensent* ».

C'était un homme profondément bon. Il a donné toute la mesure de sa magnanimité lorsqu'il comprit les sentiments qui unissaient Julie et Alphonse. Marié à une femme beaucoup plus jeune que lui, de trente huit ans sa cadette, peut-être se reprochait-il de ne pas avoir su fixer durablement ses sentiments. Il a écrit avec beaucoup de discernement : « Elle n'avait rien de ce qu'il fallait pour affronter les voyages, et elle allait par monts et par vaux, courant après le bonheur qu'elle n'a jamais pu rencontrer ».

Le docteur Alin, qui soigna Julie dans ses derniers jours, rapporte une conversation qu'il eut avec le vieux savant, et qui éclaire toute l'humanité de ce dernier. C'est un joli conte (30).

« *Il est un souvenir* » - lui dit Charles- « *qui me hante quand je pense au destin de Julie. Jadis, un matin de printemps, où je travaillais dans mon logis du Louvre, je vis une mésange bleue qui venait se poser sur le bord de ma fenêtre. Elle avait dû recevoir quelque blessure, car des plumes étaient tachées de sang.*

*Il me semblait qu'elle attendait de moi quelque secours. Je la pensai, je la nourris, je lui donnai une belle cage. Elle acceptait de prendre de ma main le mil dont elle se nourrissait. J'avais plaisir à voir ce gracieux petit ailé animer ma solitude de sa vie légère et de son chant.\**

*J'étais heureux, elle semblait heureuse.*

*Puis un jour, elle cessa de chanter, de voler dans le logis que je lui avais offert. J'ouvris la cage, la fenêtre. Elle s'envola...*

*Elle revint quelques jours après, s'étant grisée librement de soleil. Mais elle était revenue pour mourir. Deux jours plus tard, je trouvai dans*

*la cage ouverte un frêle cadavre, une menue boule grise et bleue ».*

« *Vous n'auriez pas dû ouvrir la cage* » - lui dit le docteur - Charles répondit :

« *Ma mésange serait morte d'ennui. Si elle a trouvé la mort, c'est du moins après avoir retrouvé la vie* ». Peut-on faire preuve d'une plus grande générosité ?

## BIBLIOGRAPHIE

1 - J.a.c. CHARLES Cours de physique. Préface du premier cours. 22 janvier 1781. Manuscrit. Bibliothèque de l'Institut de France. Paris

2 - Jean-Baptiste FOURIER Eloge historique de monsieur Charles. Recueil de l'Institut Tome 7. N° 39. 1828. Bibliothèque de l'Institut de France. Paris

Charles HIRSCHAUER Quelques traits peu connus du physicien Charles. Trésor des bibliothèques. Tome II, 59. Paris 1929

3 - Pierre ROUSSEAU Histoire des SCIENCES. Au temps des philosophes, 323. Arthème Fayard. Paris. 1947.

4 - Marc FUMAROLI Quand l'Europe parlait français. Benjamin Franklin, 371.-386. Edition de Fallois. Paris. 2001

5 - Jacques de LA VAULX Histoire des Montgolfières de 1783 à nos jours, 7-9. Imprimerie de la Manutention. Mayenne. 1988

6 - Georges CHAMPETIER Histoire des macromolécules, 36-37. ESPCI. Paris. 1983

7 - Audouin DOLFFUS Le temps des ballons. Art et histoire. Premiers envols, 32-37. Editions de la Martinière. Paris Musée de l'air et de l'espace. Le Bourget. 1995.

8- Jacques de LA VAULX Histoire des Montgolfières de 1783 à nos jours, 8-12. Imprimerie de la Manutention. Mayenne. 1988

9 - André CASTELOT Ce sont les Français qui les premiers ont quitté la terre. Historia n°164, 17-27. Tallandier. Paris 1960

10- Jacques de LA VAULX Histoire des Montgolfières de 1783 à nos jours, 12-18. Imprimerie de la Manutention. Mayenne. 1988

11- André CASTELOT Ce sont les Français qui les premiers ont quitté la terre. Historia n°164, 25. Tallandier. Paris 1960

12- J.a.c. CHARLES Cours de physique. 35ème leçon. Histoire et théorie du globe aérostatique. 1783. Second mémoire sur l'aérostatique. 1784. Manuscrit. Bibliothèque de l'Institut de France. Paris

13- Robert CHAMPEIX Savants méconnus. Inventions oubliées. Le mari d'Elvire, 29-30. Dunod. Paris. 1966

14- Marie THEBAUD L'hydrogène évince les amateurs. 1783, premiers vols, 26-34. Les cahiers de Science et Vie n°63. Excelsior-Publications. Paris. 2001

15- Alain DEGARDIN et Francis VILLADIER Le temps des ballons. Art et histoire. Des ballons pour la République : 1794-1799, 74-84. Editions de la Martinière. Paris. Musée de l'air et de l'espace. Le Bourget. 1995.

16- Alain FREREJEAN Terre d'inventeurs. Nicolas Conté, 92-119. Tallandier. Paris. 2000

17- Maurice DAUMAS Histoire générale des techniques. Tome 3 : L'expansion du machinisme (1725-1860). Chapitre V : Premières étapes de l'aérostation, 417-418. Quadrige. Presses Universitaires de France. Paris.1996.

18- Claudine FONTANON Les origines du Conservatoire National des Arts et Métiers et son fonctionnement à l'époque révolutionnaire (1750-1815). Les Cahiers d'Histoire du CNAM. N°1, 35. CNAM-Média. Paris. 1992

Dominique DE PLACE L'incitation au progrès technique et industriel en France de 1783 à 1819, d'après les archives du Conservatoire National des Arts et Métiers. Mémoire de l'Ecole des Hautes Etudes en Sciences Sociales. Conservatoire National des Arts et Métiers. Paris. 1981

19- J-François MONDOT Gay-Lussac, un homme en quête de lois, 140-147. Sciences et Vie n°1013. Excelsior-Publications. Paris. 2002

20- J.a.c. CHARLES Cours de Physique. 60 leçons et recueil d'expériences. Manuscrit Bibliothèque de l'Institut de France. Paris.

21- Georges LENOTRE Paris et ses fantômes. Le premier voyage en ballon, 104-111. Grasset. Paris. 1933

22- J. VAUQUER Chanson pour Charles. Archives 7°, 38. Musée des Arts et Techniques Paris.

23- Louis GAY-LUSSAC Annales de Chimie. Vol. 43. Paris 1802.

24- Maurice RAT Monsieur Charles, le mari d'Elvire, sut mieux aimer que Lamartine. Le Figaro Littéraire. 30 mai 1953. Paris. 1953.

25-Anatole FRANCE L'Elvire de Lamartine. H. Champion. Paris. 1893.

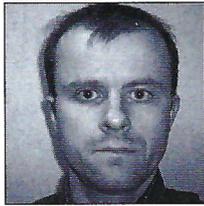
26-Marquis de LUPPE Le roman d'amour d'Elvire et de Lamartine. Historia n° 57, 130-136. Tallandier. Paris. 1951

27- Louis HASTIER La « Princesse florentine » de Lamartine. Historia n° 153, 205-211. Tallandier. Paris. 1959

28- Jean-Baptiste FOURIER Eloge historique de monsieur Charles. Recueil de l'Institut. Tome 7 n°39. 1828. Bibliothèque de l'Institut de France. Paris.

29- J.a.c. CHARLES Cours de physique. Second mémoire sur l'aérostatique. 1784. Manuscrit Bibliothèque de l'Institut de France. Paris.

30- Maurice RAT Monsieur Charles, le mari d'Elvire, sut mieux aimer que Lamartine. Le Figaro Littéraire. 30 mai 1953. Paris. 1953. Robert CHAMPEIX Savants méconnus. Inventions oubliées. Le mari d'Elvire, 46. Dunod. Paris. 1966



# Introduction aux puces à ADN

Par Vincent BARRA

Enseignant-chercheur au LIMOS-UMR-CNRS 6158

Le concept de puce à ADN repose sur une technologie multidisciplinaire intégrant la biologie, la nanotechnologie, la chimie des acides nucléiques, l'analyse d'images et la bioinformatique. Grâce à cet outil, il est possible de mesurer le niveau d'expression de plusieurs milliers de gènes simultanément, et les applications (e.g. détermination des familles de gènes co-régulés, recherche de systèmes de régulation, ...) sont en plein essor dans un grand nombre de domaines comme la pharmacologie, la médecine ou l'environnement.

L'analyse biologique des premières biopuces repose sur l'étude du transcriptome (étude des ARN messagers) d'une cellule ou d'un organisme. Si de nouvelles applications pour les puces à ADN ont également été développées (biopuces pour le diagnostic, pour la génomique comparative, pour l'identification de régions d'ADN régulatrices après Immunoprécipitation de la Chromatine (ChIPchips)), seules les biopuces transcriptome sont effectivement abordées dans ce chapitre.

## 1- DE LA CELLULE AU TRANSCRIPTOME

### De la cellule à l'ADN

La cellule est l'unité de base biologique. Chez les organismes les plus simples que sont les procaryotes (unicellulaires), le matériel génétique n'est pas compartimenté dans un noyau vrai mais est libre dans le cytoplasme. Pour les organismes plus complexes, les Eucaryotes (uni- ou pluricellulaires), l'information génétique est compartimentée dans un noyau (présence d'une membrane nucléaire). L'ADN, présent dans ce noyau, est une molécule qui peut être

gigantesque avec un enchaînement linéaire de millions de nucléotides (l'adénine (A), la cytosine (C), la guanine (G) et la thymine (T)). L'appariement des paires de nucléotides de type Watson et Crick (A et T d'une part, C et G d'autre part) concourt à l'organisation de l'ADN en double hélice, dont chaque brin a alors une séquence parfaitement complémentaire à l'autre (Figure A-1). Cette complémentarité est à la base de la plupart des techniques d'analyse en biologie moléculaire. Pour une espèce donnée, la séquence de la molécule d'ADN, i.e. l'enchaînement des nucléotides, est globalement semblable, sauf cas de polymorphismes.

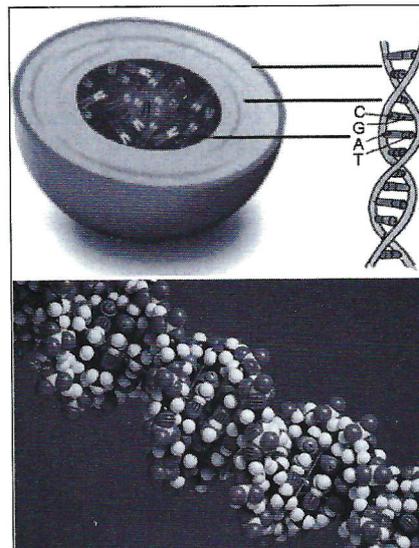


Figure A-1 : organisation de la molécule d'ADN

### De l'ADN au génome

L'unité de base du stockage de l'information génétique est le gène, petite séquence d'ADN utilisée par la cellule pour synthétiser les protéines de structure, des enzymes nécessaires à son fonctionnement (respiration, division cellulaire,

croissance, échanges, métabolismes...) ou des ARN (ARNt, ARNr et divers petits ARN). Les gènes sont de taille variable (de quelques centaines à plusieurs milliers de nucléotides), et sont disséminés le long du double brin d'ADN de chacune des cellules, souvent morcelés chez les organismes Eucaryotes en de nombreux fragments codants (exons), séparés par des séquences non codantes (introns). L'inventaire génique est alors défini comme l'ensemble de ces gènes, dont le nombre peut varier suivant l'individu, de 6200 chez la levure à une trentaine de milliers chez la souris ou l'homme. Le génome est donc de façon très simplifiée, l'ensemble de la séquence des chromosomes comprenant les gènes, des séquences répétées et des séquences fonctionnelles telles que les télomères (extrémités des chromosomes eucaryotes) ou les origines de réplifications des chromosomes par exemple. ...

### Du génome au transcriptome

En fonction de leurs besoins, les cellules utilisent à un instant donné une partie des gènes pour réaliser la synthèse des protéines nécessaires aux grandes fonctions cellulaires. Le passage du gène (contenu dans le noyau) à la protéine (synthétisée dans le cytoplasme) s'effectue en deux grandes étapes de transcription et de traduction, à l'aide d'un intermédiaire essentiel : l'ARN messager. La transcription correspond à la synthèse d'un brin d'ARN à partir de la double hélice d'ADN. L'ARN est synthétisé à partir du brin matrice (non codant) et a donc la même séquence que le brin non matrice (codant), la seule différence résidant

dans le remplacement de la base T par la base U (uracile). Chez les Eucaryotes, l'ARN obtenu dans le noyau est appelé ARN pré-messager ou précurseur car il subira des maturations avant son transfert vers le cytoplasme (passage de la membrane nucléaire) où il sera traduit en protéines par les ribosomes. La traduction interprète chaque triplet de nucléotides (codon) de l'ARN messenger en un acide aminé selon le code génétique universel : un codon donné correspond à un acide aminé donné, et plusieurs codons peuvent coder pour le même acide aminé (dégénérescence du code génétique). Ainsi, lors de la traduction, les ribosomes décodent l'information génétique pour permettre la synthèse de la protéine correspondante (Figure A-2). Au niveau des ribosomes, il existe une reconnaissance codon anti-codon entre la séquence de l'ARNm (codon) et la séquence anti-codon de l'ARNt (ARN de transfert) qui apporte l'acide aminé correspondant. Les ribosomes se déplacent sur l'ARNm pour permettre la synthèse complète de la protéine. La rencontre d'un codon non sens (aucun ARNt correspondant donc pas d'acide aminé) constitue le signal de fin de la traduction.

Signalons simplement que chez les Procaryotes, les gènes sont organisés en opérons (un ARNm porte plusieurs gènes), qu'il n'existe pas les mécanismes de maturation (absence d'introns) et enfin que la transcription et la traduction sont couplées du fait de l'absence de membrane nucléaire.

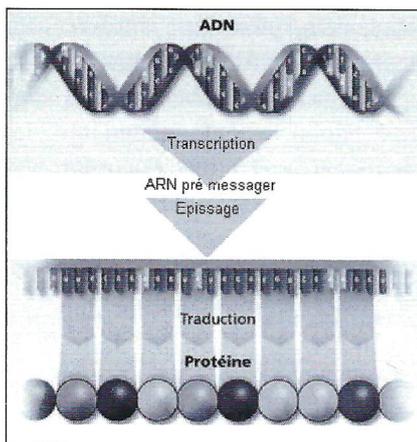


Figure A-2 : du gène à la protéine

Sachant qu'à partir d'un même gène, plusieurs copies d'ARN messagers peuvent être produits à des niveaux différents en fonction de l'activité de la cellule, le transcriptome reflétera donc le niveau d'expression de tous les gènes à un temps t pour une condition physiologique donnée. Il est le reflet instantané de l'activité cellulaire, et peut donc varier d'un type cellulaire à l'autre (neurone, cellule de la peau...), au cours du temps ou des différentes phases du cycle cellulaire, en fonction de conditions environnementales imposées aux cellules, ou en fonction de l'état sain ou pathologique de ces dernières. Si Jansen et al. [JANSEN01] ont montré que l'analyse du transcriptome donnait une assez bonne vision du jeu de protéines présent dans la cellule, il est cependant important de noter qu'il n'existe pas nécessairement de corrélation directe entre le niveau d'expression d'un gène (quantité d'ARNm) et la quantité de protéines produite. D'une manière plus générale, pouvoir comparer le transcriptome de différents types cellulaires, dans différentes conditions, ou pouvoir analyser l'ensemble du transcriptome d'une cellule à divers stades de son cycle cellulaire ou dans des conditions pathologiques, doit permettre d'une part de mieux comprendre le fonctionnement cellulaire sur le plan fondamental, et offre d'autre part beaucoup d'intérêts en termes d'applications potentielles.

L'analyse de l'abondance de chaque ARNm d'une cellule, d'un type tissulaire ou d'un organisme est depuis quelques années possible à grande échelle grâce à des techniques d'hybridation. Cette mesure repose sur la propriété d'hybridation de l'ADN simple brin à son brin complémentaire de façon très stringente dans des conditions très contrôlées, et ce même si ce brin complémentaire n'est présent qu'en petites quantités au milieu d'autres fragments d'ADN. Depuis sa première apparition en 1975 (Southern Blot [SOUTHERN75]), la technique d'hybridation ADN-ADN généralement utilisée pour la cartographie des gènes a été adaptée à l'étude des

ARN (Northern Blot). Dans la technique du Northern Blot, ce sont les ARN extraits qui après séparation sur un gel d'agarose dénaturant sont transférés sur une membrane (nitrocellulose ou nylon). Par la suite, une sonde marquée spécifique du gène étudié permettra par hybridation complémentaire (ADN-ARN ou ARN-ARN) de caractériser le messenger correspondant (taille, niveau d'expression). Ainsi, dans cette technique les cibles se trouvent sur le support solide et les sondes sont généralement marquées par de la radioactivité pour permettre la révélation de l'hybridation. Ces dernières années, cette technologie qui ne permettait l'étude de l'expression que d'un gène à la fois a évolué vers le développement d'un outil de post-génomique très puissant permettant de suivre de façon simultanée l'expression de tous les gènes d'une cellule ou d'un organisme donné. Il s'agit de la technologie très innovante des puces à ADN.

## 2- LES PUCES À ADN

### Principe

Les puces à ADN [LANDER99] reposent sur le principe de complémentarité des brins de la double hélice d'ADN. Ce sont des supports de verre ou de silicium, de petite taille (de l'ordre de 25x75 mm) sur lesquels sont synthétisés directement ou greffés après synthèse (plus économique) des milliers de séquences d'ADN appelées sondes, caractéristiques d'autant de gènes. Les puces sont ensuite mises en contact avec l'ensemble des transcrits issus d'une cellule, les cibles, marqués par une molécule fluorescente (fluorochrome). Le mécanisme d'hybridation implique que les cibles marquées reconnaissent, parmi les sondes de la puce, celles qui leur sont complémentaires, et s'y appariant. Après cette étape, les hybrides sondes/cibles sont imagés via un scanner, repérés et quantifiés grâce à leur fluorescence. En déposant un nombre important de sondes, on peut ainsi analyser un grand nombre de gènes simultanément. On peut même, en utilisant deux fluorochromes tels



dépôt des cibles marquées sur la puce déclenche l'appariement des séquences sondes/cibles complémentaires. Cette hybridation, qui dure quelques heures en milieu liquide, est suivie d'un lavage du substrat qui permet d'éliminer les cibles non fixées, ou fixées non spécifiquement. Après séchage la puce est passée au scanner pour repérer les hybridations.

### La chaîne d'acquisition de l'image de la puce

La puce est alors révélée par un lecteur (scanner) muni de lasers qui permettent d'exciter les molécules de fluorochromes et de détecter par un microscope confocal le signal émis dans chaque spot. Dans le cas du marquage avec deux fluorochromes (vert Cy3 et rouge Cy5), une image numérique est acquise pour l'échantillon marqué avec le Cy3 et une en Cy5. Un spot de couleur verte indique un gène dont le niveau d'expression est plus élevé dans l'échantillon marqué avec le Cy3 que celui marqué avec le Cy5, et inversement pour un spot de couleur rouge. Le spot apparaît jaune lorsque le gène est exprimé de manière identique dans les deux échantillons comparés. L'analyse des données numériques issues de l'acquisition est effectuée par un logiciel qui prétraite, segmente et quantifie les différents niveaux d'activité dans les spots.

## 3- L'ANALYSE DES IMAGES DE PUCES

L'analyse d'image est un aspect central des expériences menées à l'aide des puces à ADN. Dans le cas d'un double marquage, le but de cette phase est de quantifier, de manière relative, le niveau d'expression des

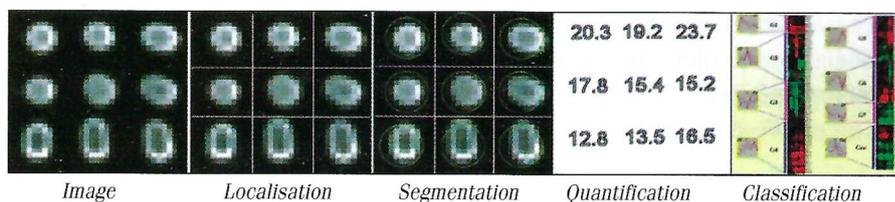


Figure A-4 : schéma récapitulatif des étapes de traitement des images de puces à ADN

gènes. Cette mesure, basée sur un rapport d'intensité entre les deux niveaux des fluorochromes détectés, est fonction de nombreux paramètres dépendant des méthodes utilisées, des mesures expérimentales et des conditions biologiques. Globalement, cette étape d'analyse a un impact considérable sur l'interprétation biologique des données, et repose sur quatre phases (Figure A-4).

### La localisation des spots

Il s'agit ici de déterminer les coordonnées de chaque spot de la puce. Cette étape est normalement effectuée à l'aide d'une grille théorique définie lors du plan de dépôt des sondes. Pour localiser un spot sur une image, c'est-à-dire faire correspondre un modèle idéal de puce avec une image acquise, un nombre important de paramètres doit être estimé (espaces entre les spots, espaces entre blocs d'une puce...). De même, les mouvements de translation des spots ou des blocs de spots, liés à la variation de position des aiguilles du spotter, sont à évaluer. Le repérage des spots doit être simple et rapide à réaliser. L'automatisation de cette tâche permet une accélération considérable de l'analyse. Enfin, la définition des grilles doit être aussi juste que possible. En effet, de la précision de cette étape dépend l'efficacité des mesures ultérieures.

### La segmentation des spots

Il s'agit ici de classer les pixels de l'image en deux classes, "fond" et "signal". Ceci sous-tend une analyse du signal au niveau de chaque spot et un découpage de l'image en différentes régions, chacune ayant des propriétés propres. En raison des propriétés biologiques des dépôts et de la physique de la chaîne d'acquisition, le bruit acquis est fortement non uniforme dans l'image et varie en fonction d'un certain nombre de paramètres. De plus, à ce stade de l'analyse, la taille variable, la forme complexe et les irrégularités des spots compliquent la tâche de segmentation, mais doivent cependant être déterminés de manière semi-automatique voire automatique.

### L'extraction d'indices

Maintenant que les pixels "signal" sont identifiés, il s'agit d'extraire un ou plusieurs indices pertinents permettant de quantifier le niveau d'expression de chaque gène. Ce niveau correspond à une mesure relative des intensités de fluorescence en rouge et vert. Un filtrage des données permet de sélectionner des variations significatives (tri des spots sur un barème de critères), à partir desquelles un rapport de fluorescences est calculé. La valeur de ce ratio indique l'induction ou la répression du gène.

Dans le cas de la comparaison de données issues de plusieurs expériences (données temporelles, sain/pathologique...), il faut de plus

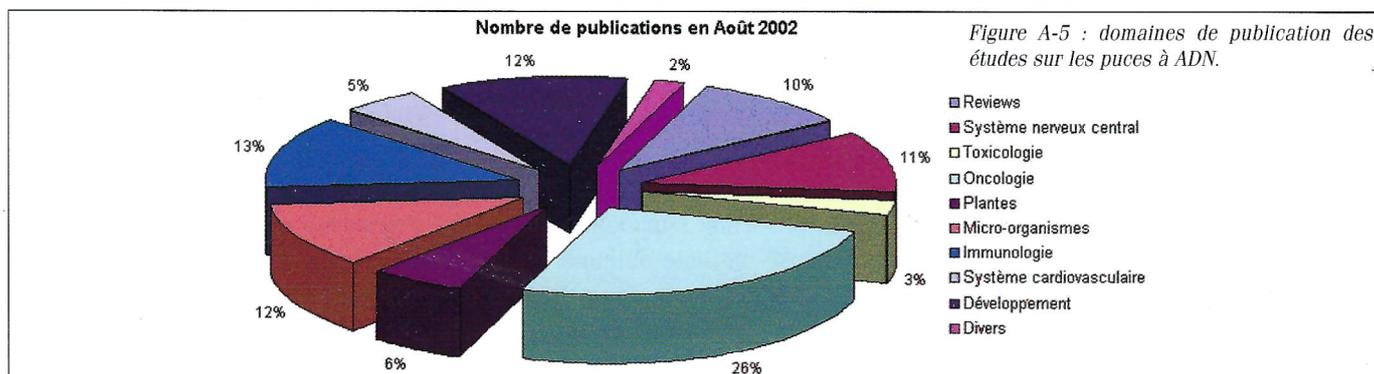


Figure A-5 : domaines de publication des études sur les puces à ADN.

nécessairement normaliser les données avant quantification pour éliminer les artefacts dus par exemple au protocole expérimental.

### La classification des données

Enfin, les données préparées par les étapes précédentes permettent de regrouper les gènes par familles ayant des comportements semblables, en analysant leurs niveaux d'expression. Cette étape de classification permet de répondre à des problématiques biologiques importantes allant de la recherche de gènes corégulés au cours du développement ou en réponse à des perturbations environnementales, à l'identification des liens entre des variations d'expression et d'autres données biologiques en passant par la recherche automatique de systèmes de régulation.

### 4- LES APPLICATIONS

L'utilisation des outils d'analyse des puces à ADN est aujourd'hui de plus en plus intensive (environ 12500 articles parus en 2002 sur l'étude du transcriptome [Scheel02]), et ceci dans de nombreux domaines (Figure A-5).

#### Etude de la dynamique du transcriptome

Bien sûr, un des premiers rôles des puces à ADN a été d'étudier l'expression de milliers de gènes en parallèle, souvent selon plusieurs conditions. De très nombreuses études ont été réalisées sur divers organismes (e.g. la levure *Saccharomyces cerevisiae* [SPELLMAN98], *Streptomyces coelicolor* [Huang01] dont dérivent 60% des antibiotiques actuellement utilisés), en fonction de diverses conditions expérimentales (cycle cellulaire, influence du milieu extérieur,...), pour mettre en évidence des gènes co-régulés, des liens entre des variations d'expression et d'autres données biologiques ou des systèmes de régulation.

Nous collaborons actuellement avec une équipe de biologistes de l'Université Blaise Pascal de Clermont-Ferrand (laboratoire de

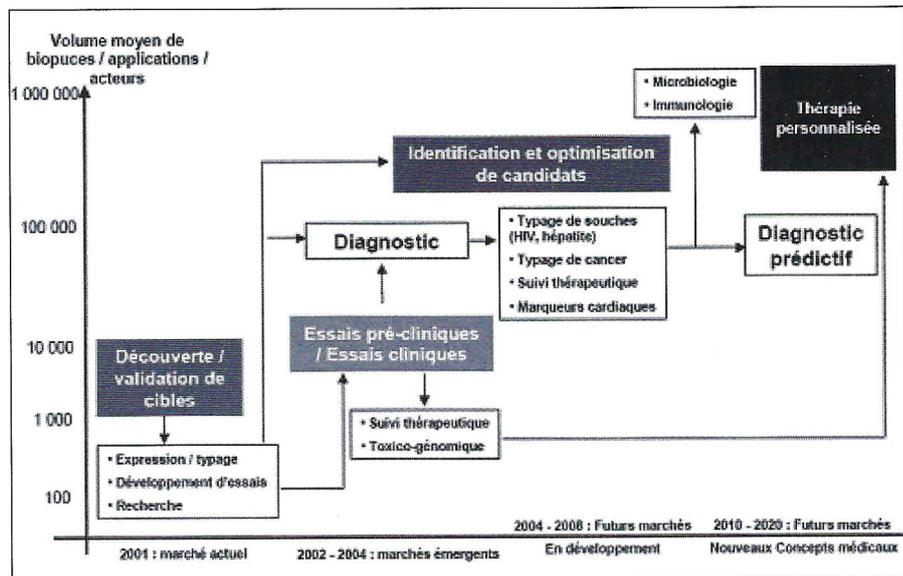


Figure A-6 : évolution des puces à ADN dans les applications pharmaceutiques.

biologie des protistes, équipe Génomique Intégrée des Interactions Microbiennes, Pierre Peyret, UMR 6023 CNRS) sur une telle étude, concernant le pathogène *Encephalitozoon cuniculi* [KATINKA01].

#### Recherche et action de médicaments

Les puces ADN sont un outil de choix dans la recherche et la caractérisation de nouvelles molécules à visée thérapeutique [DEBOUK99]. En effet, la plupart des médicaments agissent en inhibant leur molécule cible, et une mutation du gène correspondant devrait donc avoir un effet similaire sur le transcriptome de la cellule. La société Affymetrix propose ainsi depuis fin 1997 une puce de 800 oligonucléotides permettant la détection des 18 mutations et des 10 polymorphismes répertoriés dans deux gènes associés à un système enzymatique (cytochrome P450) qui joue un rôle essentiel dans la cinétique de dégradation par le foie de nombreux médicaments. De même, Marton *et al.* [MARTON98] ont utilisé une puce à ADN contenant l'ensemble des gènes de la levure afin de démontrer l'existence d'une corrélation significative entre le profil obtenu lors d'une stimulation médicamenteuse antimicrobienne et le profil d'expression d'une levure portant un gène muté et impliqué dans le métabolisme d'action de ce

médicament. Ce principe peut être exploité pour la création d'une base de données contenant un grand nombre de profils d'expression, provenant à la fois de cellules stimulées par des médicaments et de souches contenant différentes mutations. Ces données offrent un moyen de décoder les profils complexes d'expression de groupes de gènes modulés par différentes classes de médicaments.

Dans ce domaine, les perspectives à moyen terme vont du diagnostic prédictif à la thérapie personnalisée, comme précisé dans un rapport récent [PROVENCE02] de la Direction générale de l'Industrie, des Technologies de l'information et des Postes sur la société de l'information (Figure A-6)

#### Recherche de mutations et de remaniements chromosomiques

Pour chaque maladie héréditaire, la palette des mutations possibles est en général très étendue, ce qui rend la recherche de la mutation responsable lors du diagnostic très complexe. De nombreuses techniques de criblage ou de caractérisation de mutations connues ont été développées, mais restent aujourd'hui peu performantes. Les techniques de criblage permettent de rechercher une variation de séquence, caractérisée ensuite par séquençage. Une recherche directe de la mutation est aussi possible par séquençage, mais son

coût est encore très élevé. La recherche des mutations est donc par excellence un champ d'activité où les puces apportent une révolution [CRONIN96]. De même, certains auteurs proposent de dédier des puces à ADN à l'étude de remaniements chromosomiques (e.g. aneuploïdie), par exemple pour classer différents types de rhabdomyosarcomes (plus fréquente des tumeurs des tissus mous en pédiatrie, qui représente 10% des tumeurs solides chez l'enfant) [LU01].

### Oncologie

L'exemple précédent illustre un des principaux intérêts des puces à ADN pour la classification des tumeurs, le diagnostic et le pronostic en cancérologie. Des travaux ont plus

généralement mis à jour une signature d'expression fortement associée au risque d'évolution métastatique dans le cancer du sein [Van't VEER02], en étudiant le profil d'expression de tumeurs primaires de ce cancer. Cette même pathologie a de même été étudiée par Mei *et al.* [MEI00], qui proposent de détecter à l'aide des puces à ADN haute densité des allèles dangereux du gène de susceptibilité au cancer du sein BRCA1.

### Environnement et agriculture

Dans une chaîne de production agroalimentaire, les puces à ADN sont des outils particulièrement efficaces pour reconnaître l'origine des espèces animales qui composent les produits alimentaires, mais égale-

ment pour détecter et contrôler dans des semences des séquences provenant d'organismes génétiquement modifiés [KUIPER01]. Les applications dans l'environnement concernent quant à elles l'analyse microbiologique de l'eau de consommation, et plus généralement le contrôle qualité en milieu industriel, pour renforcer la sécurité des procédés et des produits. Ainsi, la Lyonnaise des Eaux et bioMérieux ont par exemple décidé d'unir leurs compétences pour mettre au point, dans le cadre du projet Aquagen, une technique d'analyse de l'eau potable par puces à ADN, qui apporte aux consommateurs une garantie renforcée en matière de contrôle de la qualité de l'eau.



## BIBLIOGRAPHIE

- [CRONIN96]  
CRONIN M., MIYADA C., FUCINI R., KIM S., MASINO R., WESPI R., Detecting cystic-fibrosis mutations by hybridization to DNA-probe, *Biologicals*, **24**:209, 1996.
- [DEBOUK99]  
DEBOUK C., GOODFELLOW P., DNA microarrays in drug discovery and development, *Nature Genetics*, **1**: 48-50, 1999.
- [HUANG01]  
HUANG J., LIH C., PAN K., COHEN S., Global analysis of growth phase responsive gene expression and regulation of antibiotic biosynthetic pathways in *Streptomyces coelicolor* using DNA microarrays, *Genes Development*, **15**:3183-3192, 2001.
- [JANSEN01]  
JANSEN R., GREENBAUM D., GERSTEIN M., Relating whole-genome expression data with protein-protein interactions, *Genome Research*, **12**:37-46, 2002.
- [KATINKA01]  
KATINKA M., DUPRAT S., CORNILLOT E., MÉTÉNIER G., THOMARAT F., PRENSIER G., BARBE V., PEYRETAILLADE E., BROTTIER P., WINCKER P., DELBAC F., EL ALAOU H., PEYRET P., SAURIN W., GOUY M., WEISSENBACH J., VIVARÈS C., Genome sequence and gene compaction of the eukaryote parasite *Encephalitozoon cuniculi*, *Nature*, **414**:450-453, 2001.
- [KUIPER01]  
KUIPER H., KLETER G., NOTEBORN H., KOK E., Assessment of the food safety issues related to genetically modified foods, *Plant Journal*, **27**:503-528, 2001.
- [LANDER99]  
LANDER E., Array of hope, *Nature Genetics*, **21**:3-4, 1999.
- [LU01]  
LU Y., WILLIAMSON D., CLARK J., WANG R., TIFFIN N., SKELTON L., GORDON T., WILLIAMS R., ALLAN B., JACKMAN A., COOPER C., PRITCHARD-JONES K., SHIPLEY J., Comparative expressed sequence hybridization to chromosomes for tumor classification and identification of genomic regions of differential gene expression, *Proceedings of National Academy of Sciences*, **98**:9197-9202, 2001.
- [MARTON98]  
MARTON M., DERISI J., BENNETT H., IYER V., MEYER M., ROBERTS C., STOUGHTON R., BURCHARD J., SLADE D., DAI H., BASSETT D. JR., HARTWELL L., BROWN P., FRIEND S., Drug target validation and identification of secondary drug target effects using DNA microarrays, *Nature Medicine*, **4**:1293-301, 1998.
- [MEI00]  
MEI R., GALIPEAU P., PRASS C., BERNO A., GHANDOUR G., PATIL N., WOLFF R., CHEE M., REID B., LOCKHART D., Genome-wide detection of allelic imbalance using human SNPs and high density DNA arrays, *Genome Research*, **10**:1126-1137, 2000.
- [PROVENCE02]  
PROVENCE M., Etude biocapteurs et biopuces, Rapport de la Direction générale de l'Industrie, des Technologies de l'information et des Postes sur la société de l'information, 2002.
- [SCHEEL02]  
SCHEEL J., VON BREVERN MC, HORLEIN A, FISCHER A, SCHNEIDER A, BACH, A. Yellow pages to the transcriptome, *Pharmacogenomics*, **3**:791-807, 2002.
- [SOUTHERN75]  
SOUTHERN E., Detection of specific sequences among DNA fragments separated by gel electrophoresis, *Journal of Molecular Biology*, **98**:503-517, 1975.
- [SPELLMAN98]  
SPELLMAN P., SHERLOCK G., ZHANG M., IYER V., EISEN M., BROWN P., BOTSTEIN D., FUTCHER B., Comprehensive identification of Cell-Cycle-regulated genes of the Yeast *Saccharomyces cerevisiae* by microarray hybridization, *Molecular Biology of the Cell*, **9**:3273-3297, 1998.
- [VAN'T VEER02]  
VAN'T VEER, L., Gene expression profiling predicts clinical outcome of breast cancer, *Nature*, **415**: 530-536, 2002.



**Par Michel Naranjo**

Responsable de l'Université Européenne d'Été :  
« Le tramway et la ville »

## Le tramway sur pneus à Clermont-Ferrand : une première mondiale

### 1890 : Le premier tramway électrique à Clermont-Ferrand

A cette époque, le tramway desservait en effet les abattoirs, les usines Michelin, l'usine à gaz et de grosses entreprises comme Bergougnan et Ollier. Il s'agissait de déplacer de nombreux salariés mais aussi des militaires. Le transport participait à l'oxygénation des Clermontois, mais aussi à leurs loisirs et des guinguettes, très fréquentées jusqu'en 1956, date de fermeture des lignes, s'étaient installées presque à chaque terminus.

### 2006 : Le Translohr

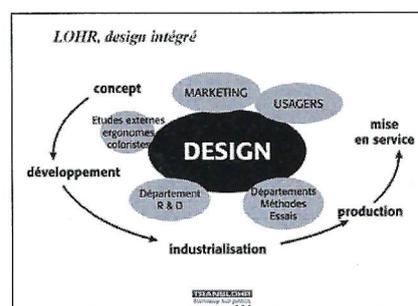
Dans les années 1990, un projet de tramway renaquit, pour faire face au problème de transports urbains et de circulation, bien sûr, mais aussi pour remodeler complètement l'urbanisme de la communauté urbaine. Il s'agissait de relier les lieux de vie, de travail et de loisirs, mais aussi les quartiers entre eux afin de « recoudre la ville ». Un premier projet, concernant un tramway sur rail, fut grandement retardé pour laisser la place à un autre projet de tramway sur pneus dans la ville où Michelin constitue notre meilleur fleuron industriel. Donc c'est le « Translohr » de la société Lohr qui a été choisi. Cette société commercialise depuis plus de quarante ans des camions porte-voitures, véhicules logistique

défense, wagons porteurs de poids lourds pour ferroutage et transport public. Le prototype de tramway est présenté en 1999 et Clermont le choisit en 2001 pour une mise en service en 2006.

### Le design

Ce mode de transport se positionne comme un complément d'autres équipements possibles, abordables pour des villes à partir de 50 000 habitants. Au-delà de l'esthétique et du fonctionnel, le design relève de l'émotionnel, du confort, de la culture et aussi de l'identité du produit axé sur les « 3V » : ville, voyageur, véhicule.

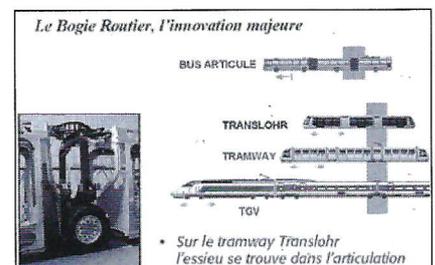
Le principe d'un petit gabarit a été adopté : 2,89 m de hauteur, 2,20 m de largeur soit une largeur inférieure de 10 cm à celle d'un bus, et un accès à 23 cm de hauteur. L'architecture locale a été prise en compte pour définir les lignes du véhicule et son insertion dans la ville.



### La carrosserie

Le carrossage intégral, des pneus, de la rétrovision, de l'articulation... fait oublier la technique sans s'y opposer. La transparence importante favorise le lien entre passants et passagers, avec beaucoup de reflets qui procurent un effet de trottoir roulant assez naturel dans la ville.

Le placement de l'essieu entre les caisses permet une grande modularité.



L'installation de tous les coffres techniques en toiture favorise la transparence et l'accès bas.

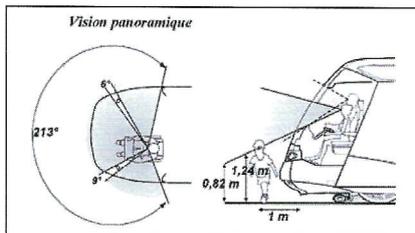


## Côté voyageurs

On est en présence d'un plancher bas pour une accessibilité très facile y compris pour les vélos, des formes intérieures souples, douces, inspirées des automobiles les plus récentes avec un « goût de chez soi », sans angles vifs, un intérieur dont la chaleur est accentuée par la transparence et l'éclairage, des barres de maintien dessinées pour éviter une trop grande promiscuité, des haut-parleurs sur toute la longueur de la rame, un affichage dynamique de la situation et du sens du trajet.

## Pour le conducteur

La cabine très étudiée sur le plan ergonomique est dans la continuité du volume et des équipements de la rame dont elle est séparée par une vitre, indispensable à la sécurité mais qui ne crée pas de coupure avec les passagers.

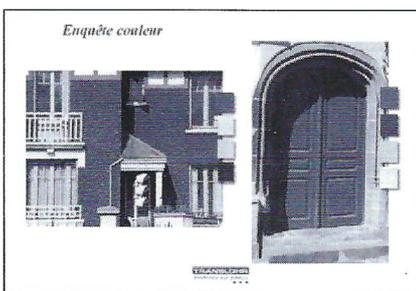


## Les pneus Michelin et le guidage en V

Les pneumatiques sont des Michelin standards du transport routier, dotés d'un système anti-crevaisson. Leur durée de vie est de 60 000 km, soit environ une année d'exploitation, et leur pression est contrôlée en permanence. L'usure, qui peut s'accompagner d'un léger dégonflage, est compensée en permanence par la suspension, garantissant la même hauteur à quai.

L'utilisation du pneumatique constitue une innovation majeure qui permet d'assurer un fonctionnement silencieux, souple, procurant une suspension naturelle, une adhérence et un freinage particulièrement performants et autorise des infrastructures plus légères que le rail. Par ailleurs, le pneu permet de s'attaquer à des pentes de 13%, le viaduc Saint-Jacques faisant 9%.

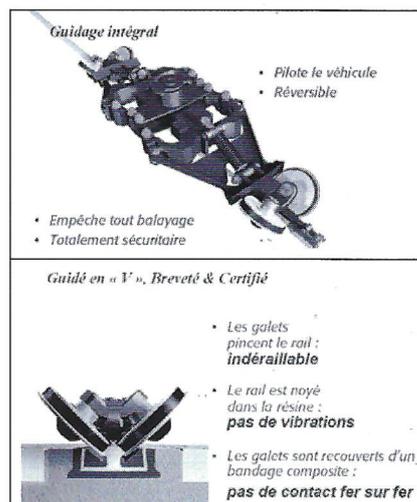
Ensuite le guidage en V, avec deux bras de guidage par essieu : le rail est pincé par deux galets, donc pas de risque de déraillement ; le rail est noyé dans la résine, donc pas de vibrations ; les galets sont recouverts d'un bandage, donc pas de contact fer sur fer.



## Les couleurs

Elles ont été basées sur une étude dans la ville en vue d'établir un nuancier.

Ce travail a abouti à l'harmonie « fleur de lave » testée sur plusieurs sites : un rouge profond à reflets légèrement dorés décliné également à l'intérieur des rames.

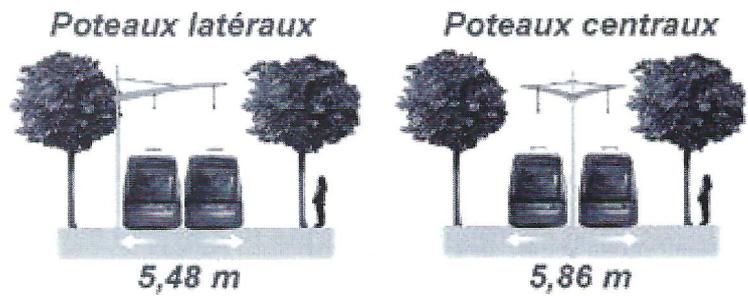


Harmonie « fleur de lave »

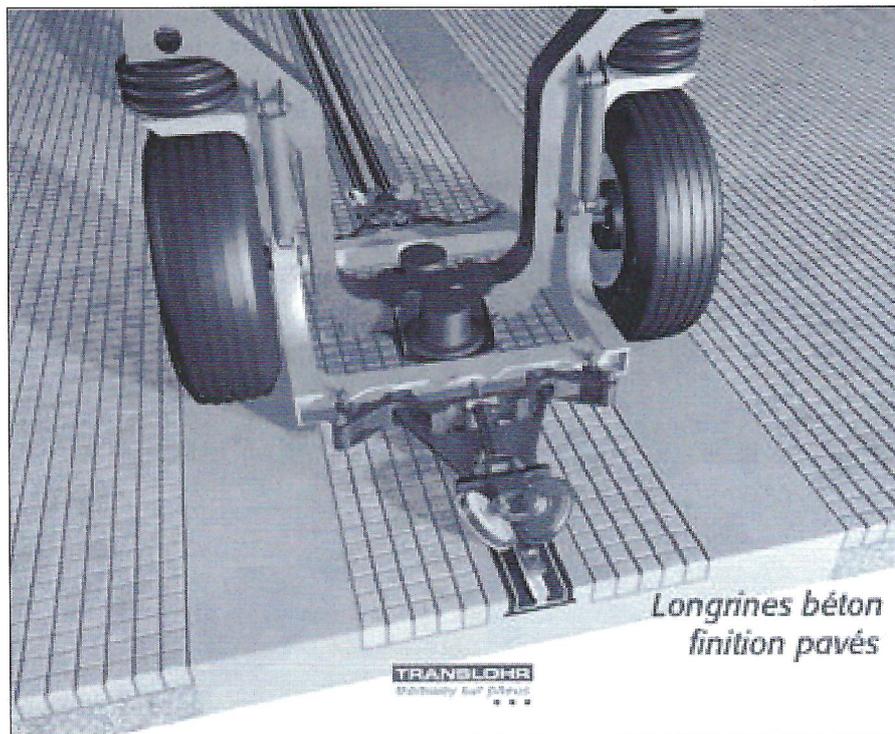
## Le boggie routier

Le boggie routier avec des essieux situés dans l'articulation entre les caisses, constitue une innovation majeure. Avec 8 tonnes de charge par essieu, 6 bars de pression au sol et 75 kg seulement par galet, la chaussée supporte une charge inférieure à celle d'un bus, et le rayon de courbure de 10,50 m et la surface d'emprise au virage sont nettement réduits par rapport à un bus articulé ou tramway plus classique, ce qui permet encore de rapprocher le véhicule de ses usagers.

### *Insertion optimisée*



• *Translohr est à peine plus large qu'une voiture!*



*Longrines béton  
finition pavés*

## L'alimentation électrique

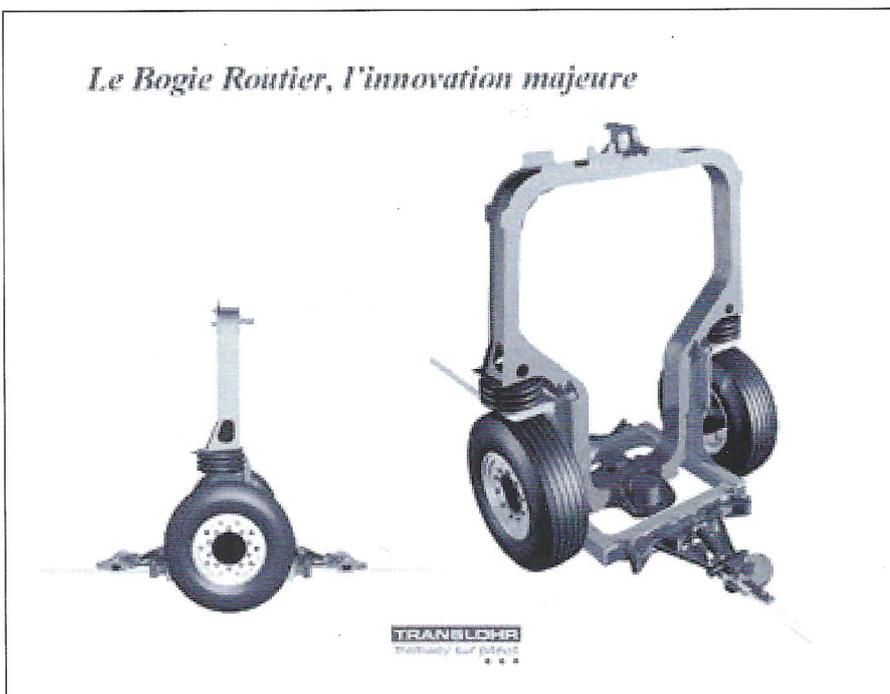
Assurée par une ligne aérienne, elle est constituée par deux chaînes de tractions et deux moteurs asynchrones dont les caractéristiques sont de 2 x 2200 Nm pour le couple de traction maximum et : 2 x 200 kW pour la puissance maximum à la jante.

## Le tramway et la ville

L'arrivée d'un équipement comme le tramway apporte de la cohérence urbaine et ceci à différentes échelles : une échelle globale, celle de l'agglomération, une échelle plus locale, au niveau de la ville, et enfin une échelle plus réduite encore mais assez complexe, celle de chaque quartier qui va se remodeler autour de son passage.

Le tramway va aussi créer un lien entre des compétences et des métiers différents. Il instaure une nouvelle donne en matière d'échange d'espace et de temps. Il modifie de façon évidente le rapport à l'espace en rapprochant centre ville et quartiers extérieurs, ce qui va induire aussi des changements importants et à long terme dans l'économie. Sur le plan environnemental, il implique des décisions claires quant à la répartition des espaces que l'on va décider d'affecter aux hommes, plutôt qu'à la voiture et tout cela contribue à faire du tramway un équipement qui va préserver la ville au bénéfice des générations futures.

### *Le Boggie Routier, l'innovation majeure*





**DONNEES TECHNIQUES** (pour une largeur de 2,20 m)

Modules passagers	nb	4
Portes (ouverture 1,3m x 1,95m)	nb	2 x 4
Pièces totales :		
à 4 pers/m <sup>2</sup>	pers	164
à 6 pers/m <sup>2</sup>	pers	225
Dont places assises	pers	40
Longueur	m	32
Largeur	m	2,20
Hauteur	m	2,95
Niveau plancher intérieur	m	0,25
Essieux	nb	5
Charge à l'essieu	kg	environ 7 000
Essieux moteurs	nb	2
Pression au sol	bar	6
Résistance à la compression	kg	20 000
Moteurs de traction :		
Couple traction maximum	Nm	2 x 2 200
Puissance maximum à la jante pour le véhicule	kW	2 x 200
Poids à vide	kg	25 000
Poids en charge :		
à 4 pers/m <sup>2</sup>	kg	35 660
à 6 pers/m <sup>2</sup>	kg	39 625
Accélération	m/s <sup>2</sup>	1,30
Vitesse maximum	km/h	70
Rayon de giration minimum	m	10,50
Unidirectionnalité		En option
Autonomie hors caténaire		à déterminer selon la longueur du parcours souhaitée



# Visite de la centrale nucléaire de Saint Alban - Saint Maurice

Par **Suzanne GELY**

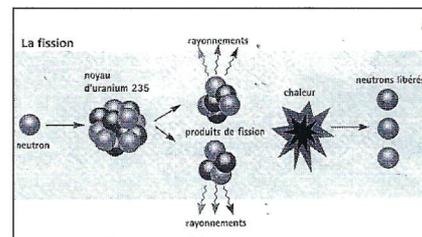
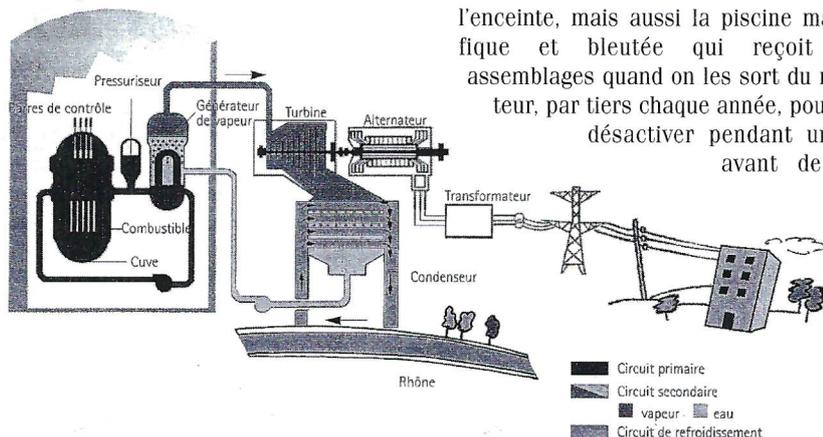
Un groupe d'une vingtaine de personnes, essentiellement des enseignants et des membres de l'ADASTA, a eu le privilège, de visiter la Centrale de St.Alban d'une puissance de 1300 MW, située au bord du Rhône, le samedi 12 mars 2005. Cette visite, organisée à la perfection par M. Michamblé (SFEN Auvergne) avait d'abord été prévue le 29 janvier puis repoussée au 12 mars à cause des intempéries. La visite a commencé à 14 heures par une conférence donnant les généralités sur la production de l'électricité par les centrales nucléaires : « l'uranium est un minéral constitué de deux éléments : 99,3 % d'uranium 238, 0,7 % d'uranium 235 dont seuls les noyaux d'uranium 235 sont fissionables : c'est pourquoi, dans les réacteurs à eau sous pression on augmente leur proportion de 0,7 % à environ 4 %, c'est ce que l'on appelle l'uranium enrichi ». Ils subissent la fission sous l'action de neutrons. L'uranium, sous forme d'assemblages

combustibles est placé dans une cuve en acier ; le phénomène de fission dégage de la chaleur récupérée par l'eau qui circule dans la cuve : c'est le circuit primaire, cette eau à 320°C ne bout pas car elle est maintenue sous pression à 155 bars. Le circuit primaire transmet sa chaleur au circuit secondaire, lui aussi étanche, comportant quatre générateurs de vapeur. La vapeur est alors dirigée vers la turbine puis retransformée en eau dans le condenseur contenant 70 000 tubes refroidis directement par l'eau du Rhône. La turbine entraîne un alternateur produisant l'électricité distribuée sur le réseau (48 000 A sous 20 000 V). Enfin un transformateur amène la tension de 20 000 V à 400 000 V. Nous passons à la visite proprement dite pour laquelle nous avons dû revêtir les tenues professionnelles sans oublier le casque et le dosimètre. On nous a également donné un badge qu'il fallait introduire dans une borne pour franchir les étapes du parcours ! Nous commençons par le bâtiment du réacteur dont on ne voit que l'enceinte, mais aussi la piscine magnifique et bleutée qui reçoit les assemblages quand on les sort du réacteur, par tiers chaque année, pour les désactiver pendant un an avant de les



envoyer à la Hague (il est à noter que depuis l'origine la même eau est utilisée), puis on aperçoit le condenseur... On est frappé par l'absence de techniciens : tout est automatisé ! Nous continuons par le bâtiment des machines : alternateurs impressionnants par leur taille, transformateurs... Les explications sont très claires ainsi que les réponses aux nombreuses questions posées par les visiteurs. Il faut noter que cette centrale n'a pas de tour aéroréfrigérante car le débit du Rhône est suffisant pour le refroidissement du fluide. En fin de visite, après vérification de tous nos dosimètres (aucune contamination !), nous avons reçu une documentation précisant la puissance des installations et nous sommes revenus à Clermont-Ferrand, heureux d'avoir vu de près cette unité de création d'électricité.

Schéma de principe d'un réacteur à eau sous pression



## 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 :

du Lundi au Jeudi de 8h à 12h et de 14h à 17h et le Vendredi de 8h à 12h (*juillet et août inclus*)

En cas d'absence laisser message sur répondeur ou envoyer fax ou E-mail.

Adresser le courrier à

**ADASTA, Centre Riche-Lieu - 13, rue Richelieu - 63400 Chamalières**  
Tél. 04 73 92 12 24 - Fax 04 73 92 11 04 - E-mail : [adasta@wanadoo.fr](mailto:adasta@wanadoo.fr)  
Site internet : <http://perso.wanadoo.fr/adasta>

Dépôt légal Mars 2005 - N° ISSN - 1166-5904