

# AUVERGNE

N° 74 - SEPTEMBRE 2010

# Sciences

**DE DARWIN À  
LA BIOLOGIE DU XXI<sup>ÈME</sup> SIÈCLE**

**LES PLANTES  
ET LE CALENDRIER  
RÉPUBLICAIN**

**PEUT-ON PARLER  
D'ESTHÉTIQUE DE LA SCIENCE ?**

**IMAGERIE DU CIEL ÉTOILÉ**

**OUTILS POUR LE PAVAGE DE SURFACES**

**ITER :  
« LUMIÈRES VERS LE FUTUR »**

**LE BON SENS  
SUFFIT-IL POUR FAIRE  
DES SCIENCES PHYSIQUES ?**

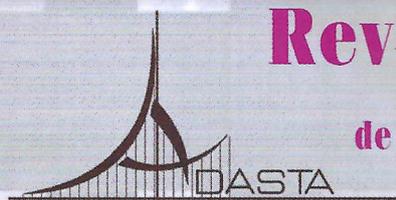
**LES JEUNES POUSSES**

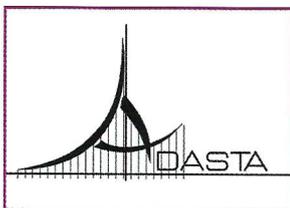
**UN PATRIMOINE  
DANS LES LYCÉES :  
LE MATÉRIEL  
SCIENTIFIQUE ANCIEN**

## Revue de l'ADASTA

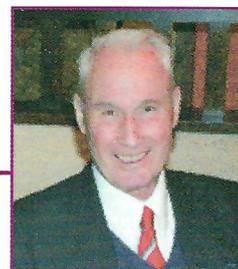
Association pour le Développement  
de l'Animation Scientifique et Technique en Auvergne  
avec la participation du

# Conseil Scientifique SERTILLANGES





# EDITORIAL



Dans un climat serein, l'ADASTA se veut active et, avec ses partenaires, participe aux événements scientifiques de la Région.

Durant 4 jours, au mois de juin, plusieurs d'entre nous ont participé aux animations d'Expo-Sciences à Polydôme avec notre planétarium mobile. Plus de 600 personnes, principalement des enfants, ont reçu une initiation à l'astronomie. De plus, l'ADASTA s'est efforcée de répondre aux questions posées durant les 2 Forums des jeunes ; questions souvent pertinentes auxquelles il était parfois difficile de répondre. La présence permanente de l'ADASTA et son dynamisme ont été appréciés.

L'ADASTA a été officiellement félicitée pour sa compétence et son efficacité.

L'ADASTA a été invitée par l'IFMA pour d'une part, participer à l'examen des dossiers en vue de l'élection des 3 meilleurs ingénieurs de la promotion sortante et, d'autre part, assister à Polydôme à la remise des diplômes aux 162 ingénieurs de la promotion PAGESSE 2010.

D'autres animations ont été effectuées, en particulier à Vulcania les 28 juillet, 4 et 11 août ; également au Forum des Associations de Chamalières le 4 septembre puis au Forum des Associations de Clermont les 18 et 19 septembre.

L'ADASTA se prépare aussi à participer à la Fête de la Science les 21, 22 et 23 octobre avec de nombreuses associations locales.

Avec l'accord du CA, un grand projet devrait voir le jour en 2010. Il s'agit d'un projet important pour l'image de l'Adasta et la preuve de sa large implication dans la Région.

Il consiste à organiser à Clermont 4 conférences-débats sur les énergies.

La première est prévue en octobre ou novembre et portera sur « La consommation actuelle d'énergie électrique et des autres énergies dans l'industrie, les transports et le chauffage. Evolution de ces besoins à l'horizon 2050 ».

Plusieurs partenaires participeront à cet événement dont l'ADEME, SFEN, ASTUSCIENCES, EDF, URIS (Union Régionale des Ingénieurs et Scientifiques), DRRT (Direction régionale à la Recherche et à la Technologie), la CA (Communauté d'Agglomération) et la MAIRIE de Clermont.

Les autres conférences-débats se succéderont à intervalles de 1 à 3 mois. Les médias seront mis à la tâche avant, pendant et après chaque conférence-débat.

Vous serez, bien sûr, tenus au courant de l'avancement de ce projet. L'activité des "jeunes pousses" continue mais l'Adasta se propose d'en modifier les modalités afin d'augmenter le nombre de participants, relever le niveau scientifique, et s'adresser aussi aux parents. La prochaine réunion aura lieu à "Bien Assis" le mercredi 29 septembre à 14 h avec comme sujet les fours à micro-ondes: conditions de fonctionnement, fonctionnement, expériences surprenantes et inattendues.

Pour l'équilibre de nos finances, la pièce à côté du bureau et celle où se trouvait le planétarium fixe ont été libérées. Les matériels concernés ont été triés pour ne conserver que l'essentiel qui sera stocké dans notre local rue de Bien-Assis à Clermont, en attendant de créer une salle « pour la science ».

A l'occasion de la sortie de la présente revue et des espérances nouvelles de l'ADASTA, faites-nous part de vos remarques, de vos suggestions et aussi de vos critiques. Que le meilleur nous arrive !

*Le Président,  
Henri Bouffard*

## SOMMAIRE

### MERCI À NOS SPONSORS



De Darwin à la biologie du XXI <sup>ème</sup> siècle .....	2
Les Plantes et le Calendrier Républicain .....	8
Peut-on parler d'esthétique de la Science ? .....	14
Imagerie du ciel étoilé .....	15
Outils pour le pavage de surfaces .....	19
ITER : « Lumières vers le futur » .....	24
Le bon sens suffit-il pour faire des sciences physiques ? .....	28
Activités des "Jeunes Pousses" .....	32
Un patrimoine dans les lycées : le matériel scientifique ancien	33

Les articles publiés sont de la responsabilité exclusive de leurs auteurs

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

Rédacteur en chef : Philippe Choisel

Membres : Jocelyne Allée, Georges Anton, Vincent Barra, Henri Bouffard, Jean-Claude Capelani, Jean Chandezon, Luc Dettwiller, Roland Fustier, Paul-Louis Hennequin.

### Conseil Scientifique Sertillanges

Ensemble scolaire JB de la Salle représenté par Louis Avan

Photo de couverture : Eglantine, photo de Monsieur Michel Gendraud

Remerciements également à nos auteurs pour les photos communiquées

Réalisation et conception : Design'Création - 04 71 02 80 57



# DE DARWIN À LA BIOLOGIE DU XXI<sup>ÈME</sup> SIÈCLE

**PHILIPPE LACHAUME**

*Maître de conférence en génétique à l'université Blaise Pascal*

*Contrairement à ce qui est habituellement reconnu, Darwin n'a pas inventé le concept d'évolution, de transformation; d'autres l'avaient envisagé avant lui. Il a par contre plus que tout autre popularisé cette idée dans la société civile et fourni le premier modèle cohérent et réaliste de ce processus.*

## QU'EST-CE QUE L'ÉVOLUTION ?

La transformation progressive des espèces au cours du temps constitue l'évolution biologique. Ce phénomène est étroitement lié au processus de naissance de nouvelles espèces (spéciation) par différentiation et radiation à partir d'une espèce ancestrale. Ainsi, tout changement dans le temps d'un caractère commun aux individus d'une espèce peut être assimilé à l'évolution. Ces changements peuvent être de faible ampleur (généralement sur un temps court), on parlera alors de microévolution, ou alors de plus grande ampleur (pour des temps longs - millions d'années), on parlera cette fois de macroévolution. La comparaison d'espèces proches renseigne sur la microévolution alors que la macroévolution est illustrée par la comparaison d'espèces très différentes.

Le concept d'évolution biologique pose deux questions essentielles : celle des origines et celle des mécanismes. Ces questions n'avaient guère de sens en Occident jusqu'au XIX<sup>ème</sup> siècle puisque la vision principale de l'organisation du monde vivant était celle imposée par l'église chrétienne : création par Dieu de l'homme et de tout ce qui l'entoure, êtres vivants ou matière inerte. La question des origines n'était pas ouverte à la science, elle était réservée à la métaphysique, la théologie et éventuellement la philosophie. Quant à celle des mécanismes elle n'avait aucun sens en dehors du concept d'évolution.

La découverte de fossiles d'espèces disparues posait évidemment problème. Georges Cuvier, anatomiste français, principal promoteur de l'anatomie comparée et de la paléontologie, proposa une explication qu'on appelle le Catastrophisme : des catastrophes (sécheresses, inondations ...) entraînent l'extinction d'espèces et le repeuplement par des espèces périphériques à la zone catastrophée ou nouvellement créées. La création ne se serait pas produite en une seule fois mais l'évolution n'est toujours pas envisagée.

Devant l'impossibilité de faire entrer de nombreuses observations dans ce cadre dogmatique strict, une vision transformiste apparaît progressivement à la fin du XVIII<sup>ème</sup> siècle. Les acteurs principaux en seront Erasmus Darwin, le grand-père de Charles, Georges-Louis Leclerc, plus connu sous le nom de Buffon, et Jean-Baptiste Lamarck. Ce dernier est le premier à exposer une théorie intégrée du processus évolutif, proposant en particulier une hypothèse sur les mécanismes mis en jeu. Cette hypothèse est basée principalement sur l'observation de l'adaptation des êtres vivants à leur milieu. Pour exploiter au mieux son environnement, l'individu, grâce à ses efforts, va modifier son apparence. La nouvelle forme ainsi acquise se transmettant à la descendance, la modification pourra se continuer au cours des générations. L'exemple classique permettant de comprendre la pensée de Lamarck est celui du cou des

girafes. Pour manger les feuilles hautes des arbres, chaque individu est poussé à tirer le cou vers le haut. Cette action va enclencher l'allongement du cou de chaque individu. Cette hypothèse n'a rien de stupide, de nombreux caractères peuvent être modelés par l'environnement, citons par exemple la taille des végétaux en fonction de l'altitude. Adulte, la girafe ayant un cou plus long qu'au début de sa vie, elle donnera naissance à des individus dont le cou est initialement plus grand. De génération en génération, la taille du cou des girafes sera donc augmentée pour atteindre celle connue actuellement. L'individu au cours de sa vie est donc le siège de l'évolution, chez lui la nécessité crée la fonction. Mais cette hypothèse va se heurter à deux problèmes insolubles. Si l'influence du milieu peut être aisément expliquée pour certains caractères comme la taille, quel effort d'un individu pourrait déclencher un changement de couleur par exemple ? Le deuxième est encore plus grand : la théorie de la transmission des caractères acquis est inopérante pour l'essentiel. Bien que cohérente en fonction des observations effectuées et des connaissances de son époque, la théorie de Lamarck n'aura pas le retentissement mérité.

Donc, malgré les efforts de ses prédécesseurs, c'est dans un contexte de confusion entre science et religion que Charles Darwin va élaborer sa théorie de l'évolution et élucider le mystère des mécanismes de celle-ci. L'une des raisons expliquant sa réussite est sans doute son approche scientifique remarquable pour l'époque, comparable en de nombreux points avec celle des scientifiques du XXI<sup>ème</sup> siècle : observation, hypothèse, expérimentation, interprétation, propositions.

## VOYAGE SUR LE BEAGLE

Né dans une famille bourgeoise anglaise de médecins, son avenir était tout tracé. Mais après l'échec de ses études de médecine (il supportait mal les enseignements de chirurgie qu'il considérait comme barbares) son père l'inscrit au *Christ College* de Cambridge pour suivre des études de théologie ; c'est décidé, il sera pasteur dans la campagne anglaise où il pourra assouvir ses penchants naturalistes naissants. C'est sur la recommandation de l'un de ses professeurs, le révérend



*Portrait de Charles Darwin, tiré du livre de Karl Pearson « La vie, les lettres et les travaux de Francis Galton »*

John Stevens Henslow, qu'il postule en tant que scientifique et compagnon de voyage du capitaine Fitz-Roy pour une expédition géographique de cartographie de l'Amérique du sud. Il embarque quatre semaines plus tard sur le *Beagle* pour un voyage qui devait durer deux ans. Celui-ci durera en fait beaucoup plus longtemps mais éloignera définitivement Charles Darwin de son avenir de pasteur et jouera un rôle prépondérant dans l'élaboration de sa théorie de l'évolution.

## APPRÉHENSION DE LA BIODIVERSITÉ

C'est au cours de ce voyage que Darwin met en œuvre la première des qualités nécessaires à un scientifique : l'observation. Pendant tout son périple, il accumule les spécimens d'espèces diverses qu'il passe beaucoup de temps à observer, décrire minutieusement, classer. Il ne collecte pas moins de 5436 spécimens dont certains sont toujours utilisés comme individus référents de l'espèce.

Devant l'encombrement généré sur le bateau par cette récolte, le capitaine Fitz-Roy propose à Darwin d'envoyer régulièrement ses découvertes vers l'Angleterre. Ce dernier accompagne ses envois de descriptions minutieuses, ce qui lui vaudra, dès son retour, une solide réputation et scellera son avenir.

Les principaux enseignements qu'il tire de cette accumulation et de ces observations sont d'une part, la formidable importance de deux piliers de ce qu'on appelle maintenant la biodiversité (multitude des espèces et polymorphisme intra spécifique) et d'autre part la répartition non aléatoire des ressemblances entre espèces, ce qui mènera à l'idée de parenté évolutive.

## LA LUTTE POUR LA SURVIE

Charles Darwin a entendu parler des forêts tropicales d'Amérique du sud par John Edmonstone, un esclave affranchi, qui lui a enseigné la taxidermie. Mais le monde qu'il découvre contraste avec l'image naïve du paradis terrestre souvent proposée de cet environnement. Il ne voit qu'une lutte incessante entre les espèces et entre les individus d'une même espèce, se dit fasciné par la pourriture, terreau de la vie des autres organismes. Il prend conscience que la vie n'est pas un « long fleuve tranquille » mais au contraire une lutte acharnée permanente pour la survie. Il est peu probable que cette image ait pu lui venir dans les campagnes paisibles de l'Angleterre, ce qui montre de nouveau l'importance de ce voyage dans l'émergence des idées de Darwin.

## LES GALÁPAGOS

L'étape la plus connue du voyage du *Beagle* est sans doute celle des Galápagos. Cet archipel est constitué d'un ensemble d'îles volcaniques situé dans le pacifique Est, à environ mille kilomètres au large de l'Equateur. Ce qui fascine particulièrement Darwin, c'est la biodiversité spécifique de cette île, la présence de nombreuses espèces endémiques mais aussi l'absence de certains groupes particuliers (pas de batraciens). Il étudie en détail un groupe d'oiseaux connus maintenant sous le nom de « pinsons de Darwin ». Il fait plusieurs constatations essentielles qui seront confirmées à son retour par l'ornithologue John Gould : les groupes situés sur les différentes îles se ressemblent mais forment des espèces distinctes ; ces espèces utilisent des niches écologiques différentes ; chaque groupe possède des caractéristiques adaptées à son mode de vie (c'est par exemple le cas des becs adaptés au régime alimentaire). Il en conclura plus tard que les pinsons des Galápagos dérivent d'une espèce continentale et que bien que très proches, ils se sont subtilement adaptés aux conditions locales de chaque île. Dans la nature, les espèces se transforment avec le temps...

## LES TEMPS GÉOLOGIQUES ET LA SUCCESSION DES ESPÈCES

Charles Darwin s'intéresse également à la géologie et c'est d'ailleurs pour ces travaux qu'il fut initialement reconnu. Deux observations sont prépondérantes dans sa vision du monde. La première est que des couches sédimentaires contenant des fossiles marins se retrouvent parfois à haute altitude. La seconde observation est celle des paysages

chaotiques et vallonnés qu'il fait en Australie. Comme il l'a lui-même constaté lors d'un tremblement de terre pendant une excursion en Amazonie, la croûte terrestre n'est pas stable, elle se modifie avec le temps et l'explication la plus raisonnable de ces observations est que des sols sous-marins se soulèvent pour constituer des montagnes et que de lents processus d'érosions façonnent les paysages. Il rejoint en cela les interprétations de Charles Lyell, éminent géologue contemporain dont un ouvrage lui a été offert par Fitz-Roy. Cette hypothèse est très audacieuse pour son époque puisque la vision communément admise dans ce domaine est celle du pasteur anglican James Husher qui avait calculé selon les évangiles que le monde avait été créé par Dieu le 22 octobre 4004 avant JC. L'allongement des temps géologiques devenait alors compatible avec une histoire longue et graduelle de la vie.

C'est lors d'expéditions d'analyse de couches sédimentaires que Darwin découvre un certain nombre de fossiles. Ceux qui retiennent particulièrement son attention sont ceux d'espèces géantes tels que le *Megathérium* (paresseux géant) ou le *Glyptodon* (tatou géant). Ces animaux disparus sont pourtant très apparentés à des espèces actuelles de l'Amérique du sud. Des espèces proches pourraient-elles se succéder ? L'hypothèse catastrophiste de Cuvier perd alors pour lui un peu de son sens : pourquoi recréer des espèces à la fois proches mais dissemblables de celles disparues ?

## LA MATURATION

Au lieu des deux années prévues, le voyage sur le *Beagle* aura duré pratiquement cinq ans. A son retour, Charles Darwin est accueilli par les membres de la communauté scientifique londonienne comme l'un des leurs. Ses spécimens et les comptes-rendus de ses observations l'ont précédé. Il n'est plus question d'une carrière de pasteur mais désormais ce sera le début d'une longue et fructueuse carrière de scientifique. Sa théorie de l'évolution n'est pas encore clairement élaborée mais les éléments principaux sont d'ores et déjà réunis. Il mettra vingt-trois ans avant de publier ses résultats, vingt-trois ans d'une longue maturation, d'une vérification minutieuse de chaque point, d'une confrontation systématique de ses idées avec la réalité et les travaux de ses contemporains.

En effet, d'autres avant lui ont suggéré un processus d'évolution, mais se sont immédiatement heurtés au dogme chrétien de la création et se sont vus rejetés comme des hérétiques au sein même de la communauté scientifique. C'est pour cette raison qu'il ne confie ses intuitions qu'à ses proches et qu'il œuvre pendant de longues années à identifier les faiblesses de sa théorie et à chercher des réponses aux objections qui lui sont faites. Pour cela il tisse un réseau de scientifiques spécialistes de diverses disciplines dont certains deviendront des amis proches.

Parmi ces scientifiques, John Gould, ornithologue de renom, lui confirme que les pinsons trouvés sur les Galápagos forment des espèces distinctes, toutes apparentées entre elles et avec les pinsons du continent sud américain. C'est avec lui que Darwin élabore l'hypothèse de spéciations adaptatives pour expliquer ce phénomène.

Il devient l'ami de Charles Lyell, le fameux géologue dont nous avons déjà parlé et auteur principal de la théorie de l'uniformitarisme. Celle-ci proposait que la surface de la terre soit modelée par un ensemble de phénomènes (volcanisme, érosion, soulèvements de la croûte terrestre...) pendant de très longues périodes de temps et que ces phénomènes soient toujours en activité.

Citons également parmi ses proches Joseph Dalton Hooker, directeur-assistant des « Jardins botaniques royaux », ainsi que Thomas Henry Huxley, biologiste et philosophe, qu'on appellera plus tard le « bouledogue de Darwin » du fait de son acharnement à défendre les thèses de son ami. Notons que tous ces personnages étaient partisans d'une vision fixiste du monde vivant mais que tous ont été progressivement convaincus par les arguments de Darwin.

Richard Owen, quant à lui, est très intéressé par les fossiles ramenés par Darwin et ses travaux sur l'anatomie comparative sont précieux pour la validation de la théorie de l'évolution. Pourtant Owen reste un opposant farouche de cette théorie.

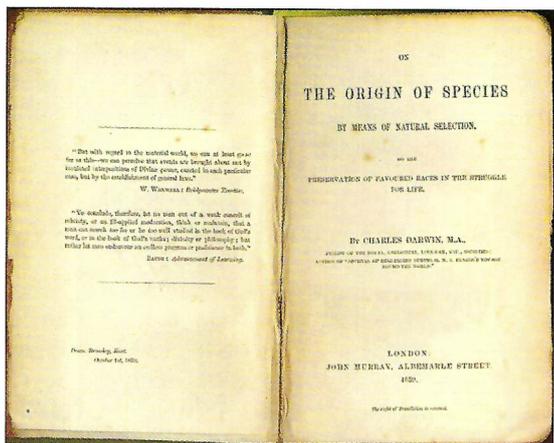
On ne peut parler de la mise en place de la théorie de la sélection naturelle sans évoquer les écrits de l'économiste Thomas Robert Malthus. Celui-ci est le théoricien de la « catastrophe démographique ». Il suggère que les ressources augmentent de façon linéaire alors que les populations humaines augmentent de façon exponentielle ce qui mène inévitablement vers la pénurie. Il ne voit d'autres solutions que d'empêcher les populations de croître et préconise un choix dans les individus dignes de se reproduire. La misère lui apparaît donc comme un élément bénéfique de la régulation des populations. S'il est peu probable que Darwin adhère à ces thèses, il est par contre certain que la vision malthusienne de l'interaction entre une population et les ressources disponibles aura une importance capitale dans la compréhension du processus de sélection naturelle.

L'autre source d'inspiration de Darwin est son étude des espèces domestiques et tout particulièrement des pigeons. Membre de deux clubs colombophiles de Londres, il analyse de près l'origine des différentes races, allant jusqu'à entretenir une correspondance avec certains éleveurs du Moyen-Orient. Il en tire deux éléments essentiels : (1) toutes les races connues dérivent d'une seule et même espèce sauvage, quelles que soient leurs différences apparentes ; (2) les caractéristiques spécifiques de chaque race ont été sélectionnées par les éleveurs grâce à un choix judicieux des reproducteurs de génération en génération. La solution pour comprendre le mécanisme de l'évolution est là.

Darwin mène aussi un certain nombre d'expériences afin de vérifier des détails de sa théorie et des scénarii envisagés pour expliquer certaines observations. Ainsi il démontrera que de nombreuses graines d'espèces végétales trouvées sur les Galápagos sont capables de germer après un long séjour dans l'eau de mer, accréditant ainsi une origine continentale de ces espèces insulaires.

### LA PUBLICATION

A ce point désireux de produire une théorie irréprochable, Darwin prenait le risque que d'autres le rattrapent et exposent une théorie équivalente. C'est ce qui manque se produire en 1858.



Couverture originale de « l'origine des espèces », 1859.

Alfred Wallace, jeune naturaliste et explorateur avec lequel il entretenait une correspondance, lui propose un manuscrit dans lequel il découvre avec stupeur que ce dernier est arrivé exactement aux mêmes conclusions que lui. Son ami Lyell fait paraître ensemble les écrits de Wallace et des écrits inédits de Darwin en soulignant bien la primauté de celui-ci. Mais Darwin n'a plus le choix, s'il veut garder la paternité de plus de vingt ans de travail et de réflexions, il doit publier au plus vite un exposé complet de sa théorie.

Le 24 novembre 1859 paraît donc son œuvre majeure : « de **L'Origine des espèces par le moyen de la sélection naturelle, ou la préservation des races favorisées dans la lutte pour la vie** », plus connu sous le titre court « **l'origine des espèces** ».

### LA THÉORIE DARWINIENNE

La théorie proposée par Darwin peut se décomposer en plusieurs points :

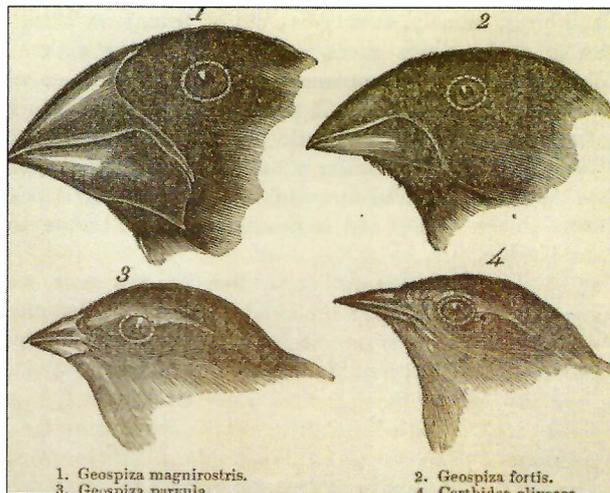
#### 1- La diversité des formes est la règle dans les populations naturelles

Ce constat a été maintes fois renouvelé et chacun d'entre nous peut le faire en observant les individus d'une espèce. Les caractères susceptibles de varier sont multiples, tout aussi bien morphologiques (couleur, taille, forme) que physiologiques (tolérance au froid, au chaud, à un parasite..) ou génétiques.

#### 2- Chaque génération produit plus d'individus que ce que l'environnement peut en accueillir

Il suffit pour se convaincre de cela de calculer le nombre d'individus qu'un seul couple de souris pourrait générer durant sa vie : sachant que la gestation dure 3 semaines, que la maturité sexuelle est atteinte en 6 semaines, que chaque femelle fait en moyenne 6 portées par an et que la durée de vie d'une souris est d'environ deux ans, on arrive à ce chiffre faramineux de plus de 200 millions de descendants !! Il va de soit qu'aucun de nos greniers n'accueille de telles colonies... Darwin avait fait un calcul similaire avec des éléphants, organismes ayant la reproduction la plus lente. Le résultat en est tout aussi absurde même s'il nécessite de compter en siècles et non plus en années. Une seule solution s'impose : tous les individus ne peuvent survivre à chaque génération. Mais la survie ne se fait pas aléatoirement, ce qui nous renvoie au troisième point de la théorie de Darwin, sans doute le plus important.

#### 3- Il y a sélection naturelle des individus de la population



1. *Geospiza magnirostris*. 2. *Geospiza fortis*. 3. *Geospiza parvula*. 4. *Certhidea olivacea*.

« Les pinsons de Darwin », dessin de John Gould (1804-1881) publié par Charles Darwin dans « *Journal of Researches into the Geology and Natural History of the Various Countries by H.M.S. Beagle* » (2<sup>ème</sup> édition, 1845)

Tous les individus ne peuvent survivre, ce sont leurs capacités particulières qui en décident. La sélection conserve les individus les mieux adaptés à leur environnement. Ces derniers ont donc un rôle prépondérant dans la reproduction, le caractère ainsi responsable de leur avantage sera plus efficacement transmis à la descendance et deviendra de plus en plus fréquent.

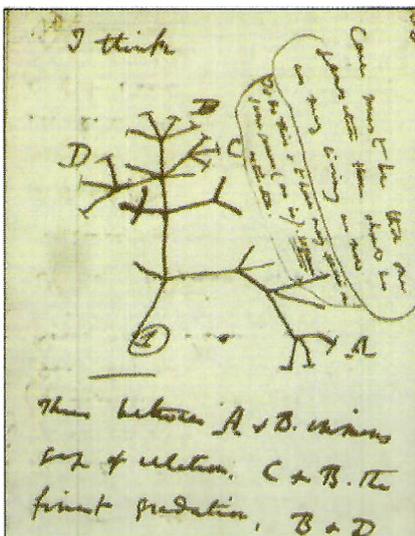
Ce principe appliqué au fameux exemple du cou des girafes implique qu'il existe dans une population une diversité de taille des cous, que les girafes ayant le cou le plus long accèdent plus aisément aux feuilles hautes des arbres, échappant ainsi à la concurrence avec les autres girafes et les individus des autres espèces. Partant du principe que ce caractère est héréditaire, la population s'enrichit de générations en générations en girafes au long cou. Associé à un processus permanent de variation, cette sélection induirait une augmentation du cou jusqu'à atteindre la taille « idéale ». Notons que Darwin ignorait tout des mécanismes de transmission et de variations des caractères. Il croyait lui aussi à l'hérédité acquise mais n'en faisait pas le mécanisme principal de l'évolution.

#### 4- La sélection sexuelle

Ce point n'est pas évoqué dans « l'origine des espèces », il sera introduit plus tard par Darwin. Il est pourtant important d'en parler maintenant car cet élément est crucial et montre qu'il a continué à enrichir sa théorie et tenter de résoudre certaines difficultés rencontrées. Il s'agit ici de comprendre comment des caractères dont l'avantage produit est peu compréhensible sont maintenus dans les populations. L'exemple simple est celui de la queue du paon. Comment un tel atout peut-il dans la nature procurer un avantage aux mâles qui en sont affublés ? Il paraît plus vraisemblable au contraire qu'il s'agit d'un élément diminuant la possibilité de fuite devant les prédateurs. Darwin envisage donc qu'il y a également sélection sexuelle : chaque individu a une capacité spécifique à se reproduire, dépendant de sa fécondité et pour le paon, de sa capacité à trouver une ou des partenaires. La magnifique roue du paon lui permet donc de séduire efficacement les femelles et d'augmenter la transmission de ce caractère à la descendance, ce qui compense largement les inconvénients liés à la prédation. Actuellement, les généticiens des populations utilisent deux paramètres pour modéliser les processus de sélection :  $\sigma$ , la viabilité des individus et  $\sigma$  leur fécondité...

#### 5- Deux populations qui se différencient deviennent progressivement deux espèces :

L'apparition progressive dans une population de caractères spécifiques par sélection induit une différenciation par rapport aux autres populations de la même espèce ce qui conduit à la formation de deux espèces distinctes. Les espèces sont donc créées par radiation. La naissance de cette idée chez Darwin est palpable dans les schémas retrouvés dans ses notes. C'est également la seule illustration de son livre.

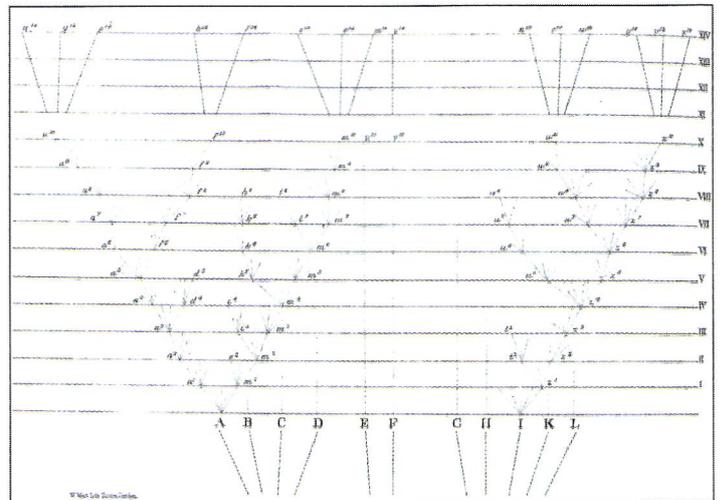


Esquisse de Charles Darwin d'un « arbre évolutif » tiré de son premier recueil de notes sur la transmutation des espèces (1837)

L'ensemble de la biodiversité peut se représenter sous forme d'un arbre, chaque fourche représentant une divergence radiative ou une spéciation. La ressemblance entre les espèces est la marque de leur parenté évolutive. L'homme n'occupe dans cet arbre qu'une place comparable à celle des autres espèces ! On peut ajouter également qu'une espèce qui ne dispose pas de la diversité nécessaire à son adaptation disparaîtra. On trouve donc très facilement la place des espèces disparues (fossiles) dans ce schéma.

#### 6- Une fois l'étape précédente du raisonnement admise, il suffit de pousser la logique jusqu'au bout pour arriver à la conclusion finale de ce travail : Les espèces sont issues d'une même forme de vie primordiale

Autrement dit toutes les formes de vie ont une parenté plus ou moins grande, il y a une seule origine pour toutes les espèces. J'ai souvent remarqué à quel point il était difficile pour nos étudiants, pourtant familiarisés avec le concept d'évolution, d'admettre qu'ils pourraient avoir une certaine parenté avec la laitue... Les conclusions de Darwin n'en sont que plus remarquables. Pour éviter toute idée d'orientation dans l'évolution, Darwin préférera l'image du corail pour représenter la diversité du vivant, le point central de ce corail représentant la forme de vie primordiale, l'évolution se produisant dans toutes les directions en même temps.



Seule illustration de « L'origine des espèces », Charles Darwin, (1859) représentant la divergence possible des espèces à partir d'un ancêtre commun.

#### DEPUIS DARWIN

La théorie de Darwin souffrait d'un manque évident : il fallait identifier les mécanismes du déterminisme et de la transmission des caractères. Les hypothèses les plus farfelues avaient été imaginées jusque là mais rien de sérieux n'avait été découvert. C'est à Gregor Mendel qu'on doit la première mise en évidence des mécanismes de transmission des caractères. Celui-ci était contemporain de Darwin mais malheureusement n'avait pas sa pugnacité et ses qualités de scientifique. Moine au monastère de Brünn (actuellement en République Tchèque), celui-ci a mené pendant 10 ans des études sur l'hybridation des espèces cultivées en prenant comme modèle le pois. Ses travaux ont été publiés en 1865. Devant le peu d'enthousiasme soulevé par ces travaux et ayant récupéré la charge de père supérieur de son couvent, il abandonne ses recherches sans jamais y revenir. Il faut attendre l'année 1900 pour que trois scientifiques, Carl Correns, Hugo DeVries et Erich von Tschermak-Seysenegg, redécouvrent les lois de l'hérédité. C'est à Correns que l'on doit la reconnaissance de la primauté des travaux de Mendel et l'appellation de « loi de Mendel » sous laquelle les règles de

transmission des caractères sont connues aujourd'hui. Sans cette honnêteté intellectuelle, personne ne connaîtrait aujourd'hui Grégor Mendel.

A partir de 1910, Thomas Morgan et son équipe élaborent la « théorie chromosomique de l'hérédité », démontrant que les gènes, unités d'information responsables des caractères, sont portés par des structures cellulaires particulières : les chromosomes. Il utilise le premier la drosophile (ou mouche du vinaigre) comme modèle, établira les premières cartes chromosomiques en y positionnant les gènes et en calculant la distance les séparant. L'unité pour cette dernière mesure porte d'ailleurs toujours son nom : le centiMorgan.

Il faut attendre 1944 pour que les travaux de l'équipe de Oswald Avery démontrent que le support de l'information génétique, c'est-à-dire des gènes, est l'ADN et non pas les protéines, autre constituant des chromosomes.

C'est dans les années 1930-1940 que la synthèse entre la génétique, la génétique des populations et l'évolutionnisme darwinien va donner naissance à une théorie unificatrice connue sous le nom de « théorie synthétique de l'évolution » ou « néodarwinisme ». Les éléments principaux de la théorie darwinienne sont repris mais certains mécanismes sont précisés. En particulier la diversité des populations naturelles est attribuée au mécanisme de mutation de l'ADN, la sélection des allèles\* avantageux est le moteur principal (voire exclusif) de l'évolution. Fait nouveau et très important, grâce à cette synthèse, l'évolution devient expérimentable : en effet les mécanismes responsables de la modification graduelle des populations à une échelle de temps compatible avec l'observation (microévolution) sont unifiés avec ceux responsables des modifications à l'échelle évolutive (macroévolution). Un exemple très classique illustre ces mécanismes de sélection, celui du « mélanisme industriel » chez la phalène du bouleau (*Biston betularia*). Jusqu'au milieu du XIX<sup>ème</sup>, seule une forme claire de ce papillon est rencontrée. En 1848 on note la première capture d'une forme sombre dans la région de Manchester. La fréquence de cette nouvelle forme ne cesse de s'accroître et les individus sombres se répandent dans tout le Royaume Uni. La forme claire restait majoritaire dans les régions rurales alors que la forme sombre était très répandue dans les régions industrielles. Grâce à ces observations et aux expériences menées par Bernard Kettlewell dans les années 1950, une explication « darwinienne » fut fournie : sur les troncs de bouleaux dépouillés de lichen et noircis par la pollution, les papillons noirs peuvent plus facilement échapper à leurs prédateurs que les formes claires. Dans les régions rurales, moins polluées, c'est l'inverse qui se produit. Même si certaines controverses existent sur la nature réelle de la pression de sélection (prédation ou pas ?), il est à noter que dans les régions ayant adopté un plan de dépollution (the Clean Air Acts), la forme sombre a progressivement disparu en même temps que les stigmates de la pollution industrielle. Le processus de sélection est donc bien un processus actif dans la nature.

Le développement de la biologie moléculaire, en particulier le séquençage des protéines puis de l'ADN, a très largement confirmé la parenté des espèces vivantes. Si l'on compare les globines (protéine intervenant dans le transport de l'oxygène) entre différentes espèces de vertébrés, on constate qu'il existe une relation quasi linéaire entre le temps de séparation des espèces (établi sur des observations paléontologiques) et le taux de ressemblances de ces protéines. Tout se passe donc comme si l'évolution des séquences était un processus continu et constant. Ce fait est

désormais très utilisé pour établir l'histoire évolutive de différentes espèces. Et pour l'essentiel cette histoire est proche de celle envisagée en utilisant d'autres données que moléculaires, montrant en quelque sorte la cohérence des processus évolutifs.

Enfin, Darwin serait sans doute ravi de constater que les systématiciens d'aujourd'hui ont repris sa représentation buissonnante (corail) de l'évolution de la vie.

### CE QUE DARWIN AVAIT SOUS-ESTIMÉ

La réintégration de l'homme dans l'histoire commune du monde vivant serait sans doute pour certains plus facile à admettre si l'aléatoire ne prenait autant de place dans les mécanismes évolutifs décrits par Darwin. En effet, deux facteurs sont essentiels dans sa théorie, la variation dans les populations et la sélection. Or, le hasard y joue un rôle important. La mutation, source de la variabilité des espèces, est un processus aléatoire ne permettant aucune anticipation des modifications produites. La sélection, quant à elle, dépend de phénomènes divers dont la conjonction est imprévisible. Il va de soi que la réunion du couple mutation et sélection qui lui procure un avantage, est d'autant plus aléatoire.

Malgré tout, la part du hasard dans les processus évolutifs est largement sous-estimée dans la théorie darwinienne puis dans la théorie synthétique. Nous devons principalement aux travaux de Motoo Kimura dans les années 70-80 la mise en évidence d'autres mécanismes évolutifs totalement aléatoires. Depuis longtemps, les généticiens des populations ont observé que plus une population est de petite taille, plus sa diversité génétique est faible. A chaque génération, la faiblesse du nombre de reproducteurs augmente la probabilité de ne pas transmettre l'une des formes présentes d'un caractère. Celles-ci peuvent donc être fixées ou éliminées au hasard dans de petites populations. Il n'est donc pas utile dans ce cas de faire appel à la sélection pour voir évoluer une population. Mais quelle importance ce phénomène appelé « dérive génétique » joue-t-il dans l'évolution ? Une population de petite taille est-elle indispensable à l'apparition du processus de dérive ? En réalité il suffit que la taille de la population ne soit pas infinie. Prenons une population assez grande mais de taille constante au cours des générations. Pour maintenir le nombre d'individus, chacun doit laisser un descendant à la génération suivante, ou dans une espèce à reproduction sexuée, chaque couple doit avoir deux descendants. Ainsi, tous les individus n'ayant pas le même succès reproductif, certains ayant de nombreux descendants, d'autres aucun (par les aléas de la vie), certaines lignées s'éteignent alors que d'autres prospèrent. Les caractères véhiculés par les lignées prospères se généralisent dans les populations alors que ceux portés par les lignées qui s'éteignent disparaissent. La transmission aléatoire dans des populations de taille non infinie peut donc expliquer la transformation de certains caractères au cours du temps et donc l'évolution.

### CE QUI RESTE À FAIRE

Les discussions dans le monde scientifique ne portent pas sur l'existence du processus évolutif, sur la parenté entre les êtres vivants ni sur les mécanismes de l'évolution : mutation, sélection, hasard sont et resteront les moteurs principaux de la diversification du monde vivant. Elles portent par contre sur l'importance relative des différents moteurs, sur leurs implications dans les différents aspects du processus évolutif mais également sur le lien entre micro- et macroévolution. Les changements observés dans la Macroévolution sont-ils la simple accumulation des changements de la microévolution, ne sont-ils, comme le pensait Darwin et le pensent encore les orthodoxes de la

théorie synthétique, qu'une accumulation lente de petits changements microévolutifs ou au contraire font-ils intervenir des mécanismes spécifiques ?

Stephen J Gould, paléontologue américain de renom, a parfois été considéré comme un « anti-darwinien » car ses idées ne trouvaient pas place dans l'orthodoxie imposée par la théorie synthétique. Mais à y regarder de plus près, il n'a fait que suggérer des mécanismes alternatifs dans le lien entre micro et macroévolution, sans remettre en cause de façon dramatique les idées de Darwin. Sa vision est regroupée dans la « Théorie des équilibres ponctués » dont il est le co-auteur avec Nils Eldredge. Leurs observations de paléontologues les ont conduits à noter une certaine discontinuité dans la vitesse de transformation des espèces : en effet celles-ci peuvent rester inchangées (morphologiquement) pendant de très longues périodes géologiques et brusquement se transformer. L'évolution ne serait pas, selon eux, un mécanisme graduel mais au contraire une succession de crises plus ou moins rapprochées pendant lesquelles des changements majeurs auraient lieu, séparés par des périodes de relative stagnation. La biologie et la génétique du développement ont permis d'apporter de nombreux arguments en faveur de cette théorie. Par exemple, certains gènes déterminant l'identité des différentes parties de l'embryon, lorsqu'ils sont mutés, peuvent transformer un organe de l'adulte, le faire disparaître, lui donner une forme différente, en changer la nature. Une mutation dans le gène « *antennapedia* » de la drosophile fait pousser des pattes à la place des antennes... S'il est peu probable qu'une telle mutation puisse avoir un quelconque succès évolutif, elle illustre bien le fait que de grands changements morphologiques ne nécessitent pas obligatoirement l'accumulation de petits changements intermédiaires. Par ailleurs, l'addition ou au contraire la disparition d'une étape de développement, le déphasage dans la vitesse de développement des différentes lignées cellulaires (connu sous le terme d'hétérochronie) sont des phénomènes désormais fréquemment envisagés pour expliquer la transformation de certaines lignées évolutives ou certaines espèces.

### BILAN

Il est donc unanimement admis que les trois moteurs principaux de l'évolution sont (1) la variation à travers les mutations et leur combinaison augmentée par la reproduction sexuée (2) la sélection naturelle et la sélection sexuelle (3) le hasard, toutes choses contenues dans la théorie développée par Darwin.

Une vision strictement darwinienne prévoit que les changements se font par une succession de petits changements gouvernés par une alternance de phases de diversification et de sélection. Elle est contredite par deux observations principales :

- Au niveau moléculaire (ADN), la possibilité d'une intervention majeure des processus aléatoires (théorie neutraliste de Kimura),
- Au niveau macroscopique, la discontinuité du processus macroévolutif (Gould et la théorie punctualiste).

Si l'on doit retenir un enseignement particulier des connaissances actuelles sur les mécanismes de l'évolution biologique, c'est me semble-t-il, l'absence de prédétermination. Aucune analyse scientifique n'a jamais montré le contraire. François Jacob (prix Nobel de médecine 1965) a sans doute exprimé le mieux cet élément dans « le jeu des possibles » :

"L'évolution ne tire pas ses nouveautés du néant. Elle travaille sur ce qui existe déjà, soit qu'elle transforme un système ancien pour lui donner une fonction nouvelle, soit

qu'elle combine plusieurs systèmes pour en échafauder un autre plus complexe. [...]

La sélection naturelle opère à la manière non d'un ingénieur, mais d'un bricoleur ; un bricoleur qui ne sait pas encore ce qu'il va produire, mais récupère tout ce qui lui tombe sous la main, les objets les plus hétéroclites, bouts de ficelle, morceaux de bois [...] bref, un bricoleur qui profite de ce qu'il trouve autour de lui pour en tirer quelque objet utilisable.[...] Ces objets n'ont rien de commun si ce n'est qu'on peut en dire : "ça peut toujours servir." À quoi ? Ça dépend des circonstances."

### LE DARWINISME ET LA BIOLOGIE DU XXI<sup>ÈME</sup> SIÈCLE

Le biologiste du XXI<sup>ème</sup> siècle utilise au quotidien des concepts qui doivent beaucoup à Darwin, souvent sans s'en rendre compte.

Par exemple, que vaudrait le principe du modèle animal pour progresser dans la connaissance du fonctionnement du corps humain et dans les applications médicales si la parenté évolutive entre ces animaux et l'homme n'étaient pas établie ? Quel intérêt d'utiliser une souris plutôt qu'une grenouille si ce n'est parce que la souris et l'homme ont une parenté plus importante et partagent plus de caractères ?

Toute mutation qui a une action négative sur le déroulement d'un processus biologique va inévitablement être éliminée par la sélection. Celle-ci joue un rôle protecteur des fonctions essentielles. Ainsi, sur un gène, les parties qui sont les plus importantes pour son bon fonctionnement supportent moins que d'autres les changements aléatoires. Ce principe est utilisé au quotidien par les biologistes moléculaires pour, dans un génome, identifier les gènes et leurs séquences de régulation, dans les gènes les parties fonctionnelles pour les distinguer des parties structurales. Une fois de plus merci Monsieur Darwin...

Les épidémies de gripes (saisonniers, porcine, aviaires...) sont des processus « darwiniens » par excellence. On y retrouve la variation par mutation et par recombinaison tout aussi bien que la sélection lors de l'infection : (1) limitation des ressources pour le virus (nombre d'individus infectés limité), (2) avantage à la nouveauté puisque les formes nouvelles ne sont pas reconnues par les systèmes immunitaires (3) multiplication accélérée des formes les plus contagieuses. La conséquence en est la variation permanente des formes majoritaires de virus.

Le débat sur la préservation de la biodiversité est lui aussi indissociable des processus évolutifs. Celle-ci ne se limite pas à la diversité des espèces, elle est indissociable du polymorphisme de ces espèces (diversité intra-spécifique) et de la diversité des relations qui s'établissent entre elles (parasitisme, relation proie-prédateur, commensalisme...). Ce dernier point est essentiel car c'est ce qui détermine l'équilibre naturel en agissant comme force de sélection sur les organismes, en minimisant la prolifération, en maintenant les formes adaptées. Un écosystème entier est donc fragilisé à chaque fois qu'une espèce disparaît. Le débat sur les OGM s'est focalisé sur les effets possibles sur la santé alors que, sans doute possible, le plus grand danger est celui de l'action sur la biodiversité. Tout le monde comprendra que la « lutte pour la survie » entre une plante « normale » et une forme « OGM » résistante à un herbicide ou un parasite sera totalement déséquilibrée. Un gène modifié qui s'échappe d'une plante cultivée provoquera des catastrophes dans les espèces sauvages réceptrices. C'est ce qui est en train de se produire avec le colza en Amérique du sud...

Parfois, les principes de l'évolution élaborés par Darwin poussent les chercheurs à se poser les bonnes questions et ne pas se contenter des réponses évidentes. Un exemple intéressant est celui du « sexe ». En effet la grande majorité des espèces utilisent un mode de reproduction qui fait intervenir des gamètes mâles et des gamètes femelles qui vont fusionner pour donner ce que l'on appelle un zygote. Dans de nombreuses espèces ces gamètes sont produits par deux individus différents, autrement dit, la reproduction sexuée c'est se mettre à deux pour en faire un. La reproduction asexuée quant à elle est plus directe puisqu'il suffit d'un parent pour faire un descendant. Comment expliquer qu'un processus plus complexe, moins efficace, plus consommateur d'énergie (il faut entretenir des mâles dont on pourrait se passer dans une reproduction asexuée) est le mode de reproduction majoritaire dans le monde vivant ? L'explication la plus couramment donnée est que les caractères du descendant sont une combinaison de ceux des deux parents, ce qui augmente énormément la diversité possible d'une espèce. La diversité est bonne pour l'évolution, donc ce processus est sélectionné. Les choses sont bien sûr très loin d'être aussi simples. Comme nous l'avons vu précédemment, la cible de la sélection, c'est l'individu et ses compétences propres. Aucun ne porte seul la marque de la diversité génétique de la population dans laquelle il vit. La sélection ne peut donc favoriser un mode de reproduction sous prétexte qu'il augmente la diversité. Il faut trouver une autre explication et les chercheurs d'aujourd'hui s'y emploient.

La biologie a énormément progressé depuis 150 ans mais aucune révolution n'est venue bouleverser fondamentalement ses modes de pensées. Pire, certaines dérives sont constatées. L'une d'entre elle est celle introduite par la génétique et la biologie moléculaire. Par simplisme, par paresse ou par ignorance, on a tenté d'imprimer dans la connaissance collective le fait que les gènes ou leur support, l'ADN, contenait la totalité de l'information nécessaire à la construction et à la vie d'un organisme. Vous connaissez le gène, vous connaissez son rôle, vous pouvez prévoir ses effets. Tout prouve malheureusement que là encore les choses ne sont pas aussi simples. Le séquençage à tout va des génomes a ouvert plus de questions qu'il n'en a résolu. La proposition la plus originale pour contrecarrer cette vision est celle de

J-J Kupiec et P. Sonigo. Leur proposition est simple : appliquons le principe de variation-sélection à chaque niveau de complexité du vivant. Fini le prédéterminisme. Ainsi une protéine pourra interagir avec d'autres non pas parce que la séquence de son gène contenait cette information mais parce que cette interaction sera celle qui fonctionne le mieux parmi toutes celles possibles et essayées. Un niveau de complexité ne doit pas tout à celui qui le précède, chacun apporte une information, participe à la complexification. Avant Darwin, la vie devait tout à Dieu, depuis l'avènement de la génétique, elle devait tout aux gènes. Avec Kupiec et Sonigo il n'y a « ni Dieu ni gène » qui vaillent pour comprendre la vie. Alors l'idée géniale de Darwin, variabilité, sélection, pourrait-elle être à l'origine d'une nouvelle révolution de la biologie ?

#### LEXIQUE

\* *Allèle* : forme particulière d'un gène. Les allèles se différencient par une ou quelques différences de séquences (mutations) qui peuvent en changer la fonctionnalité.

#### DOCUMENTATION

- \* Charles Darwin, *L'origine des espèces* (1859) et *Voyage d'un naturaliste autour du monde* (1831-1836), livre de droit et téléchargeable gratuitement sur <http://www.livrespourtous.com>
  - \* Pierre-Henry Gouyon, Jean-Pierre Henry & Jacques Arnould : « Les avatars du gène », Editions Belin, collection Regard sur la science.
  - \* François Jacob (1981) « le jeu des possibles », Edition Livre de poche, collection Biblio Essais.
  - \* Stephen Jay Gould (1989) *La vie est belle : Les surprises de l'évolution*, Editions Seuil, collection Points Sciences.
  - \* Jean-Jacques Kupiec & Pierre Sonigo « ni Dieu ni gène », Edition Seuil, collection Points Sciences.
  - \* Denis Van Waerebeke (2009) « Espèces d'espèces » (DVD) : Edition Studio LCJ
  - Hannes Schuler & Katharina Von Flotow (2010) « Le grand voyage de Charles Darwin » (DVD) ; Editions Films du Paradoxe.
- Toutes les photos sont libres de droits et sont tombées dans le domaine public.

## ADASTA

### Adhésions et Abonnements

Adhésions à titre individuel ..... 30 €

Adhésions à titre collectif ..... 80 €

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

**Permanences** - elles sont assurées par les bénévoles :

lundi de 14h à 18h, mercredi de 9h à 12h et de 14h à 18h, vendredi de 9h à 12h

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

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

**Siège social - 10, rue de Bien-Assis - 63000 Clermont-Ferrand**

**Tél. 04 73 92 12 24 - E-mail : [adasta@wanadoo.fr](mailto:adasta@wanadoo.fr) - Site internet : [www.adasta.fr](http://www.adasta.fr)**

Dépôt légal Septembre 2010 - N° ISSN - 1166-5904

# LES PLANTES ET LE CALENDRIER RÉPUBLICAIN

QUE FONT LES PLANTES PENDANT LES MOIS QUI NE LES CÉLÈBRENT PAS ?



**MICHEL GENDRAUD**

Professeur honoraire de l'Université Blaise Pascal

Quand le poète Fabre d'Églantine présenta le Calendrier républicain à la Convention, il avait partagé l'année en douze mois, dédiés à la nature. Six d'entre eux, **Vendémiaire, Germinal, Floréal, Prairial, Messidor, Fructidor**, étaient voués à la végétation ou aux productions végétales, les six autres, **Brumaire, Frimaire, Nivôse, Pluviôse, Ventôse, Thermidor**, au climat.

Depuis ses origines, l'agriculture suit le rythme des saisons, sa phénologie (1) est calendrier. Les Égyptiens définissaient l'année comme « le temps nécessaire pour une récolte » et incluaient la crue du Nil pour la diviser en trois saisons, **inondation, germination, récoltes**. Après l'an mil, les bâtisseurs d'églises gravèrent ce calendrier dans la pierre. Ce furent les **Mois**. La Convention reprit ces traditions.

En cette fin de XVIII<sup>e</sup> siècle, il est probable que l'**agnelage** ou la **tonte** étaient des événements aussi saisonniers et heureux que les **moissons** ou les **vendanges**, pourtant, les six premiers mois ne portent que sur le végétal alors que parmi les six autres, les effets du climat sur le sol apparaissent dans leur explicitation.

Si, donnant un poids égal à ces deux volets, les Conventionnels et leur poète emplissent l'année entière, ce peut être parce que les relations **végétal-sol-climat** sont évidentes. Après tout, les productions animales dépendent entièrement du végétal et, de plus, peuvent être protégées du climat.

Les Conventionnels et leurs contemporains ne pouvaient guère analyser ces relations, des révolutions vertes étaient à venir, et la science venait juste de repérer les échanges gazeux de la photosynthèse. Il se passera plus d'un demi-siècle avant que la germination des graines ne soit décrite... **Alors, en ce début de XXI<sup>e</sup> siècle, que sait-on de ces relations ?**

## A PROPOS DES PLANTES TERRESTRES

Selon une phylogénie simplifiée (fig.2), toutes les plantes terrestres descendent d'un ancêtre commun déjà doté d'un embryon, elles sont toutes des Embryophytes. Les Bryophytes (Mousses) se séparent alors de l'ensemble, tandis que l'ancêtre commun aux Ptéridophytes (Fougères), Gymnospermes (Conifères) et Angiospermes (plantes à fleurs), par le système vasculaire qu'il a mis en place, fait de ses descendants des Trachéophytes. La graine est inventée par l'ancêtre commun aux Gymnospermes et aux Angiospermes qui, de ce fait, sont des Spermaphytes, cependant la graine des premières est nue, alors que celle des secondes est cachée dans l'ovaire qui donnera le fruit.

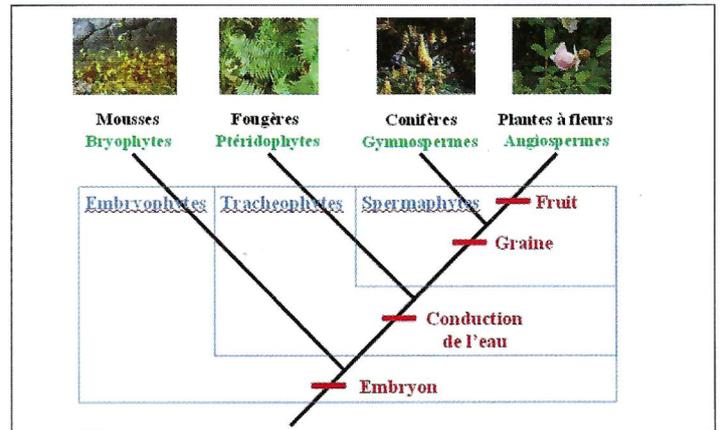


Fig. 2 : Phylogénie des plantes terrestres. Chaque bifurcation de l'arbre phylogénétique correspond à l'ancêtre commun aux plantes mentionnées aux extrémités des rameaux correspondants. Les traits rouges horizontaux indiquent l'acquisition d'une nouvelle propriété.

Au fil de leur évolution, les plantes terrestres placent l'oosphère, gamète femelle immobile, dans un archégone (2) de plus en plus protégé (fig.3) : nu chez les Bryophytes, enfoui à demi dans le prothalle chez les Ptéridophytes, enfoui entièrement dans l'ovule et miniaturisé chez les Gymnospermes, réduit à sa plus simple expression, enfoui dans l'ovule protégé par l'ovaire chez les Angiospermes.

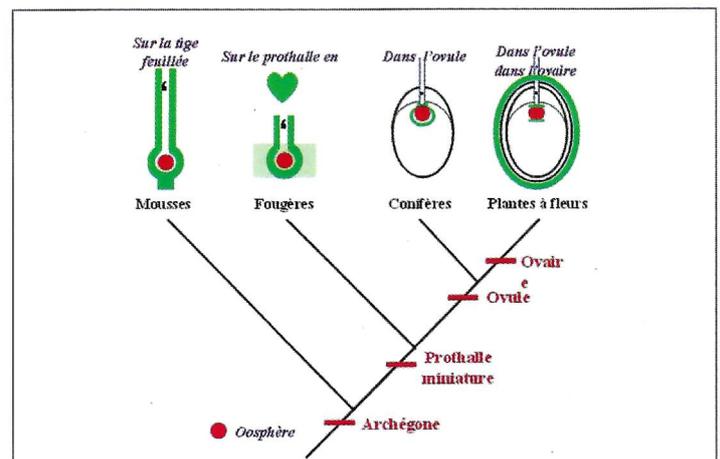


Fig. 3 : Evolution de la position de l'oosphère où naîtra, après fécondation, l'embryon des plantes terrestres. Les traits rouges horizontaux indiquent la mise en place de nouvelles formations destinées à protéger l'oosphère.

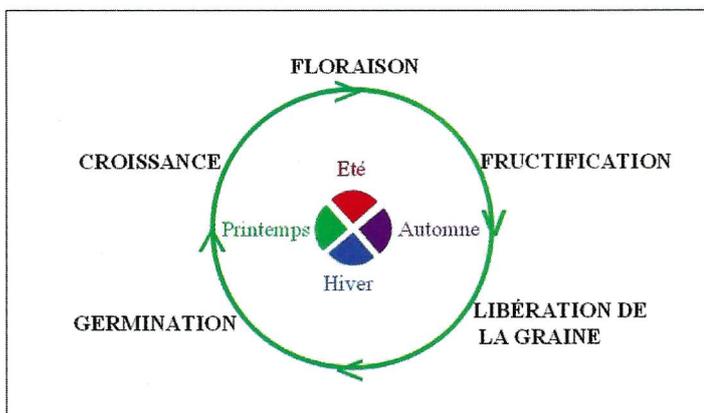


Fig. 1 : Cycle de la plante, de la graine à la graine, sous climat tempéré.

Pour les découvrir, le fil conducteur sera le cycle qui conduit la plante de la graine qui germe à la graine de la génération suivante, prête à germer (fig.1). Il dure moins d'un an pour les plantes annuelles, moins de deux ans pour les plantes bisannuelles, plus pour les plantes pérennes, qui ne meurent pas après une première production de graines. La **germination** sera suivie de la **croissance** qui se terminera (ou pas) par la **floraison**. Si la floraison est suivie de fécondation, viendront la **fructification** et la **libération de la graine**. Le climat, de l'instant ou des mois précédents, interviendra sur plusieurs des étapes de ce cycle.

C'est au point où se trouve l'oosphère que, après sa fécondation par l'anthérozoïde, gamète mâle mobile, s'édifiera l'embryon. Mais, là encore, le mode de locomotion de cet anthérozoïde change au fil de l'évolution ; nageur par des flagelles chez les Bryophytes et les Ptéridophytes, il est conduit par un tuyau, tube pollinique, comme un télégramme pneumatique, chez les Gymnospermes et les Angiospermes. Ainsi, la plante terrestre, organisme eucaryote photosynthétique pluricellulaire se développe à partir d'un embryon plus ou moins protégé par les tissus parentaux.



Fig. 4 : Qui possède des graines ? Le Hêtre est Angiosperme, le Séquoia est Gymnosperme et tous deux portent des graines. Le Ginkgo n'est ni l'un ni l'autre, et ne possède pas de graines au sens physiologique du terme car, contrairement aux précédents, son embryon et les réserves qui l'entourent ne subissent pas de dessiccation.

## LA GERMINATION

### 1. Sa définition.

Seule une graine peut germer. Forme déshydratée de dissémination de la plante, la graine est un embryon entouré de réserves et protégé par un ou deux téguments. Pour faire une graine, il faut réussir la difficile étape de la déshydratation de l'embryon et de ses réserves, étape franchie par les **Gymnospermes** et les **Angiospermes** et dans laquelle intervient l'acide abscissique (fig.5), gestionnaire du stress hydrique chez les plantes. La graine des premières ne possède qu'un tégument, celle des secondes en possède deux.

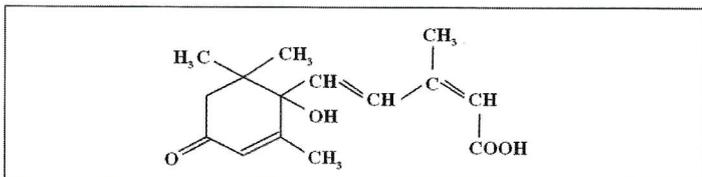


Fig. 5 : Formule de l'acide abscissique, dérivé du métabolisme des caroténoïdes, gestionnaire du stress hydrique chez les plantes.

Pour le spécialiste, la **germination** (fig.6) est la phase de remise en route des processus vitaux, suite à l'entrée d'eau, car, pour germer la graine doit se ré-imbiber ; cette phase prend fin avec le début de croissance de la radicule. Sous nos climats, l'eau vient en **Pluviôse**, **Ventôse** et **Germinal**. Pour l'homme de terrain, la germination englobe également le début de croissance de la jeune plante.

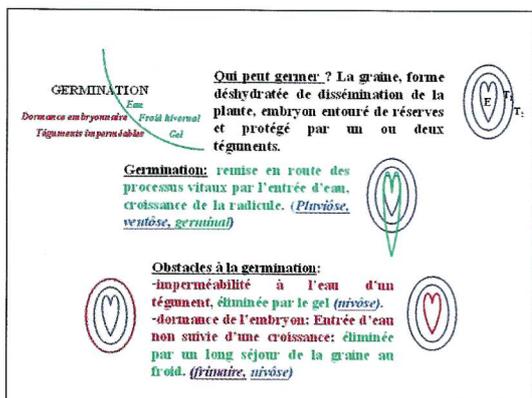


Fig. 6 : Germination type d'une graine d'Angiosperme. Les éléments favorables au processus sont notés en vert, les éléments défavorables en rouge.

### 2. Les obstacles à la germination.

Si les téguments externes sont **imperméables à l'eau**, son contact avec la graine (châtaigne, gland, faîne) ne suffit pas à déclencher la germination. La scarification élimine cet obstacle et le **gel** peut la provoquer, en **Nivôse**.

Parfois, l'**embryon** lui-même est inapte à mettre en route le processus qui le conduira à une croissance normale, il est **dormant**. Un pépin de Pommier, même débarrassé de ses téguments et correctement ré-imbibé ne peut germer correctement à l'automne : il verdra ses cotylédons, mais ne pourra lancer la croissance de sa radicule. Au printemps, après avoir subi le froid de l'hiver, il germera normalement. Les basses températures de **Frimaire** et **Nivôse** lèvent sa dormance. Beaucoup de Graminées sauvages ont des graines dormantes qui ainsi ne peuvent germer avant que la mauvaise saison ne soit accomplie. Pour les Graminées cultivées, blé, orge, seigle, avoine, l'Homme, dans sa sélection engagée dès le Néolithique n'a pas retenu ce caractère, aussi leurs semences ne sont-elles pas dormantes.

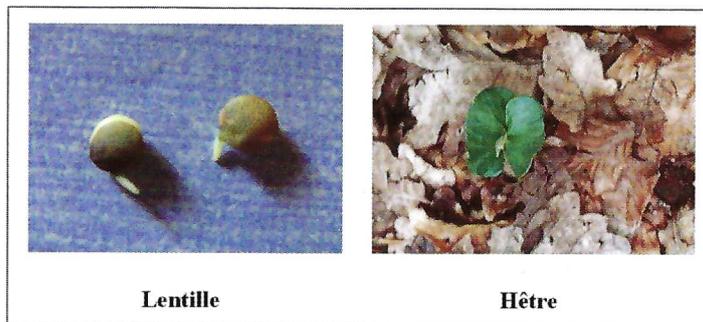


Fig. 7 : Germinations : la lentille, dont la radicule pointe, vient de finir sa germination, au sens des spécialistes. La « germination » du hêtre a dépassé ce stade depuis longtemps.

## LA CROISSANCE VEGETATIVE

### 1. Sa définition

La croissance est l'augmentation irréversible de la **longueur** de la tige ou de la racine, de la **surface** de la feuille, du **volume** d'un fruit ou d'un tubercule.

### 2. Ses modalités

La croissance de la tige fait naturellement suite à la germination et à la sortie de la radicule. Chez les plantes pérennes, arbres et plantes à tubercules, c'est par le « débourrement » d'un bourgeon de l'année précédente qu'elle se manifeste. La croissance suit une **courbe sigmoïde**, la vague de croissance. Dans la majorité des cas, cette vague est unique. Les plantes annuelles comme le pois la commencent à la fin de la germination et la terminent avant la floraison. Dans la nature, les arbres, en font une, comme le frêne ou parfois le hêtre, ou plusieurs, comme le chêne qui en réalise trois, en avril, juin et août (fig.8). En chambre climatique à 25°C J-L (jours longs), le chêne issu de germination engage une vague de croissance tous les 21 jours jusqu'à ce que le bourgeon terminal atteigne le plafond lumineux. Pourtant le chêne ne révèle pas là une horloge biologique, car ce rythme est sensible à la température.

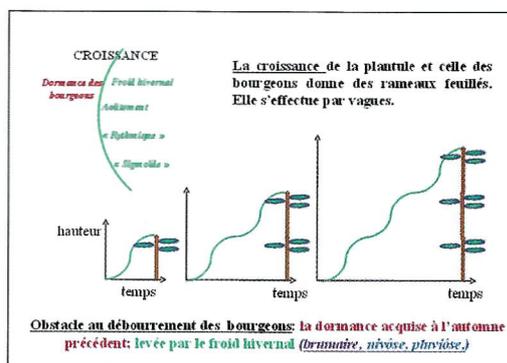


Fig. 8 : Exemple de vagues de croissance, cas du chêne. Les éléments favorables au processus sont notés en vert, les éléments défavorables en rouge.

### 3. Un obstacle à la croissance

Les bourgeons d'arbres et de tubercules, mis en place l'année précédente ont acquis à son automne une dormance qui s'oppose à leur débourrement immédiat. Le bourgeon est intrinsèquement incapable de débourrer. Cette dormance est levée par le froid de **Brumaire, Nivôse, Pluviôse et Ventôse**. L'important est la **durée du froid**, non son intensité, 16 semaines à 4°C pour le bourgeon de tubercule de topinambour, plus pour le bourgeon noir du rameau de frêne, champion de la profondeur de dormance, dernier à débourrer sous nos climats. Dans bien des cas, la durée du traitement par le froid provoque une **ouverture progressive de l'éventail des températures** auxquelles le débourrement du bourgeon est possible. Cette notion est due à **Vegis**, chercheur scandinave, qui la mit en évidence dès 1964 sur des turions d'**utriculaires**, plante carnivore des zones tourbeuses.

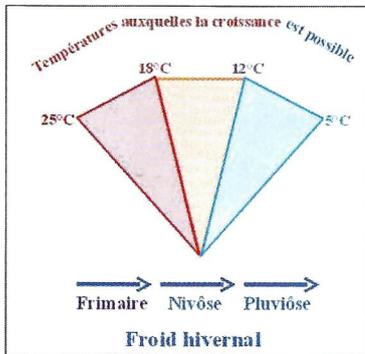


Fig. 9 : Ouverture par le froid de l'éventail des températures de croissance. Seulement possible à 25°C au début de Frimaire, la croissance est possible de 18 à 25°C à la fin de ce mois, de 12 à 25°C à la fin de Nivôse, et de 5 à 25°C à la fin de Pluviôse.

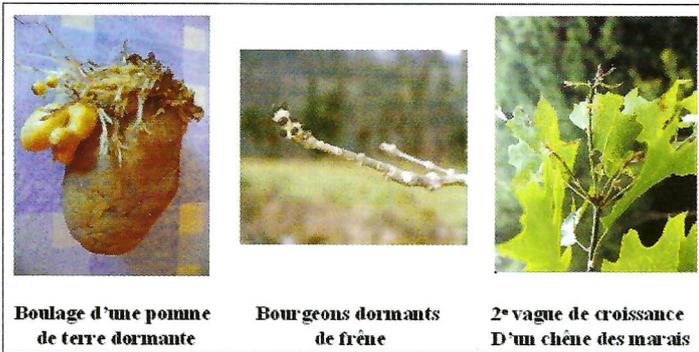


Fig. 10 : Exemples de manifestations de dormance et de croissance.

### 4. La fin de croissance des rameaux de ligneux, l'aouïtement, en Thermidor.

Leur croissance étant terminée, les rameaux des arbres et des buissons se lignifient, utilisant matière et énergie

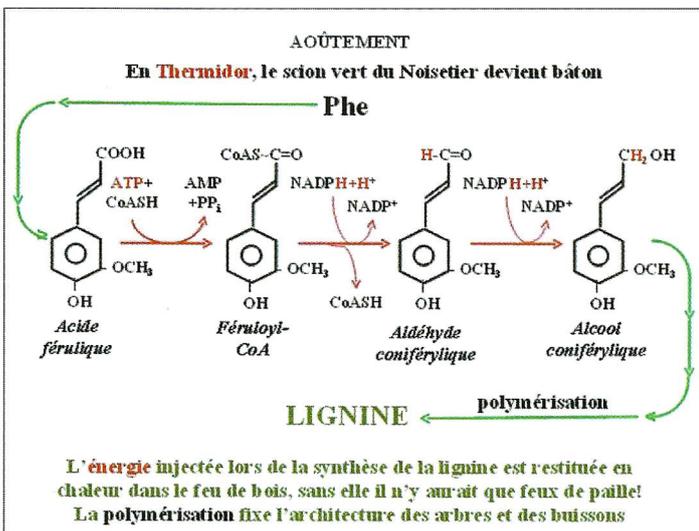


Fig. 11 : De la phénylalanine à la lignine, en suivant le chemin le plus fréquent, celui de l'alcool conférylique. L'injection d'énergie est notée en rouge. (Phe, phénylalanine ; ATP, adénosine tri-phosphate ; AMP, adénosine mono-phosphate ; PP<sub>i</sub>, pyrophosphate ; CoASH, coenzyme A ; NADP, nicotinamide adénine dinucléotide phosphate).

venues des feuilles pour consolider les nouvelles structures mises en place, et les pérenniser. La lignine caractérise le bois. Arbres et buissons sont des ligneux. La lignine est un polymère de 3 alcools fabriqués par la plante. La polymérisation engendre cette sorte de résine qui fixe l'architecture de l'arbre et qui fait le bois, ce matériau tant utilisé par l'Homme. A l'origine est un acide aminé, la phénylalanine, désaminé en un acide en C<sub>6</sub>-C<sub>3</sub>. Des hydroxylations, suivies ou non de méthylations, conduisent à trois acides qui seront réduits en alcools. Cette réduction, qui conduit aux alcools coumarylique, conférylique et syringylique, monomères de la lignine, demande à la plante d'injecter dans le processus beaucoup d'énergie (fig. 11).

### LA FLORAISON ET LA MONTAISON

La floraison est précédée, chez les plantes en rosette, de la montaison qui éloigne les fleurs du sol afin que le pollen puisse être pris par le vent ou les insectes. Elles relèvent toutes deux du même processus et ne peuvent être mises en route que passées certaines étapes (fig. 12).

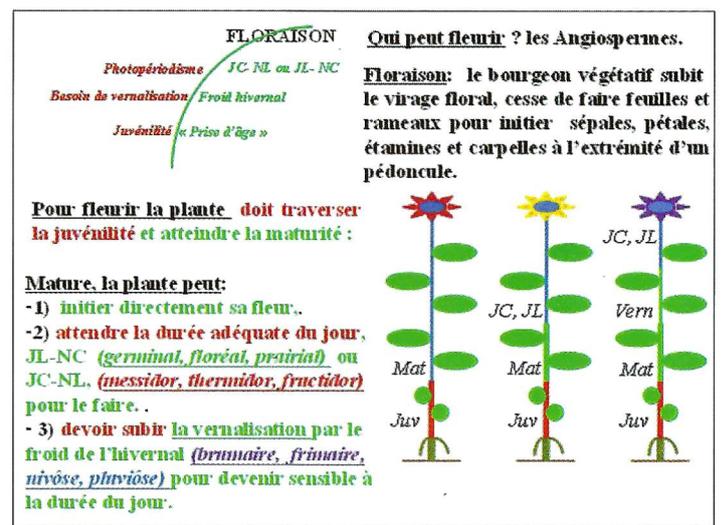


Fig. 12 : Les étapes qui conduisent à la floraison. (Juv., phase juvénile avec des feuilles juvéniles ; Mat., phase mature ; JC, JL, jours courts, jours longs ; Vern., vernalisation).

#### 1. Etape de la juvenilité, acquisition de la maturité.

La jeune plante issue de germination est juvénile et ne peut édifier de fleur aussi longtemps qu'elle ne devient pas mature. L'acquisition de la maturité se fait par la prise d'âge qui peut durer de quelques heures, pour le blé, à un demi-siècle pour le chêne ou le hêtre. Juvénilité et maturité se manifestent par des caractères particuliers. Le lierre juvénile a des feuilles découpées, alors que les feuilles matures sont entières (fig. 15). Le hêtre juvénile conserve ses feuilles mortes pendant tout l'hiver. Le séquoia mature ne se bouture plus.

#### 2. Les conditions de la floraison

Mature, la plante peut effectuer son virage floral, soit **directement**, comme la tomate et le pois, soit **après d'autres étapes** (fig. 12). L'épinard et le blé de printemps attendent les JL-NC (jours longs-nuits courtes) de **Germinal, Floral et Prairial** pour lancer le processus, alors que le chrysanthème ne le fait que par les JC-NL (jours courts- nuits longues) de **Messidor, Thermidor et Fructidor**. Ces plantes sont sensibles à la **photopériode**. Les plantes bisannuelles (blé d'hiver, carotte, betterave), et certaines pérennes (olivier), devront passer par le froid de **Brumaire, Frimaire, Nivôse et Pluviôse** pour devenir sensibles à la longueur des jours et des nuits. Elles devront être **vernalisées**. Enfin, certains ligneux qui fleurissent au printemps, comme le pêcher ou le noisetier, effectuent leur virage floral à l'été précédent et leurs bourgeons floraux traversent l'hiver en croissant, dès que la température est positive. Une température trop élevée provoquerait leur nécrose.

### 3. Photopériodisme et phytochrome.

La découverte du photopériodisme et de son photorécepteur, le phytochrome, est une belle page de la Physiologie végétale. Elle est due à deux chercheurs américains, Borthwick et Hendricks, dans les années 1950. La clé se trouve dans les effets de l'interruption des NL par un éclair lumineux. Dans le cas d'une plante de JC, l'opération empêche la plante de fleurir et, dans le cas d'une plante de JL, elle provoque sa floraison (fig. 13). La longueur d'onde active est de 660 nm (« rouge clair ») à raison d'une vingtaine de J.m<sup>-2</sup>. L'effet du « rouge clair » est supprimé par un éclair « rouge sombre » de 730 nm d'une intensité trente fois supérieure. D'où l'idée que le photorécepteur responsable existe dans la feuille sous deux formes. Nommé **phytochrome**, sa forme  $P_{660}$  inactive absorbe le « rouge clair » et se transforme en  $P_{730}$  actif, qui peut redonner  $P_{660}$  par absorption de « rouge sombre » (fig. 13). Dans la lumière blanche, qui contient les deux radiations, l'effet « rouge clair » est prépondérant, en raison du peu d'énergie demandé.

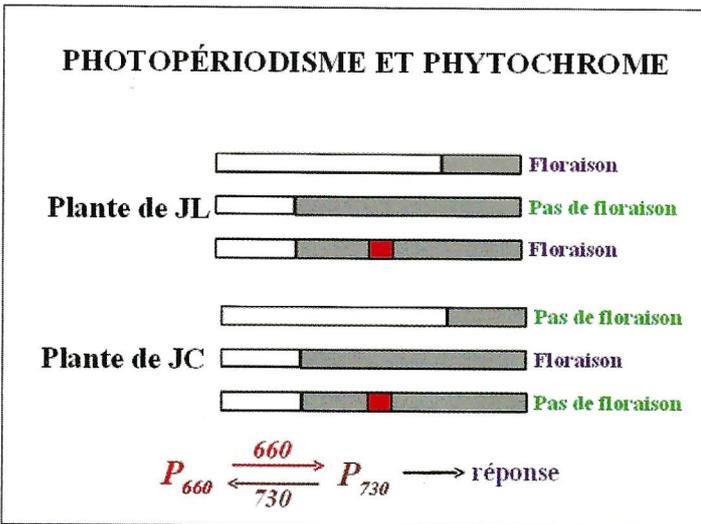


Fig. 13 : Effet de l'interruption de la nuit longue par un éclair lumineux sur la floraison de plantes de jours longs (JL) ou de jours courts (JC). Transformations entre les deux formes du phytochrome ( $P_{660}$  et  $P_{730}$ ) par le « rouge clair » (660nm) ou le « rouge sombre » (730nm).

Ce n'est que bien plus tard que le phytochrome a été isolé car il est extrêmement difficile à repérer en extrait acellulaire. C'est une chromoprotéine, dont on connaît maintenant le gène, active par sa part protéique et photoréceptrice par son groupement tétrapyrrolique (fig. 14).

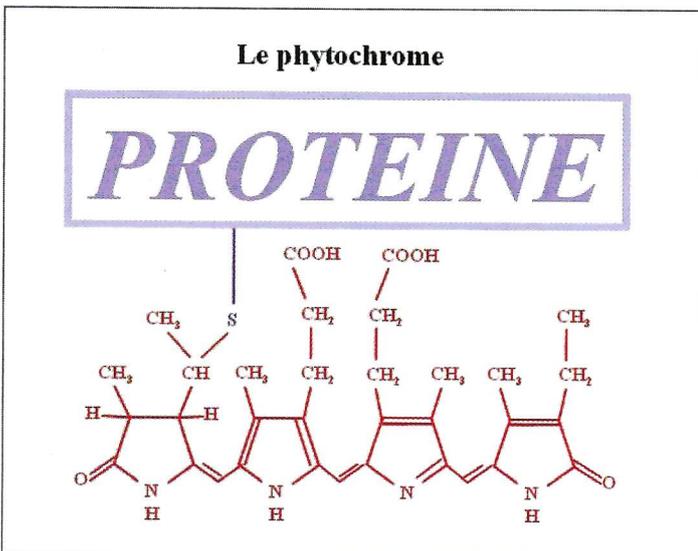


Fig. 14 : Groupement prosthétique tétrapyrrolique du phytochrome et son ancrage sur la protéine par l'intermédiaire d'une cystéine.

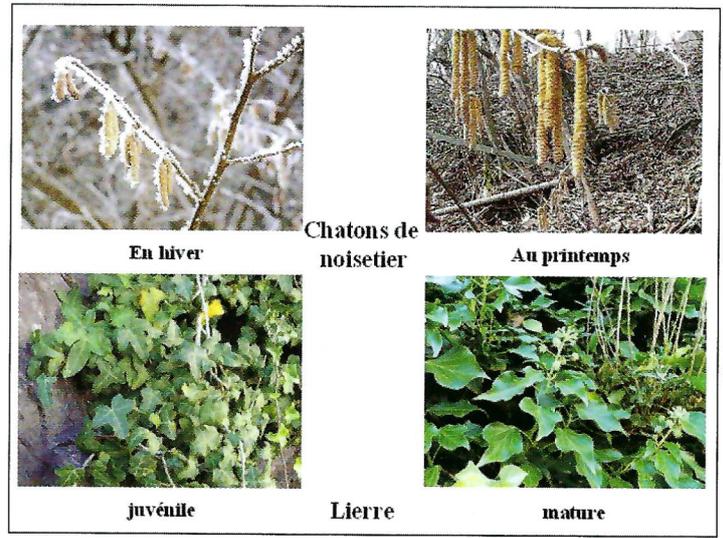


Fig. 15 : Les chatons de Noisetier, inflorescence mâle, apparaissent au mois d'août, passent le givre hivernal et sont fonctionnels au printemps. Les feuilles du Lierre juvénile sont découpées contrairement à celles du Lierre mature, porteur de fleurs.

### 4. Que nous apprend l'Arabette des Dames ?

L'Arabette des Dames est une Crucifère, comme le Colza, mais minuscule. Au laboratoire le cycle de cette plante est de 30 jours, de la graine à la graine. Son génome est très simple et ces deux propriétés lui ont valu de devenir un modèle pour le végétal équivalent à ce que représente la Drosophile pour l'animal. Chez l'Arabette, l'enchaînement des faits moléculaires qui vont du signal externe de floraison jusqu'à la mise en place des pièces florales est bien décrit. La rosette des Arabettes du nord de l'Europe a besoin de froid pour monter à fleur alors que celle des îles du Cap-Vert n'a pas besoin de ce traitement. C'est en étudiant les différences entre ces souches qu'a été mis en évidence le gène **FLC** (**Flowering Locus C**). La protéine codée par ce gène bloque la transcription des gènes de la floraison. Sa teneur diminue avec le froid, rendant ainsi possible la floraison (fig. 16). Par la suite, d'autres gènes, **VIN 3** (**Vernalization Insensitive 3**), **VRN 2 et 3** (**Vernalization Response 2 et 3**), ont été identifiés, qui s'expriment sous l'effet du froid et sont à l'origine de la diminution de la protéine FLC.

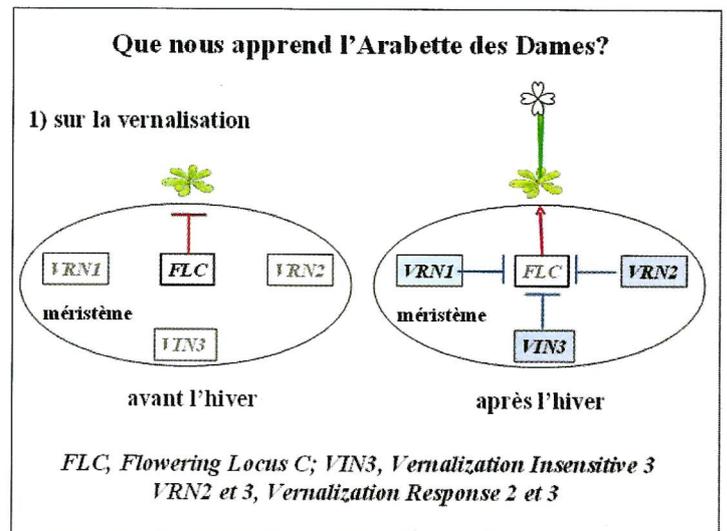


Fig. 16 : Contrôle par le froid de l'aptitude à fleurir chez l'Arabette des Dames. Les traits barrés indiquent un effet inhibiteur, la flèche un effet stimulateur.

Toujours chez l'Arabette, des données moléculaires ont été obtenues concernant le photopériodisme, car elle fleurit plus vite en JL. Le gène de sensibilité à la longueur de jour, **CO** (**Constans**), a été identifié. Dans la feuille, il est transcrit en un ARN messager lui-même traduit en la protéine **CO** qui stimule la floraison. Or, la concentration de l'ARNm varie selon un rythme circadien, élevée la nuit, faible le jour et la protéine **CO** est stabilisée par la lumière et dégradée à

l'obscurité. Pour que cette protéine puisse se trouver en concentration suffisante pour stimuler la floraison, il faut de la lumière en même temps qu'une forte concentration en ARNm, ce qui ne peut se produire qu'en régime de JL (fig. 17). Dans ces conditions, la protéine **CO**, en concentration suffisante, stimule la synthèse de la protéine **FT** (du gène **Flowering locus T**) qui quitte la feuille pour gagner le méristème au cœur de la rosette. Arrivée là, **FT** se fixe à un facteur de transcription, **FD** (du gène **Flowering locus D**) déclenchant ainsi la transcription des gènes qui conduiront à l'édification du bouton floral et de la fleur.

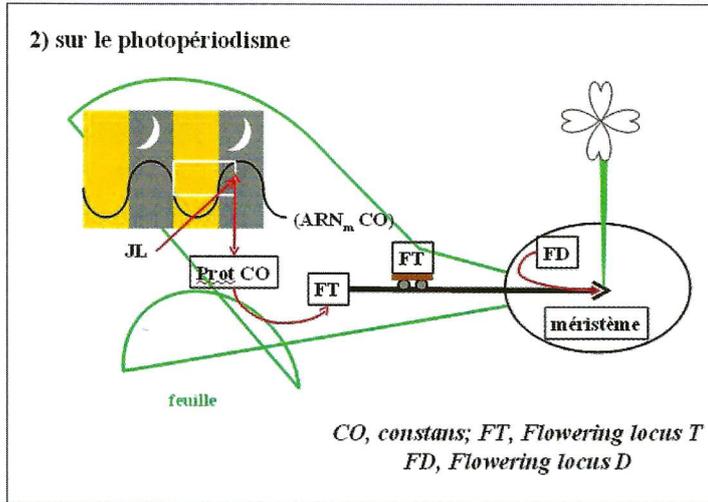


Fig. 17 : Aspect moléculaire du photopériodisme chez l'Arabette des Dames. Dans la feuille, le seul moment où peut s'accumuler la protéine CO est la fin d'un jour long. Cette protéine sera relayée par FT qui s'associe à FD stimulant la floraison.

La transformation du bourgeon végétatif en bouton floral commence par l'intervention du gène **LEAFY (FEUILLU)** car, en son absence la plante ne fait que des feuilles. **LEAFY** impose de remplacer la spirale des feuilles par le verticille pour que s'expriment les nouvelles productions. Alors, et alors seulement, les « confréries » de gènes homéotiques, ceux qui dirigent les gènes de morphogenèse, peuvent entrer en action. Ces « confréries » sont comme **A**, **B** et **C** (fig. 18 et 19). Les **A** seuls installent les **sépales** et les **C** seuls les **carpelles**. Les **B** s'associent aux premiers pour les **pétales** et aux seconds pour les **étamines**. Si l'une de ces confréries vient à manquer, malgré **LEAFY**, la fleur sera anormale. C'est par l'étude de ces fleurs anormales qu'ont été découverts **A**, **B** et **C**.

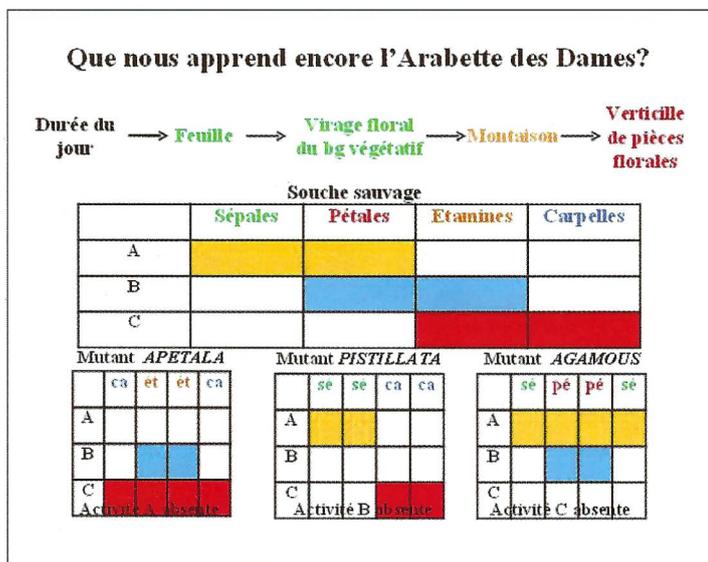


Fig. 18 : Mise en place des pièces florales par les groupes de gènes homéotiques **A**, **B** et **C**. Les mutants ayant perdu un de ces groupes de gènes ont des fleurs anormales. Dans tous les cas les **B** n'agissent que sur les deux verticilles intermédiaires. Si les **A** viennent à manquer, les **C** agissent sur tout l'espace disponible et réciproquement.

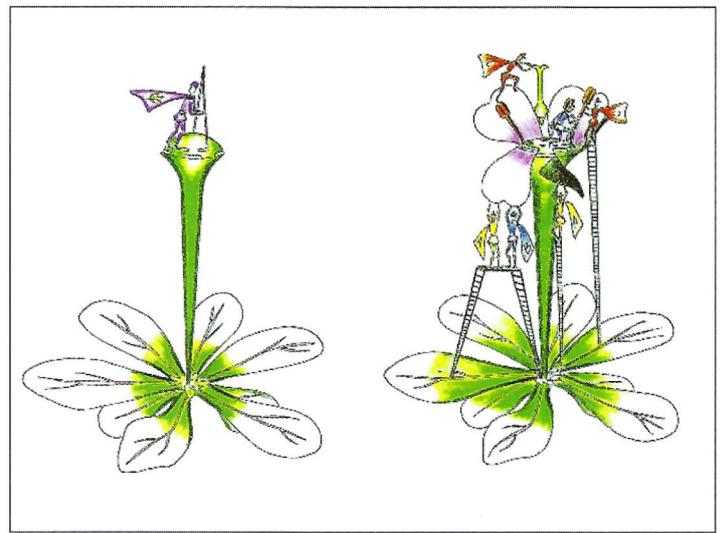


Fig. 19 : Rôles respectifs du gène **LEAFY**, traçant des verticilles et des « confréries » de gènes homéotiques installant les pièces florales : les **A** pour les **sépales**, les **C** pour les **carpelles**, tandis que les **B** aident les premiers pour les **pétales** et les seconds pour les **étamines**. (vue d'artiste originale, M. Gendraud).

## LA FRUCTIFICATION ET LA LIBÉRATION DES GRAINES

### 1. Qui peut fructifier ?

Seulement les Angiospermes, dont les ovules ont été fécondés par le pollen, souvent en **Floréal** et **Messidor**, peuvent fructifier. Le pollen est transporté par le vent, les insectes, par l'homme, mais il existe des obstacles à la fécondation (fig. 20).

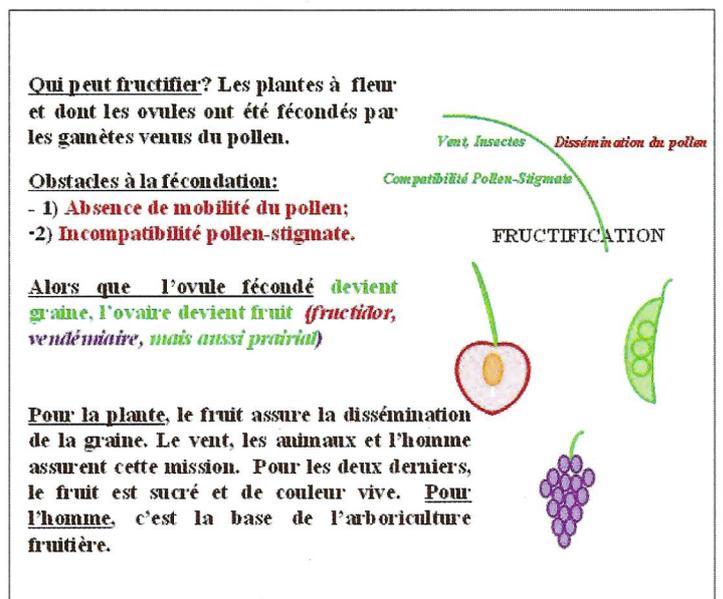


Fig.20 : Fructification et exemples de fruits. drupe, gousse, grappe de baies.

### 2. Les fruits, leur origine, leur destinée.

Le fruit provient de la transformation de l'ovaire après que l'ovule ait été fécondé. Cela se produit majoritairement entre **floréal** et **fructidor**. Le fruit nourrit la graine au cours de son élaboration et la protège. **A terme**, le fruit **déhiscent**, comme la gousse ou la silique, s'ouvre pour libérer la graine. **Indéhiscent** et **sec**, il vole avec le vent. **Indéhiscent** et **charnu**, il accumule **sucres** et **couleurs** pour attirer les animaux et l'homme, comme les drupes, baies et autres fruits rouges. S'il n'est pas ingéré par un animal, le fruit charnu **bletit**, s'autolyse par une pectinase, et libère de fait ses graines.

La libération de la graine se fait:

- 1) par déhiscence, lorsque le fruit sec s'ouvre en l'éjectant (cas des gousses de Genêt qui claquent au soleil de thermidor)
- 2) suite au bletissement du fruit qui, en s'autolysant laisse apparaître les graines à l'extérieur
- 3) par le vent

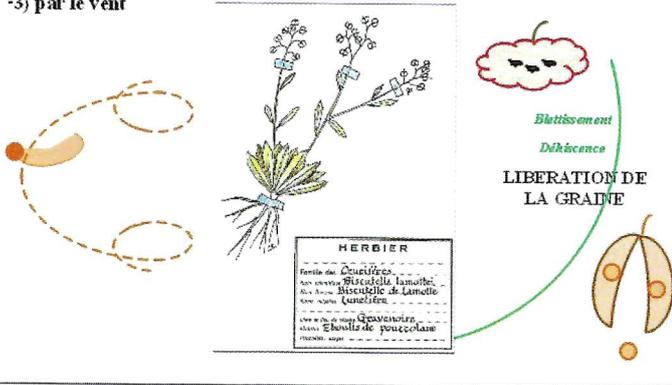


Fig. 21 : Envol de la samare, déhiscence de la gousse, bletissement de la baie. Sur la feuille d'herbier, la Lunetière ou Biscutelle de Lamotte, endémique de Gravenoire, dont la silicule mime de minuscules lunettes.



Caryopses de graminées

Akènes de pissenlit



Gousses de pois



Baies de sorbier

Fig. 22 : Exemples de fruits communément rencontrés.

## POUR RECAPITULER

Que font les plantes pendant les mois qui ne les célèbrent pas ?

A la chaleur et aux jours raccourcissant de Thermidor, l'arbre et le buisson consolident leurs rameaux de l'année. Au froid de l'hiver, graines, bourgeons, tubercules et turions acquièrent l'aptitude à germer ou à débourrer. Au froid de l'hiver, plantes bisannuelles et pérennes acquièrent l'aptitude à fleurir par la vernalisation.

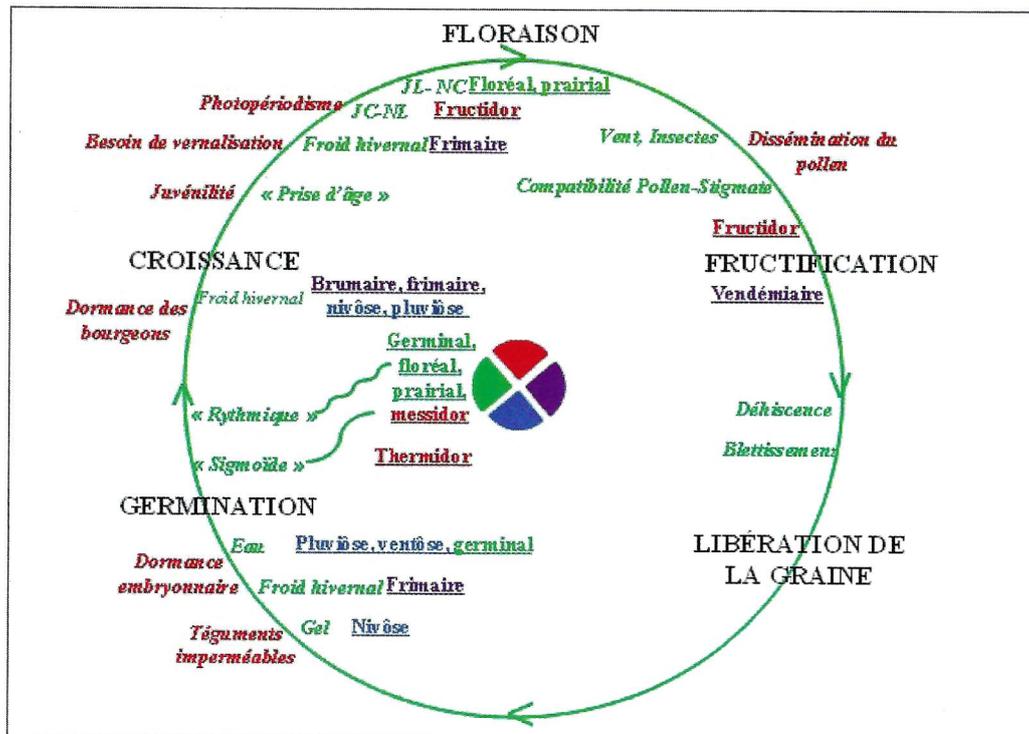


Fig. 23 : Pendant les mois qui ne les célèbrent pas, les plantes consolident leurs acquis et préparent leurs manifestations pour les mois qui les célèbreront.

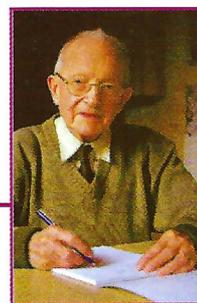
(1) **Phénologie**: étude de l'apparition d'évènements périodiques dans le monde vivant, déterminés par les variations saisonnières (donc annuelles) du climat. Exemples non exhaustifs: débourrement des bourgeons au printemps; retour des hirondelles, changement automnal de la couleur des feuilles, et pour l'agriculteur, fenaisons, moissons, vendanges, labours. De ces évidences, l'Homme fait un calendrier.

(2) **Archégone**: structure pluricellulaire dans laquelle se différencie une seule oosphère. Bien caractérisé chez les mousses, l'archégone, constitué d'un col (goulot) et d'un ventre, a l'allure d'une petite bouteille. La structure se miniaturise et se simplifie en allant des ptéridophytes aux gymnospermes et aux angiospermes.



# PEUT-ON PARLER D'ESTHÉTIQUE DE LA SCIENCE ?

RÉFLEXIONS SUR « LA BEAUTÉ DE LA SCIENCE »



**LOUIS AVAN**  
Professeur honoraire du CNAM (Conservatoire National des Arts et Métiers de Paris),  
Membre actif de l'ADASTA

Deux articles au moins du présent numéro d'Auvergne-Sciences - « Imagerie du Ciel étoilé » (atelier de découverte des merveilles célestes) par Michel Naranjo et « Outils pour le pavage des surfaces » de Jean-Marie Favreau - nous paraissent évoquer de façon originale la « Beauté de la Science » et les exigences méthodologiques et même éthiques qu'elle impose, jusque dans les outils mis en oeuvre. « La Nature, qui nous surpasse infiniment, est d'abord une grande force dans laquelle on peut se perdre, mais c'est surtout un merveilleux professeur », écrivait le grand musicien Olivier Messiaen, tandis que Jean Jaurès, dans son « Introduction à l'Histoire socialiste » évoque « ce contact de l'Univers qui fait vibrer en l'âme humaine des forces mystérieuses et profondes, forces de l'éternelle vie mouvante qui précéda les sociétés humaines et les dépassera ».

**Mais qu'est-ce que la Beauté ?** Léon Battista Alberti (1402-1472), poète, architecte, musicien, philosophe, peintre et sculpteur italien, auteur des premiers traités d'esthétique moderne, nous livre ainsi dans le « De Re Aedificatoria » (1452) le fond de son esthétique avec cette définition négative de la beauté comme « harmonie »: « la beauté est une certaine convenance raisonnable gardée en toutes les parties pour l'effet à quoi on veut les appliquer, **si bien que l'on n'y saurait rien ajouter, diminuer ou changer**, sans faire étonnamment tort à l'ouvrage ». Plus brièvement, Emmanuel Kant (1724-1804), dans « Critique du Jugement », définit ainsi 'le Beau' « comme ce qui plaît universellement et sans concept ». Le Beau implique, selon lui, l'unité de nos facultés représentatives (sensibilité, imagination, entendement).

Or dans presque toutes les traditions culturelles, poétiques, **l'expérience de la beauté est transférée** sur ce qui, **par nature**, se présente comme beau à la **perception humaine** : qu'il s'agisse du ciel étoilé, de phénomènes naturels impressionnants, de la structure pleine de beauté d'un cristal ou d'un organisme vivant (le cerveau !), de la diversité bigarrée des animaux et des plantes. Le monde qui retient l'attention des chercheurs est ainsi perçu comme un « Cosmos » - le mot grec « cosmos » ne désignant pas seulement l'ordonnance sûre de ce monde d'exploration, mais également la beauté de sa forme (d'où le mot cosmétique). L'amas galactique de Virgo est un Cosmos. Le Cerveau humain est un autre Cosmos.

Pythagore considérait le ciel tout entier comme une gamme musicale.

Pour Galilée « l'Univers - tout 'Cosmos'- est écrit en langue mathématique ».

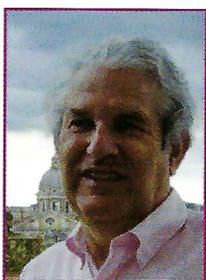
L'émotion profonde de l'astronome amateur, évoquée par Michel Naranjo, n'était-elle pas celle de Johannes Kepler (1571-1630), fasciné par les multiples relations

harmonieuses caractéristiques des mouvements planétaires. Ses écrits sont remplis de spéculations intrigantes sur la « musique céleste » émise par Vénus, Mars, Jupiter tout au long de leurs orbites... Rêveries ?! Imagination débridée ?! Mais qui conduisirent Kepler « aux 3 lois », dont la troisième, dite « harmonique » reliait le carré de la période orbitale ( $P^2$ ) au cube du demi-grand axe ( $a^3$ ) de la trajectoire. Comment ne pas souligner ici la **recherche d'unité** qui se trouve **dans la traduction en langage mathématique** de tout donné expérimental... C'est ainsi qu'à partir des lois de Kepler, Newton aboutit à la « splendide loi de Gravitation universelle » ! Et comment oublier, au long des siècles, la masse des travaux scientifiques de Galilée ... Herschel, Laplace, Hubble, Einstein ... et les exploits technologiques auxquels nous devons d'avoir accès à l'amas galactique de la Vierge aussi bien qu'aux plus lointains quasars et au rayonnement fossile à 2,7 kelvins.

Toujours, en mathématiques, pour souligner l'originalité et les fondements du travail de Jean-Marie Favreau sur le pavage des surfaces : l'auteur insiste à juste titre sur l'importance des « transformations conformes » issues de la magnifique théorie des fonctions d'une variable complexe introduite par le mathématicien français Augustin Cauchy (1789-1857), lequel fonda une véritable analyse mathématique douée d'une rigueur inconnue jusque là. La conservation des angles dans les transformations de la forme  $Z = (az+b)/(cz+d)$  trouve ses applications aussi bien dans les cartes géographiques en projection de Mercator que dans la topologie cérébrale (notion de M-pavage et de M-tuiles) introduite par Jean-Marie Favreau, avec les perspectives d'applications médicales qu'il projette.

Louis de Broglie affirmait que le sentiment esthétique sert souvent de guide dans l'élaboration des théories. Paul Dirac s'appuyait sur le manque d'élégance, d'harmonie d'une théorie pour mettre en doute sa validité : le « doute méthodique » le conduisit à la fondation d'une mécanique quantique relativiste, laquelle déboucha sur la prévision de l'existence du positon, contre-partie positive de l'électron atomique, avant même sa découverte expérimentale en 1931.

Sans être concernés par ce dernier problème, les articles de Michel Naranjo et Jean-Marie Favreau nous sensibilisent à la beauté et à l'exigence scientifique auxquels doivent répondre les outils d'exploration des merveilles du « Cosmos », objet de leur passionnante quête. Et il me semble - critère d'Alberti - que l'on ne saurait rien « ajouter, diminuer ou changer à leur ouvrage », sauf en souhaiter la poursuite !



Par **MICHEL NARANJO**  
*Animateur ADASTA/ASTRAP*

# IMAGERIE DU CIEL ÉTOILÉ

ATELIER DE DÉCOUVERTE DES MERVEILLES CÉLESTES

La vision du ciel étoilé par une nuit sans lune et loin des lumières humaines, puis la reconnaissance des belles constellations, nous comblent d'une émotion profonde. Les astres dont on admire les superbes photographies prises par les plus puissants télescopes, ne sont pas si inaccessibles que cela ! Une paire de jumelles permet une plongée dans l'espace et des dizaines d'astres, invisibles jusque là, se découvrent à vos yeux. Ce sont d'abord des amas d'étoiles, des nébulosités plus intenses dont les formes deviennent plus distinctes et on franchit le premier pas : celui qui permet de devenir un astronome amateur. Mais que dire de la vision du ciel à travers un télescope ou une lunette ! Que préférer ? La royauté silencieuse de notre proche Saturne, ou l'émotion d'englober d'un seul regard une des galaxies du bout du monde, avec ses centaines de milliards d'étoiles ? Peut-être l'émotion esthétique devant une nébuleuse radieuse, comme celle d'Orion, où sur des fonds verts indéfinissables, qui rappellent les aquarelles de Gustave Moreau, scintillent les étoiles du Trapèze, en joyaux de lumière inondés d'arc-en-ciel. L'imagerie du ciel profond permet d'accumuler bien plus de lumière que l'œil ne peut le faire et met en évidence des détails invisibles.

Une collaboration ASTRAP/ADASTA est née en 2009, lors de l'Année mondiale de l'Astronomie de l'UNESCO : AMA 2009 qui a permis de rapprocher l'expérience en astronomie de l'ASTRAP avec le savoir faire en traitement d'images et vision artificielle de l'ADASTA étayé par les relations privilégiées avec le LASMEA de l'Université Blaise Pascal. La Direction Régionale de la Recherche et Technologie en Auvergne a encouragé cette collaboration par une subvention pour l'achat d'une lunette apochromatique spécialisée dans l'acquisition de photos et permettant de créer ainsi un atelier « imagerie du ciel étoilé » ouvert à tout public.



Fig. 1 : La lunette

Le choix de la lunette s'est porté sur la FSQ-85ED de Takahashi (fig. 1). Elle s'inscrit dans la catégorie des instruments de rêve, avec pour ambassadeurs les meilleurs amateurs du monde. L'instrument est couplé à une monture équatoriale EM 200 équipée d'un système de pointage automatique « Go-To ». La précision est très élevée car les objets tombent à coup sûr au centre du capteur : un atout de poids pour la photo d'objets invisibles à l'œil nu ! L'optique « grand champ » donne des images extrêmement fines. Lors d'une campagne de saisie d'images, l'installation de la lunette et son réglage sont facilement accessibles aux animateurs d'une équipe d'astronomie en une demi-heure ! Puis collectons dans l'ordinateur une dizaine de séquences de cinq minutes séparées de 10 secondes. Les photos brutes sont déjà d'une excellente qualité et aptes à un traitement, par les logiciels adéquats assez classiques. On peut alors éditer des images avec un très grand nombre de détails qui seraient invisibles à l'œil nu.

## CARACTÉRISTIQUES OPTIQUES DE LA FSQ-85ED DE TAKAHASHI (TABL. 1) :

Diamètre utile	85mm
Focale	450mm
Ouverture relative	F/D 5,3
Pouvoir séparateur	1,5"
Magnitude limite	11,6
Clarté	178x
Cercle image	44mm
Champ photo	5,6°
Back focus	197,5mm

Tabl. 1 : La lunette

**Note sur le chromatisme :** Une même lentille ne fait pas converger au même point chaque longueur d'onde en provenance d'un astre ; si la différence de focale est trop importante, les images sont entachées de reflets irisés qui nuisent à sa bonne lecture. Par des objectifs à deux, trois ou quatre lentilles, les fabricants arrivent à atténuer le chromatisme.

Plus l'objectif est complexe, mieux il corrige cette aberration...et plus la lunette est chère !

Une lunette achromatique à deux lentilles fait converger le rouge et le bleu au même point focal. La FSQ-85ED de Takahashi est une formule « super achromat » de type quadruplet Petzval à verre ED (Extra low Dispersion c'est-à-dire à très faible indice de dispersion). Elle associe deux doublets, l'un faisant office d'objectif et l'autre de correcteur placé au foyer.

## POINTER LA LUNETTE EN UN POINT DU CIEL

Les technologies actuelles rendent l'observation très aisée : il faut savoir lire une carte du ciel et pouvoir repérer les principales constellations.

Pour la première connaissance, on fait confiance au site Astrosurf, qui est le portail des astronomes amateurs francophones, en téléchargeant « Astro-PC ».

La deuxième connaissance s'acquiert rapidement, le nez en l'air, la nuit dans une région dégagée où la pollution lumineuse est négligeable. Le système « Go-To », permet aussi le guidage automatique, c'est-à-dire qu'un petit automatisme permet de compenser la rotation de la terre.

A la mise en station on doit aligner, grâce au chercheur, l'axe de déclinaison sur le pôle nord céleste en pointant sur l'étoile polaire. Celle-ci n'étant pas très lumineuse, une des premières choses qu'on apprend est de la repérer à partir de la constellation de La Grande Ourse :

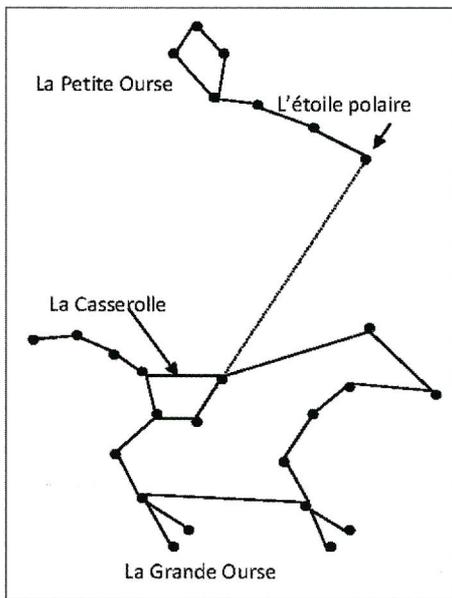


Fig. 2 : Grande et Petite Ourse

**Règle (fig.2) :**  
 On repère La Casserolle (!) puis partant du bord extérieur de La Casserolle, on trace mentalement une droite, l'étoile polaire se situant à une distance de cinq fois la longueur de ce bord extérieur. A partir de l'étoile polaire se dessine une casserole plus petite, c'est la constellation de La Petite Ourse.

**Et les autres constellations ?** Cherchons Cassiopée qui, avec six étoiles bien nettes, forme un W (fig. 3):

Cassiopée et La Casserolle se font toujours face et tournent ensemble autour de l'étoile Polaire en une ronde qui dure 24 heures par tour ! A partir de ces trois premières, de proche en proche à l'aide d'une bonne carte du ciel on repère très vite les principales constellations. On cherchera à reconnaître celles qui forment le zodiaque (égrenées sur l'écliptique), celles qui sont les personnages d'une histoire (Persée, Andromède...), celles pour qui leur apparition signale une saison!

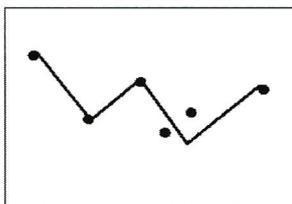


Fig. 3 : Cassiopée

**Exemple : La constellation de la Vierge au ciel de printemps!**

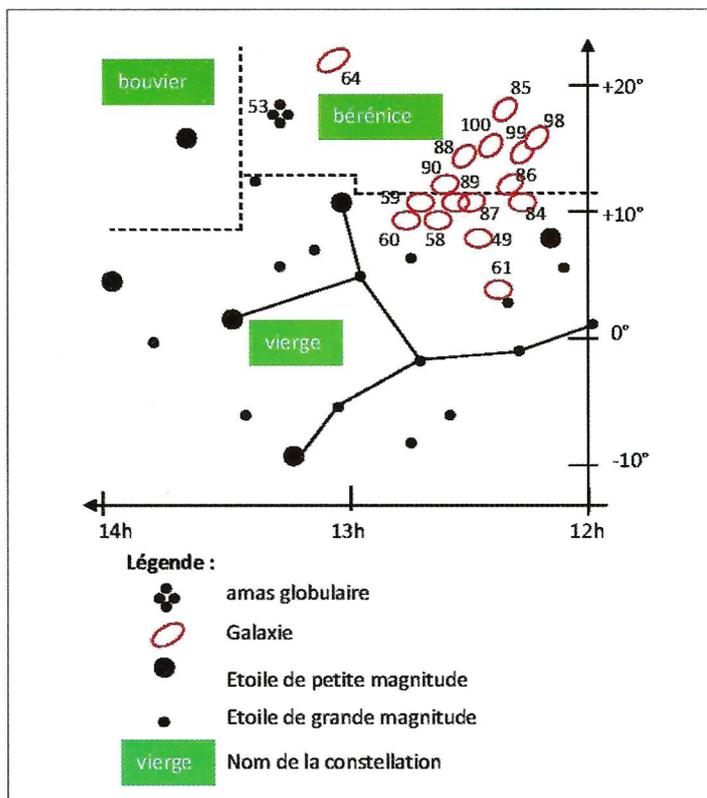


Fig. 4 : Amas de La Vierge

A environ 60 millions d'années-lumière de la Terre se trouve un amas de galaxies parmi les plus massifs : l'amas de la Vierge (fig. 4) :

- L'une des galaxies M87 atteint la masse considérable de 2700 milliards de fois celle du soleil et est un puissant émetteur radio sur 18,3 Mhz avec 10 000 fois plus d'énergie qu'elle ne devrait le faire normalement. Cette activité du noyau est considérée comme le signe qu'un trou noir de 2 à 3 milliards de masses solaires occupe le centre de M87.
- Le centre de l'Amas de la Vierge n'est pas loin de M84 et M86. Ces elliptiques géantes résultent probablement de fusions de plusieurs autres galaxies.
- M58, le plus brillant de l'amas est placée à la périphérie immédiate de l'amas de la Vierge.
- L'amas globulaire M53 dans la constellation de la Chevelure de Bérénice est l'un des plus lointains. Toutefois, il est assez dense et étendu.

**L'échelle des magnitudes :**

Dans l'antiquité, Hipparque a rendu compte des différences de luminosité entre les étoiles en les classant sur une échelle allant de 1 pour les plus brillantes à 6 pour les plus faibles. Ce système a été repris et précisé à l'ère moderne. Désormais, l'échelle des magnitudes suit une règle logarithmique de la luminosité L où :  $M_1 - M_2 = 2,5 \log \left(\frac{L_1}{L_2}\right)$ .

Par exemple 5 magnitudes se traduisent par un facteur 100. Comme dans l'antiquité, plus le nombre est petit, plus la luminosité est importante. La magnitude limite visuelle d'un instrument (11,6 pour la FSQ-85 ED) se calcule par la formule de Pogson :  $M_{lim} = 7,1 + 5 \cdot \log D$  où D est le diamètre de l'objectif. Ce dernier détermine donc le pouvoir collecteur de lumière de l'instrument : plus il est grand, plus l'instrument capte de lumière. A titre comparatif, la magnitude du télescope Hubble est de 30. Il est commun de définir la magnitude zéro comme étant celle de l'étoile **Véga** (très visible à l'œil nu), et notons les magnitudes de quelques galaxies de l'amas de la Vierge parmi les plus denses :

- M58 et M87: 8,2, M86 : 9,7
- M88, M89 et M91 : 10

**L'IMAGE NUMÉRIQUE**

Elle se définit par un ensemble de points : les pixels (picture element). Le nombre d'électrons est proportionnel au nombre de photons reçus. Ils sont ensuite codés par paquets d'électrons appelés ADU pour « Analogic Digital Unit » (fig. 5). Le facteur de conversion entre ADU et le nombre d'électrons est appelé gain. Le nombre maximum en ADU dépend de la caméra.

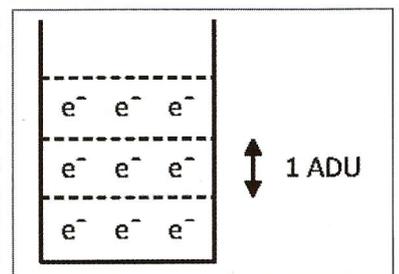


Fig. 5 : Photosite : gain 3

Deux grandes familles de capteurs sont disponibles : les CCD (pour Charge-Coupled Device) et les CMOS (pour **Complementary metal oxide semi-conductor**). On pourra se reporter par exemple à l'encyclopédie libre Wikipedia pour les descriptions technologiques!

Jusqu'à récemment, les capteurs CCD étaient de loin les plus populaires. Les meilleurs CCD sont en général en 16 bits, c'est-à-dire que les intensités s'étendent de 0 à 2<sup>16</sup>. En général on fait correspondre les intensités en ADU à des niveaux de gris, mais cela pourrait être aussi bien une palette de couleurs abstraites. Le nombre de niveaux de gris restitués par un

écran et la finesse de perception de notre œil sont limités. Imaginons une image dont le pixel d'intensité la plus faible est de 10 ADU et celui d'intensité la plus élevée est de 1000 ADU. 10 et 1000 sont respectivement les seuils bas et haut, les pixels inférieurs à 10 ADU apparaîtront noirs à l'écran et ceux supérieurs à 1000, blancs.

Mais imaginons l'image d'une faible galaxie : son niveau d'intensité sera dans les basses valeurs en ADU, et les étoiles du champ, quant à elles, auront des valeurs élevées. Il est préférable de resserrer les seuils de visualisation autour des valeurs que l'on trouve dans la galaxie.

Dans les logiciels de retouche photos on ne trouve pas de réglage de seuil mais un réglage de luminosité et de contraste. Augmenter la luminosité revient à diminuer simultanément la valeur du seuil haut et du seuil bas ; augmenter le contraste resserre les seuils de visualisation.

### LE MONTAGE OPTIQUE

En imagerie planétaire, le but est d'obtenir des images qui atteignent la résolution théorique de l'instrument ; la règle de Shannon-Nyquist montre que, pour cela, il est nécessaire que chaque pixel de l'imageur couvre un angle au moins deux fois plus petit que le plus petit détail théoriquement visible par l'instrument. Autrement dit pour la FSQ 85 ED la résolution de 1,5" impose que chaque pixel voie le ciel sous un angle de 0,75". La portion du ciel visible par pixel est également appelée échantillonnage E et se calcule par la formule :  $E = 206P/F$  avec E en seconde d'arc par pixel, P taille du pixel en  $\mu\text{m}$ , F focale en mm.

On arrive à un échantillonnage idéal en ajustant la focale. Exemple avec une taille  $P=5 \mu\text{m}$ , la distance focale est de 1400 mm. On y arrive à l'aide d'une lentille de Barlow de 1,6x à 5x.

### LE PRÉTRAITEMENT ET LE TRAITEMENT

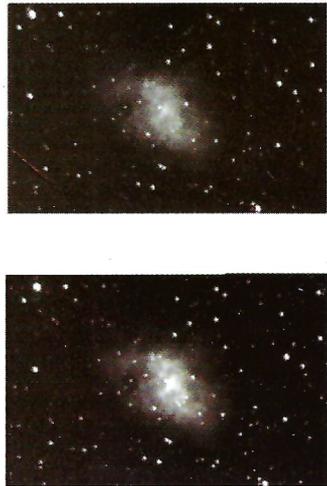
Les défauts d'une image CCD et prétraitements sont repris dans le tableau 2

Le diamètre angulaire des étoiles étant faible, on imagine donc qu'une étoile n'occupera pas plus qu'un pixel sur la matrice CCD; or ce n'est pas le cas, puisque à cause de la turbulence atmosphérique, les étoiles sont étalées sur plusieurs pixels. Cette répartition suit une fonction de probabilité. Pour espérer retrouver l'image sans turbulence à partir de celle acquise il est nécessaire d'effectuer une opération de déconvolution par la fonction qui l'a rendue floue. Cette fonction s'appelle PSF, en anglais « Point Spread Function » et peut être obtenue en isolant une étoile et en indiquant au logiciel qu'il s'agit de la PSF. Ces méthodes permettent donc de mettre en évidence des

structures fines soit sur les planètes soit sur les nébuleuses ou galaxies. Il existe de nombreux algorithmes de déconvolution tous très complexes et qui peuvent s'effectuer dans le domaine spatial ou dans le domaine fréquentiel. Actuellement, nous pouvons trouver sur le marché de nombreux logiciels de traitements d'images CCD. On conseille IRIS qu'il est impératif d'avoir sur son PC.

Pour le ciel profond l'algorithme le plus utilisé est celui de Lucy-Richardson<sup>(iv,v)</sup> en voici un aperçu :

- Une image est une fonction de points  $d_i = \sum_j p_{ij} u_j$  où :
- $p_{ij}$  est la PSF, c'est-à-dire l'intensité lumineuse provenant d'un point j et observé au point i,
  - $u_j$  est la valeur du pixel au point j ; pour les photons,  $u_j$  suit en général une distribution de Poisson pour le bruit sur l'information venant du ciel ;
  - $d_i$  est la valeur du pixel au point i.

<p><b>Le signal d'offset</b> L'image brute est codée sur des valeurs positives. Or statistiquement il est possible qu'une valeur négative apparaisse sur un pixel, se transformant en 0 à la lecture. Pour avoir une carte de l'offset, il suffit de faire un temps de 0 seconde ou du minimum autorisé.</p>  <p>Dans ce cas, l'image ne contient que le courant de précharge. On ajoute artificiellement une précharge de quelques électrons à chaque pixel.</p>	<p><b>Le signal thermique ou « Dark »</b> Lié à l'agitation thermique des électrons créant un signal accidentel, il est variable d'un pixel à l'autre, dépendant de la chaleur, proportionnel au temps de pose et parfaitement reproductible. Souvent, les caméras sont refroidies pour en limiter l'impact. Certaines caméras professionnelles sont refroidies à -100°</p>  <p>Le signal thermique est partiellement reproductible en réalisant un temps de pose équivalent à celui effectué sur le ciel, mais dans le noir. Il suffit ensuite de soustraire cette information à l'image brute.</p>
<p><b>Les variations spatiales de sensibilité</b> Elles sont liées aux défauts optiques comme l'assombrissement de l'image sur les bords, les poussières, la sensibilité propre de chaque pixel.</p>  <p>Pour avoir une carte de la sensibilité propre de chaque pixel et de chaque zone du capteur, il suffit de faire une image sur une source de lumière uniforme, comme un écran blanc ou le fond de ciel à l'aube. Cette image est appelée « flat » en anglais. Celle-ci doit être réalisée dans la même configuration que les images du ciel, avec la même mise au point et le même filtre éventuel.</p>	<p><b>Image après traitement</b> <math display="block">\text{image prétraitée} = \frac{\text{image brute} * \text{dark}}{\text{flat}}</math> <i>*après correction de l'offset</i> <i>Exemple d'une image brute :</i></p> 

Tabl. 2 : défauts et principaux prétraitements

L'idée de base est de calculer, par une méthode apparentée au maximum de ressemblance, la valeur  $u_i$  donnant la valeur observée  $d_i$  connaissant  $p_{ij}$ . Ceci se calcule de façon itérative :

$$u_i^{(t+1)} = u_i^{(t)} \frac{d_i}{\sum_j p_{ij}} \text{ où } c_j = \sum_i u_i^{(t)} p_{ij}$$

### L'OBSERVATION DE L'AMAS DE LA VIERGE

Le site de l'ASTRAP, à Isserteaux dans le Livradois, répond aux critères nécessaires indispensables pour des observations exceptionnelles :

- Absence de lumière parasite, le bourg situé à 5 kilomètres éteint les lumières à 23 heures ;
- Orientation plein sud sur un point culminant où on peut trouver un grand nombre de nuits avec une atmosphère calme et limpide ;
- Eloignement par rapport à tous bâtiments chauffés qui pourraient produire une petite turbulence nuisible à la netteté de l'image.

Les 2500 galaxies centrées sur la Vierge s'étendent sur une zone d'un diamètre de 12°. Pour un champ de 5° et avec une magnitude limite de 11, on distingue très nettement, dans l'image ci-après (fig. 6), dans les plus grosses : M88, M90, M 91, mais aussi treize autres galaxies : résultat exceptionnel pour ce type de matériel !

### Note sur le classement :

Outre le catalogue de Messier indiqué dans la référence<sup>1</sup>, le NGC, pour « New General Catalogue » est l'un des plus connus dans le domaine de l'astronomie amateur. Il contient 7840 objets, principalement des galaxies, mais pas seulement, recensés par John Dreyer en 1888 il a été complété par le IC pour « index Catalogue » compilation, toujours par John Dreyer, et complété plusieurs fois<sup>vi</sup>.

### L'ATELIER D'IMAGERIE DU CIEL ÉTOILÉ À L'ADASTA

Chaque minute carrée de notre voûte céleste contient « une infinité » de mondes gigantesques. Pour les capturer on doit donc domestiquer le pixel : apprentissage qui allie les techniques numériques les plus avancées avec la dextérité des astronomes. L'atelier imagerie du ciel étoilé se propose d'accueillir ceux qui veulent se former pour accéder à ce monde passionnant.

### Fête de la Science 2010 avec l'Atelier d'Imagerie du Ciel étoilé

le samedi 23 octobre, en soirée, à Isserteaux ;

au programme : la Galaxie d'Andromède.

Informations et inscription au secrétariat de l'ADASTA

\* L'auteur remercie Gérard Bancal, pour sa connaissance du ciel profond, et Marc Cheminade pour son enseignement en photos du ciel.

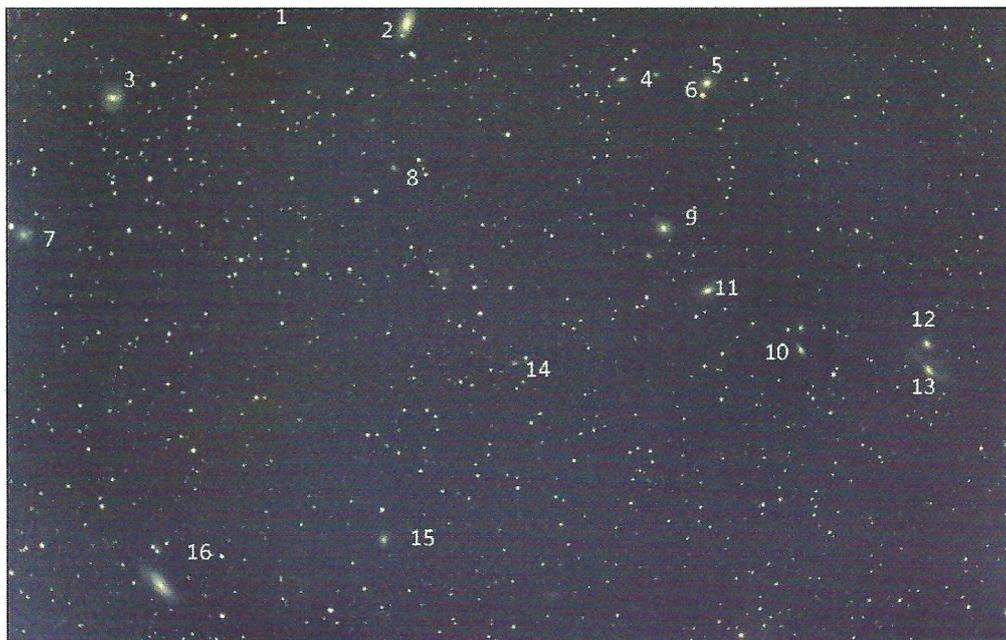


Fig. 6 : Ciel profond de printemps, Amas de la Vierge (pris en avril 2010);  
Légende : 1 : ngc4516 ; 2 : M88 ; 3 : M91 ; 4 : ngc4474 ; 5 : ngc4468 ; 6 : ngc4459 ; 7 : ngc4571 ;  
8 : ic3476 ; 9 : ngc4477 ; 10 : ngc4479 ; 11 : ngc4473 ; 12 : ngc4458 ; 13 : ngc4461 ;  
14 : ngc4506 ; 15 : ngc4531 ; 16 : M90.

### DOCUMENTATION

<sup>1</sup> Marc de Gouvenain : « S'y retrouver dans les étoiles », actes Sud, 2004.

<sup>ii</sup> Guillaud-Saumur B., Réthoré O. : « les objets de Messier », Masson 1991.

<sup>iii</sup> [http://fr.wikipedia.org/wiki/Capteur\\_photographique](http://fr.wikipedia.org/wiki/Capteur_photographique).

<sup>iv</sup> Richardson, W. H. "Bayesian-Based Iterative Method of Image Restoration". JOSA 62 (1): 55-59, 1972.

<sup>v</sup> Lucy, L. B. "An iterative technique for the rectification of observed distributions". Astronomical Journal 79 (6): 745-754, 1974.

<sup>vi</sup> Dreyer J. "Memoirs of the Royal Astronomical Society", 1888, 1895, 1908

## MOTS CACHES

(Avez-vous bien lu le numéro précédent ?)

Jeu proposé par Jocelyne Allée

Dans cette grille 15x15 sont dissimulés 42 mots dont la plupart appartiennent au vocabulaire scientifique :

- 16 mots horizontaux lus de gauche à droite ou de droite à gauche.
- 22 mots verticaux lus de haut en bas ou de bas en haut.
- 4 mots en diagonale.

Certaines lettres peuvent être communes à plusieurs mots. Retrouvez ceux-ci sachant qu'ils figurent tous dans les différents articles du numéro 73 de la revue.

Indices : page 27 - Solution : page 31

E	A	U	N	I	A	R	R	E	T	U	O	S	E	M
A	N	T	O	S	A	C	T	U	F	S	R	A	A	M
D	B	N	T	E	E	I	S	E	D	O	E	G	L	E
A	M	E	A	V	I	N	I	A	E	L	M	E	U	R
S	O	V	L	A	I	R	N	M	N	A	N	L	V	I
T	L	I	P	C	H	E	A	P	S	I	O	E	I	D
A	P	R	C	F	U	P	T	E	O	R	I	V	D	I
T	T	A	G	E	S	O	U	R	C	E	S	I	E	E
N	V	I	R	U	S	C	R	E	R	T	S	T	N	N
E	E	I	G	E	R	M	E	N	A	H	E	A	E	E
M	N	E	T	E	M	O	C	I	T	I	R	T	G	D
I	T	A	F	E	R	M	A	T	E	Q	P	I	I	I
D	U	R	P	A	S	T	E	U	R	U	O	O	T	U
E	R	B	O	U	S	S	O	L	E	E	L	N	N	L
S	I	E	N	E	T	R	E	B	I	L	E	D	A	F



**JEAN-MARIE FAVREAU**

### INTRODUCTION

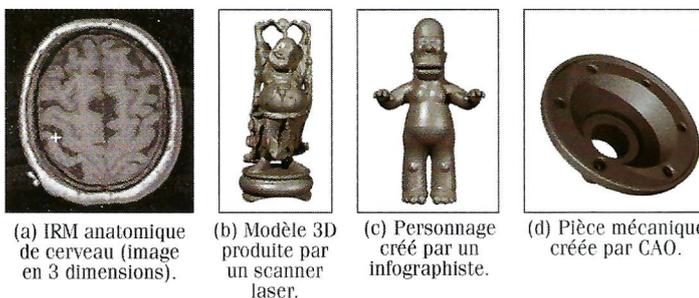
Jean-Marie Favreau a soutenu sa thèse de doctorat [1] le 22 octobre 2009 à Clermont-Ferrand, après trois années passées sous la direction de Vincent Barra au **Laboratoire d'Informatique, de Modélisation et d'Optimisation des Systèmes (LIMOS)**. Il s'agit d'une Unité Mixte de Recherche du CNRS faisant partie de l'Université Blaise Pascal (UMR 6158).

Pendant ces trois années, ils se sont intéressés à un domaine de l'informatique – la géométrie algorithmique – qui est à l'interface avec plusieurs autres disciplines. Ils ont exploité de nombreux outils issus des mathématiques pour répondre à des questions concrètes dans le domaine de l'imagerie médicale, ou encore de l'infographie.



**Figure 1 : La science informatique propose des manières concrètes de répondre à des problèmes pratiques en exploitant les outils offerts par les mathématiques**

Plus précisément, ils se sont focalisés sur des questions liées aux surfaces en général, qu'elles soient issues d'acquisitions médicales (figure 2 (a)), de Conception Assistée par Ordinateur (CAO) dans un contexte industriel (figure 2 (b)), qu'elles aient été produites par un scanner 3D (figure 2 (c)) ou encore modélisées par un infographiste (figure 2 (d)).



(a) IRM anatomique de cerveau (image en 3 dimensions). (b) Modèle 3D produite par un scanner laser. (c) Personnage créé par un infographiste. (d) Pièce mécanique créée par CAO.

**Figure 2 : La diversité des surfaces que l'on peut manipuler avec l'outil informatique est grande, et l'origine de ces modèles très variée.**

Dans tous ces différents domaines, qui *a priori* partagent peu de choses, un grand nombre de problématiques sont voisines, et peuvent être solutionnées en développant des méthodes automatiques, guidées à la fois par les propriétés propres des surfaces, comme leur structure globale ou leur forme locale, mais également guidées par l'introduction d'informations spécifiques à l'application.

Leurs travaux de recherche se sont donc focalisés sur la description de ces méthodes informatiques, leur originalité résidant dans l'intégration de ces différentes informations, pour proposer des approches globales. En particulier, ils se sont intéressés aux questions de découpage de surface.

Après avoir décrit de manière synthétique ce que signifie concrètement le découpage de surfaces, deux applications de

ces travaux sont présentées ici, d'une part en infographie, et d'autre part dans un contexte médical. Ces différentes parties illustrent l'originalité de ces travaux, les différentes publications scientifiques associées étant données en référence en fin de ce document.

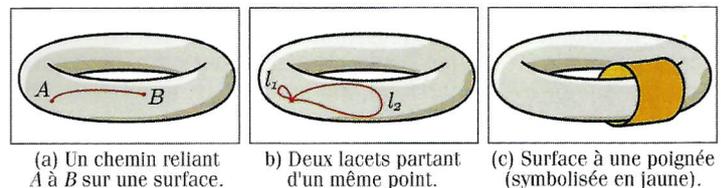
### DÉCOUPAGE DE SURFACES

Dans cette première partie, sont présentées les notions mathématiques et informatiques qui seront utilisées par la suite pour répondre aux problématiques concrètes des applications présentées. Le lecteur intéressé par des définitions plus rigoureuses pourra consulter le manuscrit de thèse de Jean-Marie Favreau [1].

#### Quelques notions de mathématiques sur les surfaces

Les mathématiques décrivent avec soin les objets qu'elles manipulent. La manière dont les surfaces sont décrites y est assez complexe, mais correspond bien à l'intuition qu'on s'en fait généralement: on peut, sans trop d'erreurs, voir une surface comme *une partie de la « peau » d'un objet en trois dimensions*. On ne s'intéresse pas à l'épaisseur des surfaces, mais plutôt à leur forme, et à leur structure globale.

On dispose donc de différents outils pour décrire et manipuler les surfaces. En premier lieu, on utilise les **chemins** sur les surfaces. Un chemin part d'un point, décrit un parcours sur la surface, puis s'arrête à un autre point. La figure 3 (a) représente ainsi un chemin d'un point *A* à un point *B*. Si le point d'origine et le point de destination du chemin sont confondus, alors on parle de **lacet** (figure 3 (b)). Différentes mesures peuvent être réalisées sur les lacets et chemins pour les caractériser. L'une des caractéristiques la plus commune est la longueur. Ainsi, le lacet  $l_1$  de la figure 3 (b) est plus court que le lacet  $l_2$ , bien qu'ils partent chacun du même point.

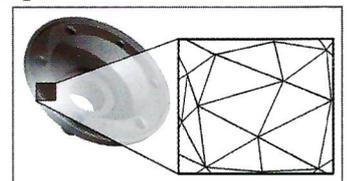


**Figure 3 : Différentes notions mathématiques sur les surfaces.**

Enfin, l'une des caractéristiques de structure des surfaces est le nombre de **poignées** dont elles disposent. Ainsi, la surface représentée sur la figure 3 (c) est constituée d'une unique poignée. Sa structure est donc différente de celle d'une balle par exemple, qui elle n'a pas de poignée.

#### Les surfaces en informatique

Pour qu'un ordinateur soit capable de manipuler des surfaces, on doit pouvoir les lui décrire. Il existe plusieurs manières de le faire, mais je n'en présenterai ici qu'une seule. Elle a l'avantage d'être utilisable pour tout type de



**Figure 4 : Détail d'une surface informatique**

surfaces. Ainsi, une manière simple de décrire une surface est de la représenter par un **ensemble de triangles** juxtaposés les uns aux autres. La figure 4 illustre par un zoom sur une surface mécanique cette représentation par triangles.

Cette structure en triangles est propice à l'utilisation de méthodes issues de l'**algorithmique** (un domaine de l'informatique fondamentale), qui propose notamment l'*algorithme de Dijkstra* – décrit en 1959 par Edsger Wybe Dijkstra – qui permet de calculer le plus court chemin sur des maillages. On dispose ainsi d'un moyen de calculer concrètement ce que les mathématiques peuvent décrire.

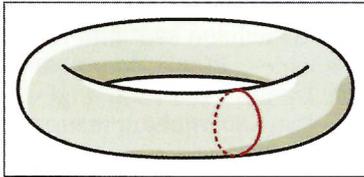


Figure 5 : Lacet sur une poignée.

De la même manière, les résultats récents en topologie algorithmique permettent de proposer des méthodes pour calculer les **plus courts lacets sur une poignée**. La figure 5 présente un exemple de

lacet sur la poignée précédemment symbolisée par la surface jaune (figure 3 (c)). Pendant ces trois années de recherche, nous avons ainsi proposé [5] des moyens d'améliorer de manière pratique l'une des méthodes permettant ces calculs. Au delà de l'intérêt théorique de ce résultat, nous avons ainsi pu réduire les temps de calculs de logiciels produisant de tels lacets.

En assemblant ces différents algorithmes, ainsi que d'autres, spécifiques aux besoins des applications, il est possible de répondre concrètement à des problèmes particuliers. Les deux parties suivantes présentent des exemples de ces applications.

### APPLICATION EN INFOGRAPHIE

L'une des applications qui a motivé ces travaux pendant ces trois années de thèse a été l'**infographie**. En quelques mots, le travail d'un infographe consiste à exploiter les possibilités offertes par l'outil informatique pour ses réalisations graphiques. Ces dernières sont multiples, depuis les films d'animations jusqu'aux jeux vidéos, en passant par les illustrations ou encore la réalisation de sites internet.

#### Contexte

Puisque ces études se focalisent sur les surfaces, les réalisations graphiques qui pourront profiter au mieux de ces idées sont toutes les créations qui nécessitent l'utilisation de modèles 3D. Que ce soit pour réaliser des jeux vidéos ou des films d'animation, les infographistes réalisent différentes tâches similaires, comme l'animation d'un personnage à partir de son *squelette numérique*, ou encore le placement sur l'objet de la *texture* qui contiendra l'apparence de l'objet.

Ainsi, la figure 6 (a), extraite du film *Big Buck Bunny* représente plusieurs personnages, la base d'un arbre, etc. Ces objets 3D semblent couverts d'une apparence non lisse, alors qu'ils sont décrits uniquement par des triangles: on a ajouté une texture pour rendre leur apparence réaliste (couleur, motifs de l'arbre, grain de la peau, etc.).

La figure 6 (b) quant à elle reproduit l'interface du logiciel qui a servi aux infographistes à animer le lapin de ce film. On observe un grand nombre de contrôles, qui vont permettre d'animer chacun des membres, des détails du personnage.

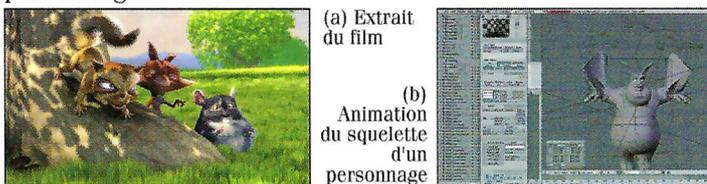


Figure 6 : *Big Buck Bunny* (2008), film d'animation libre, Blender foundation.

Si une grande part de ces ajustements et manipulations peut être réalisée artisanalement par l'infographe, un certain nombre de méthodes issues de travaux de recherches récents peuvent être appliquées pour automatiser certaines tâches, et apporter de l'assistance à l'utilisateur.

En particulier, l'un des éléments essentiels lors de l'animation est de pouvoir déplacer chacun des membres du personnage individuellement. Pour cela, il est nécessaire de pouvoir indiquer où se situent les extrémités de ces membres, ou encore de les localiser dans leur globalité. Ainsi, plusieurs solutions ont été explorées pendant cette thèse.

#### Détection des extrémités

L'une des questions que l'on doit résoudre dans ce contexte est la détection des extrémités d'une surface, par exemple les extrémités des membres d'animaux. Différentes approches ont déjà été proposées par le passé, mais l'une de leurs limitations principales est l'aspect extrêmement local de ces méthodes, qui limitent leur efficacité.

Nous avons proposé une approche originale, basée sur le **découpage** puis le **dépliage** de la surface à analyser. Après avoir réalisé un premier découpage de la surface (figure 7 (a)), on déplie cette dernière en préservant au maximum les angles (figure 7 (b)), par une méthode que l'on appelle *transformation conforme*. Puisqu'il est impossible de préserver à la fois angles et distances, on remarque que certaines régions de la surface sont plus compressées les unes que les autres (zones en rouge sur la figure 7 (b)). Il est facile de remarquer que ces régions correspondent aux extrémités de l'animal (figure 7 (d)). Afin de les détecter, nous avons décrit [4] une méthode basée sur la propagation d'un front partant du bord du maillage déplié, et avançant en respectant la distortion comme une contrainte: plus la distortion est importante, plus on avance doucement (figure 7 (c)).

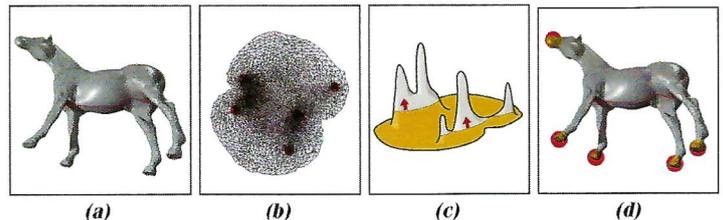


Figure 7 : Quelques images de la détection d'extrémités sur un animal virtuel.

Cette approche permet donc de détecter les extrémités, qui sont une propriété de forme, sans se préoccuper de l'échelle à laquelle ils se situent. Naturellement, dans le cadre d'une application en infographie, ces extrémités ne suffisent pas. Nous verrons au paragraphe suivant comment les régions tubulaires d'une surface peuvent être détectées. Ces deux propriétés seront ensuite exploitées à la section 3.4 dans un contexte d'infographie.

#### Détection des régions tubulaires

La détection des régions tubulaires d'une surface complexe est un problème qui a été traité à plusieurs reprises par différentes équipes de recherche. Cependant, ces approches ne permettaient pas de séparer complètement la surface en régions tubulaires: certaines parties étaient ignorées. La méthode que nous avons développée [2] s'appuie sur un outil original, que nous avons appelé *n-cet*, et qui permet de séparer une surface donnée en tubes, sans « oublier » de parties de la surface.

La figure 8 (a) représente une surface composée de trois bords. Il est possible de la séparer en trois régions tubulaires en utilisant un *3-cet*, comme l'illustre la figure 8 (b).

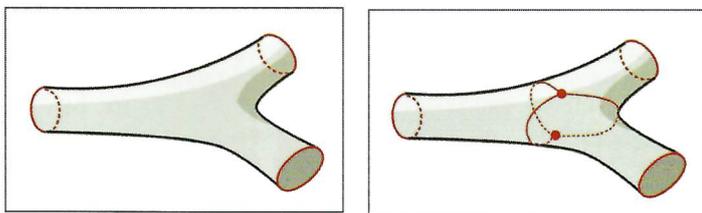


Figure 8 : Une surface de type « pantalon » et un découpage en tubes par 3-cet.

Cependant, la question du positionnement des  $n$ -cets n'est pas simple: elle doit à la fois prendre en compte la forme de l'objet, mais aussi sa structure globale. Nous avons proposé une méthode d'optimisation, qui s'inspire de techniques de l'industrie métallurgique. En minimisant la longueur des chemins qui composent un 3-cet, on l'ajuste au plus près, afin de produire des tubes aux bords les moins déformés possible.

Ainsi, la figure 9 (a) illustre une étape intermédiaire de cet ajustement: le 3-cet positionné comporte un chemin de grande taille. En le déplaçant au niveau des points noirs, on réduira cette longueur, et le nouveau 3-cet sera un meilleur candidat au découpage. La figure 9 (b) présente la même figure après ajustement des 3-cet : elle est séparée en trois régions tubulaires, comme le montre la figure 9 (c).

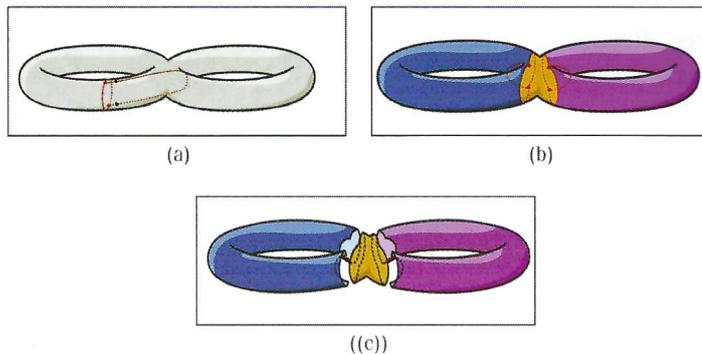


Figure 9 : Découpage d'un objet en régions tubulaires

### Exemples d'applications

Cette section décrit quelques exemples d'application des méthodes plus générales décrites ci-dessus.

#### Segmentation sémantique

Le principe du découpage sémantique est d'allier à la fois la détection des extrémums et celle des sections tubulaires pour produire un découpage qui respecte la structure logique de l'objet, chacun des membres étant par exemple décrits par une région différente. Pour cela, on commence par détecter les extrémums (figure 10 (a)), puis on retire en chacune de ces extrémités un petit disque. Dans l'exemple présenté ici, on constate que les doigts sont alors composés de parties tubulaires. Il suffit alors d'appliquer la méthode de détection de ces régions pour produire le découpage représenté par la figure 10 (b).

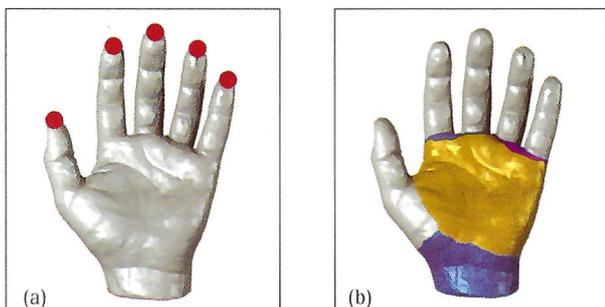


Figure 10 : Segmentation sémantique par détection des extrémums et découpage en sections tubulaires.

La figure 11 présente quelques résultats de découpage. En particulier, on remarque que notre méthode est capable de réaliser ce type de découpage même si la surface est fortement perturbée, comme permet de le constater la figure 11 (c).

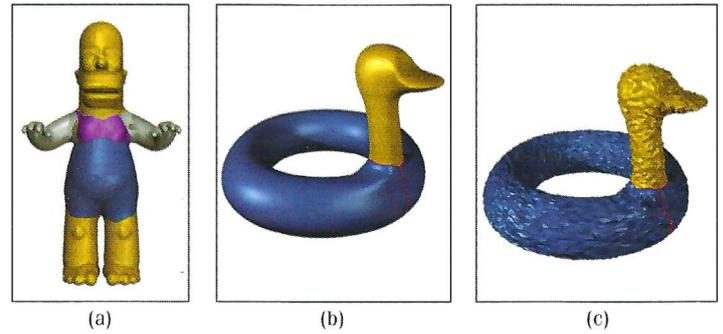


Figure 11 : Quelques exemples de découpages sémantiques

#### Habillage de surface

Une autre manière d'utiliser les extrémums calculés précédemment est de les utiliser pour réduire la distorsion de la surface une fois dépliée.

Ainsi, la figure 7 (b) présentait la surface d'un cheval dépliée après un premier découpage. On avait remarqué un grand nombre de distorsions. Or, si l'on affine le découpage initial en découpant la surface le long de chemins qui relient les extrémums détectés, on est capable de produire des dépliages de meilleure qualité.

On commence donc par produire un découpage qui relie les extrémums détectés (figure 12 (a)), puis on déplie la surface avec ce nouveau découpage (figure 12 (b)). On y place alors l'habillage que l'on souhaitera voir sur la surface finale (figure 12 (c)), puis on réalise la transformation inverse pour placer l'habillage sur la surface (figure 12 (d)).

La figure 12 (e) présente le résultat obtenu avec le même procédé, lorsque les découpages ne prennent pas en compte les extrémums.

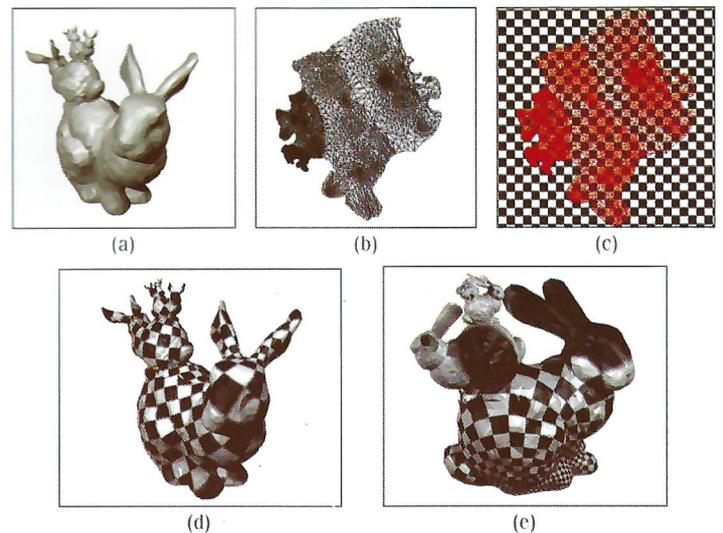


Figure 12 : (a)-(d) : habillage d'une surface par dépliage. (e) : habillage sans détection des extrémums.

Si ce processus de dépliage est classique, l'intégration de la détection des extrémums que nous avons présentée permet de produire un habillage peu distordu : sur l'habillage choisi, le damier est régulier sur le plan, et peu déformé sur la forme en trois dimensions, malgré la complexité de la surface traitée.

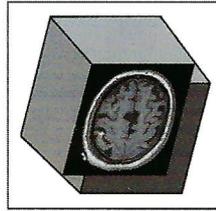
Afin d'illustrer les possibilités offertes par cette méthode, un prototype intégré à blender – suite de création 3D – a été développé, et permet de tester facilement ces idées.

### Application médicale

La section précédente illustre quelques possibilités d'applications en infographie d'outils de découpage de surface. Cependant, ce n'est pas le seul domaine où l'on peut utiliser ces résultats. Ainsi, nous avons exploré quelques possibilités de ces outils dans le contexte de l'imagerie médicale.

### Contexte

Figure 13 : Les IRM sont des images en trois dimensions, que l'on peut visualiser tranche par tranche.



L'imagerie médicale est un outil qui permet aux praticiens d'observer l'anatomie ou le fonctionnement des organes de leurs patients sans pratiquer d'opération au préalable. Les différentes techniques existantes, telles que l'imagerie par résonance magnétique (IRM, figure 13), le scanner ou la radiographie, offrent des possibilités en terme d'analyse de l'état du patient. On pourra par exemple mesurer l'épaisseur d'un tissu, localiser la position d'éléments importants, ou encore comparer une propriété donnée à des patients sains ou porteurs de la pathologie.

Pour chacune de ces problématiques, l'informatique apporte un ensemble de solutions techniques et scientifiques qui facilitent la tâche des spécialistes, en leur apportant une aide qui leur permet de gagner du temps, tout en assurant une grande précision.

### Correction des incohérences

Lorsqu'on manipule des images 3D comme les IRM (figure 13), l'un des traitements classiques que l'imagerie médicale permet est de classifier chacun des éléments de volume (ou voxels) suivant le type de tissu auquel il appartient. Ainsi, dans le cas d'une IRM du cerveau, on séparera matière blanche, matière grise, ou encore le liquide environnant. En exploitant cette classification, il est facile de reconstruire la surface des organes, par exemple ici du cerveau. Il devient alors possible d'utiliser sur cette surface les outils développés pendant cette thèse.

Ainsi, nous nous sommes intéressés à un problème assez commun quand on utilise ce type de données. En effet, il arrive fréquemment que les surfaces reconstruites à partir d'images 3D n'aient pas exactement la structure que les connaissances anatomiques nous permettent d'espérer. En particulier, pour de multiples raisons, liées à la fois à la qualité des images initiales, et aux approximations introduites par les étapes nécessaires à la reconstruction, on observe au cœur des sillons du cerveau des jonctions incohérentes. La figure 14 (a) illustre par un schéma cette configuration.

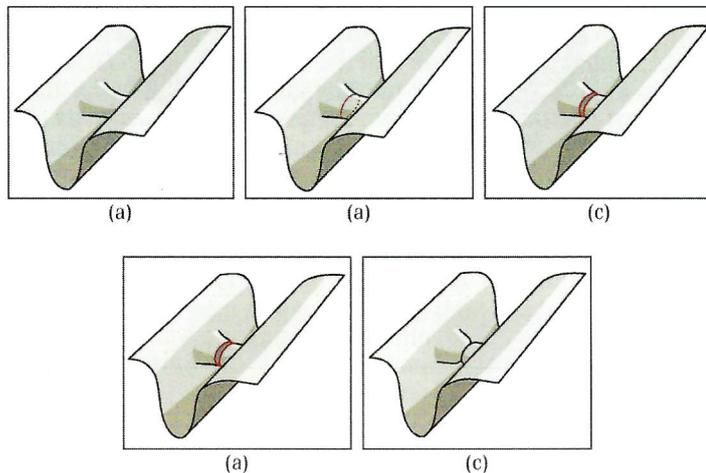


Figure 14 : Correction d'une incohérence de structure.

Afin de corriger ces jonctions incohérentes, nous avons proposé [5] une méthode utilisant la notion de plus court lacet sur une poignée (section 2.2). Ainsi, on commence par repérer sur la surface le plus court lacet sur poignée (figure 14 (b)), puis on procède à un découpage de la surface suivant ce lacet (figure 14 (c)). La surface est alors modifiée, on constate l'apparition de deux bords résultant de ce découpage (figure 14 (d)). En ajoutant à la surface en chacun de ces bords un disque, on supprime l'incohérence en restituant la forme voulue (figure 14 (e)).

### Exemples d'utilisation

La méthode de correction des incohérences décrite à la section précédente permet de modifier la représentation informatique de la surface d'un organe pour la faire correspondre aux connaissances anatomiques dont on dispose. Elle a ainsi été appliquée dans deux situations distinctes pour ajuster la structure de la surface du cerveau, afin de permettre plusieurs types de mesures et analyses.

### Cartographie du sillon central

La première utilisation de cette méthode a été réalisée dans un contexte de stimulation corticale. Le neurochirurgien avec lequel nous avons travaillé place à la surface du cerveau des électrodes (figure 15), au niveau du sillon central, pour soigner des douleurs chroniques. Cependant, il souhaitait améliorer sa compréhension fine de cet acte chirurgical, notamment en localisant avec précision la position des électrodes.

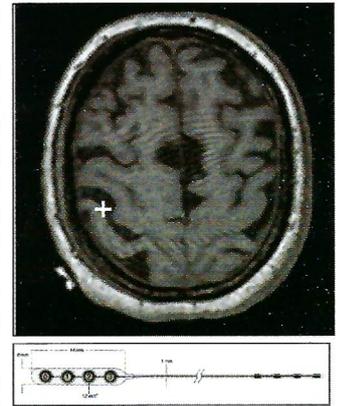


Figure 15 : Exemple d'IRM exploité, et schéma de l'électrode (échelle non respectée).

L'outil de visualisation couramment utilisé jusqu'à présent était une vue en 3 dimensions des structures associées (figure 17 (a)), qui présentait plusieurs défauts. En particulier, son utilisation était peu aisée, et il était impossible de produire une version imprimée et facile à lire de la position des électrodes. Nous avons proposé [3] une méthode de visualisation de la position des électrodes en construisant une carte plane de la région d'intérêt.

Pour cela, l'étape de correction des incohérences est indispensable. En effet, comme l'illustre la figure 16, il est impossible de déplier une surface sans erreur si elle comporte des jonctions au cœur des sillons.

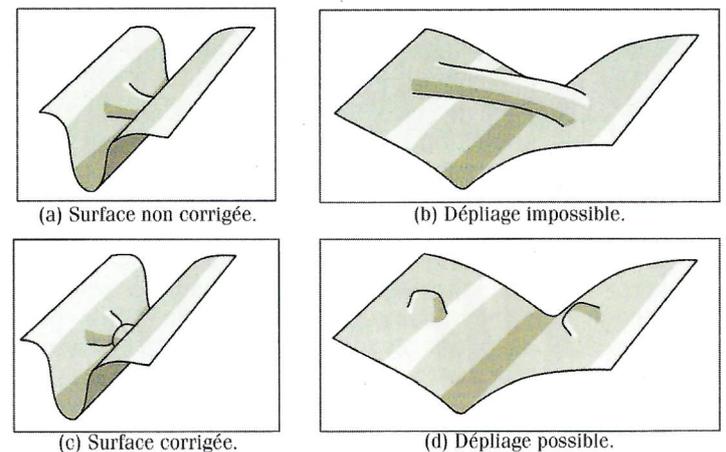
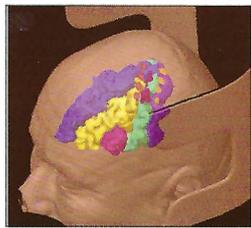
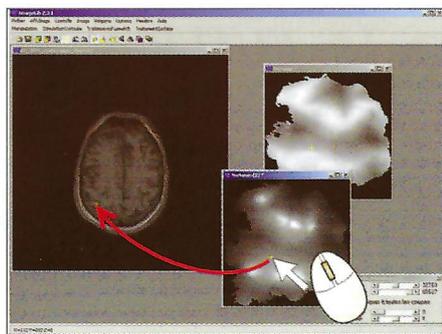


Figure 16 : Illustration du besoin de correction de structure avant dépliage.

En combinant les différentes étapes de traitement présentées ici, une interface logicielle expérimentale a été développée (figure 17 (b)) pour présenter les possibilités de l'outil, notamment en terme de navigation 2D/3D.



(a) Interface de visualisation 3D utilisée initialement.



(b) Interface de visualisation exploitant le dépliage de la surface.

Figure 17 : Interfaces utilisées pour visualiser la position des électrodes.

Les cartes planes ainsi produites peuvent représenter différentes informations, depuis la position des électrodes jusqu'à la structure géométrique du cerveau – la distance à l'os de la boîte crânienne par exemple –, en passant par des cartes anatomiques dressées par des experts sur l'IRM 3D.

### Étude de la maladie D'Alzheimer

En partenariat avec une équipe australienne, nous avons également proposé une méthode de traitement d'IRM permettant de faciliter l'étude de la maladie d'Alzheimer [7]. En particulier, nous nous sommes intéressés aux résultats d'études médicales qui montrent que l'épaisseur du cortex est un élément déterminant pour différencier un patient sain d'un patient atteint de la maladie d'Alzheimer.

Dans ce contexte, nous avons mis en place une suite complète de traitement informatique, permettant à partir d'une IRM de reconstruire la surface du cerveau (figure 18 (a)), puis de corriger les incohérences sur

l'ensemble de la structure (figure 18 (b)). L'épaisseur du cortex est alors mesurée en chaque point de la surface (figure 18 (c)).

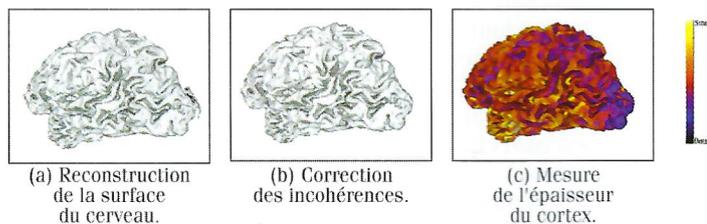


Figure 18 : Quelques étapes de la chaîne de traitement informatique pour l'étude de la maladie d'Alzheimer.

Le bénéfice principal de la correction des incohérences introduite dans ce traitement est la cohérence de structure entre les représentations informatiques des cerveaux de chaque patient. Il devient alors possible de comparer point à point les données d'un patient avec les données disponibles pour des patients sains (figure 19 (a)) ou atteints de la maladie (figure 19 (b)).

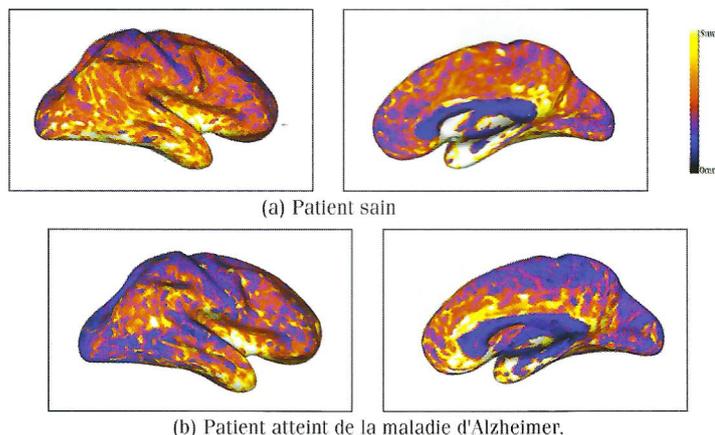


Figure 19 : Épaisseur du cortex pour un patient sain et un patient atteint de la maladie d'Alzheimer.

## Conclusion

Au cours de ces trois années de travail commun au LIMOS, nous avons exploré les possibilités offertes par les outils mathématiques élémentaires sur les surfaces, en proposant des approches informatiques originales à des questions issues d'applications. Ainsi, les mêmes idées sous-jacentes – exploitation de la structure des surfaces, de leurs formes, et de propriétés intrinsèques aux applications envisagées – ont permis de répondre concrètement à des problématiques dans différents domaines.

Afin de formaliser les idées liées au découpage de surface, nous avons également développé un cadre formel de description des chemins de découpage, et des régions résultant de ce découpage, en introduisant la notion de  $M$ -pavage et de  $M$ -tuiles [6]. Cette représentation unifiée à la fois les différents travaux que nous avons réalisés, mais permet également de décrire un grand nombre de manipulation de surfaces proposées par d'autres chercheurs.

Ces travaux de thèse ouvrent de nombreuses perspectives. D'abord d'un point de vue théorique, des questions originales ont été relevées pendant ces trois années, et restent encore ouvertes. Le positionnement optimal de  $n$ -cets à la surface d'objets, et le lien avec des outils mathématiques comme la théorie de Morse est une question ouverte. C'est l'une des questions que Jean-Marie Favreau tente cette année de résoudre au *Shape Modeling Group* du *National Research Council* (CNR) à Gênes (Italie).

D'un point de vue applicatif, plusieurs projets ont vu le jour, qui poursuivent les idées initiées pendant ces trois ans. En particulier, un travail important de transfert technologique est aujourd'hui en cours pour faciliter l'accès des cartes planes du cerveau (section 4.3.1). Un projet européen de deux ans avec l'équipe australienne travaillant sur la maladie d'Alzheimer (section 4.3.2) a commencé cette année pour explorer les possibilités offertes par nos premiers résultats.

## RÉFÉRENCES

- [1] J.-M. Favreau. *Outils pour le pavage de surfaces*. PhD thesis, Université Blaise Pascal, 2009.
- [2] J.-M. Favreau and V. Barra. Tiling surfaces with cylinders using  $n$ -loops, soumission prévue début 2010.
- [3] J.-M. Favreau and V. Barra. Conformal flattening of the cortical surface using a topological and geometrical cutting. In *Proceedings of the 2nd South-East European Conference on Computational Mechanics '09 (SEECM'09)*, Rhodes, Greece, 2009.
- [4] J.-M. Favreau and V. Barra. Cutting an organic surface. In *Proceedings of the 25th European Workshop on Computational Geometry (EuroCG'09)*, Brussels, Belgium, 2009.
- [5] J.-M. Favreau and V. Barra. Low-resolution surface mapping : a topological and geometrical approach. In *Proceedings of the 25th European Workshop on Computational Geometry (EuroCG'09)*, Brussels, Belgium, 2009.
- [6] J.-M. Favreau, T. Marzais, Y. Gérard, and V. Barra. Tiling surfaces with  $m$ -tiles : a topological framework with applications. Rapport de recherche RR-09-08 2009.
- [7] F. Gris, J.-M. Favreau, O. Acosta, V. Barra, and O. Salvado. A combined voxel and surface based method for topology correction of brain surfaces. In *SPIE Medical Imaging*, 2010.



Par **PIERRICK BORDES**  
Elève de 2<sup>ème</sup> année à l'IFMA

avec la collaboration de Frédéric LAFOSSE et Rémi WATRIN

## PRÉAMBULE

Nous voudrions tout d'abord remercier la SFEN qui a permis à 10 d'entre nous, étudiants de l'IFMA, de participer à une sortie scientifique (et touristique) sur le site de CADARACHE dans le but de visiter le chantier d'ITER. Nous aimerions par ailleurs, au travers de ces quelques pages, emmener dans notre « voyage » tous ceux qui n'ont pu y participer.

Comme on ne peut parler d'ITER sans évoquer le nucléaire, nous allons nous y risquer en comptant sur la tolérance des « érudits » du nucléaire qui n'y trouveront pas leur compte. Ce n'est pas l'objectif de cet article. Nous les invitons donc à se reporter sur les revues scientifiques spécialisées ou pourquoi pas visiter eux-mêmes le site puisqu'il est ouvert au public.

## PREMIÈRE PARTIE : L'ELECTRICITE NUCLEAIRE

### 1° - Rappel



- Les besoins énergétiques de la planète, notamment en électricité, vont croître de façon exponentielle compte tenu du développement démographique et technologique des grandes puissances émergentes (CHINE, INDE, BRESIL, etc.)  
- Les énergies fossiles ne sont pas

inépuisables et qu'elles sont source de pollutions souvent irréversibles très dommageables à l'environnement. De plus étant géographiquement réparties de manière très aléatoire sur la terre, elles peuvent être à terme source de conflits (partages des richesses et indépendance énergétique)

- Les sources d'énergies renouvelables (solaire, éolien, géothermie, etc.) ne semblent pas pouvoir à elles seules (loin s'en faut), alimenter la future consommation du monde moderne en énergie électrique.

- Il existe depuis quelques années voire quelques décennies une prise de conscience générale des populations pour le principe d'un développement durable qui nous incite à réfléchir sur

nos moyens de production actuels d'énergie, tant dans les centrales thermiques classiques que pour les centrales nucléaires

- Si aujourd'hui il s'avérait possible (voir l'exemple de la France qui fabrique 80% de son électricité sur la base du nucléaire) d'alimenter, à terme, le monde en électricité nucléaire, cette technologie n'est ni sans risques, ni sans conséquences pour la population et son environnement. En effet les réacteurs actuels ne sont pas à l'abri d'un risque d'emballement donc d'explosion avec rejets radioactifs. Par ailleurs, ils génèrent des déchets radioactifs à très longue vie (période), sources de pollutions graves pour les futures générations. De plus, ces centrales (comme toutes autres installations) ayant une durée de vie limitée dans le temps devront un jour être démantelées ce qui ne sera pas sans contraintes fortes (maîtrise des procédés et stockage des éléments radioactifs).

Qu'on se rassure, tout ce qui précède, s'inspire d'une vision à long terme et nous avons encore du temps devant nous pour réagir. Mais pourquoi faudrait-il attendre pour étudier et plus tard mettre en œuvre un procédé de production d'électricité qui réconcilie tout le monde.

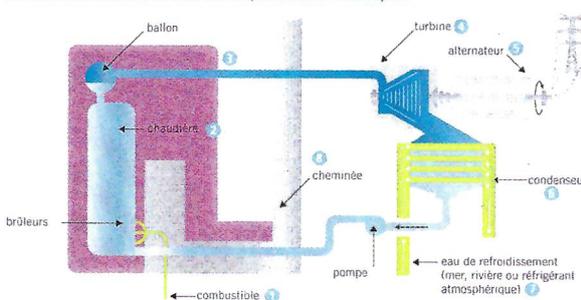
En attendant les centrales électriques actuelles ont encore de beaux jours devant elles.

Faut-il succinctement en rappeler le principe ?

### 2° - Les centrales électriques thermiques à flamme: comment ça marche ?

Dans les centrales électriques nucléaires, le principe de production électrique est identique excepté pour la production de vapeur qui est dans la plupart des cas, générée aujourd'hui par un réacteur atomique à FISSION nucléaire.

Fonctionnement d'une centrale thermique à flamme « classique »



**CONDENSEUR**  
Structure composée de milliers de tubes de petit diamètre dans lesquels circule l'eau de refroidissement, - généralement prélevée dans une rivière ou en mer -, au contact desquels la vapeur va se refroidir et prendre une forme liquide, par condensation.

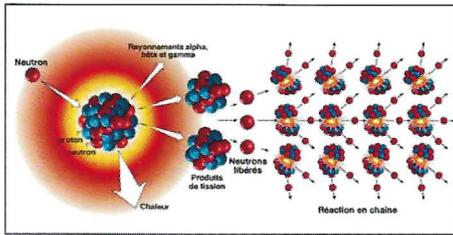
#### LE PRINCIPE

La centrale à flamme produit de la vapeur pour faire tourner un alternateur, qui est une machine rotative convertissant en énergie électrique l'énergie mécanique fournie par un moteur.  
Quel que soit le combustible ①, celui-ci brûle dans une chaudière ② - pouvant atteindre 90 mètres de hauteur et un poids de 9 000 tonnes - tapissée de tubes à l'intérieur desquels circule l'eau à chauffer. Sous l'effet de la chaleur, l'eau se transforme en vapeur, laquelle est alors envoyée ③ sous pression vers les turbines. Les turbines ④ tournent grâce à la vapeur.

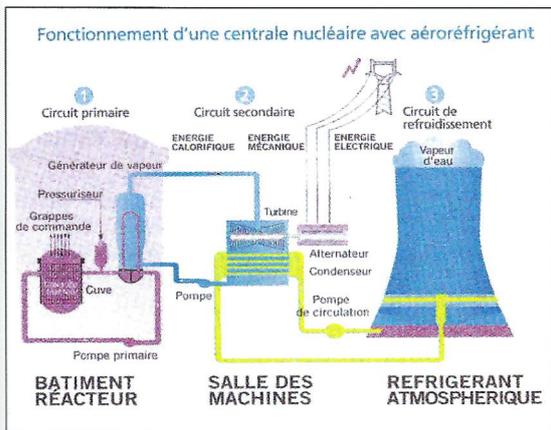
Elles entraînent un alternateur ⑤ qui produit de l'électricité à une tension de 20 000 volts. L'électricité est injectée sur le réseau après avoir été portée à 225 000 volts, ou à 400 000 volts, à l'aide d'un transformateur de puissance. La vapeur qui a été utilisée est envoyée vers un condenseur ⑥, dans lequel circule de l'eau froide. Au contact de celle-ci, elle se transforme en eau, qui est récupérée et envoyée à nouveau dans la chaudière. L'eau utilisée pour le refroidissement ⑦ est restituée au milieu naturel ou renvoyée dans le condenseur.

### 3° - La FISSION nucléaire

C'est une réaction qui (sans rentrer dans des explications trop scientifiques) se produit en bombardant des noyaux atomiques très lourds (U238) avec des neutrons. Ceux-ci cassent des noyaux en deux parties, libérant deux neutrons, qui vont à leur tour bombarder d'autres noyaux... sans fin. C'est ce que l'on appelle une réaction en chaîne.



Cette réaction dégage de grandes quantités de chaleur, que l'on récupère pour chauffer de l'eau. Comme dans un système classique (chaudière, turbine, alternateur, mais ici la chaudière est nucléaire : c'est le réacteur).



Sans s'étendre plus sur la notion de FISSION puisqu'elle n'est pas l'objectif du projet d'ITER, chacun sait que cette réaction en chaîne est difficile à maîtriser (risque d'emballement et d'explosion) et qu'elle génère des produits radioactifs de vie longue difficilement stockables et recyclables.

Il s'avère donc nécessaire de trouver un autre procédé de réaction nucléaire, un procédé qui ne pollue pas, facile à maîtriser, dont la matière première serait inépuisable. Il n'y avait plus qu'à !

Les sceptiques lèveront les yeux au ciel, ça tombe bien allons-y !

### 4° - Le soleil et les étoiles

Dans l'univers, cette énergie considérable est présente depuis des millénaires dans..... le soleil et les étoiles.

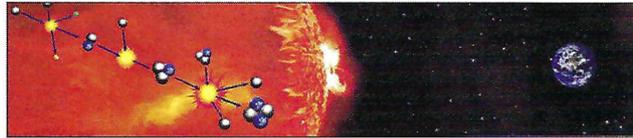
Le principe : deux atomes d'hydrogène fusionnent pour donner un atome d'hydrogène lourd, le DEUTERIUM. Celui-ci fusionnant avec un premier atome de TRITIUM, s'empresse de fusionner avec un deuxième atome de tritium, le tout en produisant une chaleur considérable et

en libérant de l'hélium non radioactif. C'est, défini ici très succinctement, le principe de la fusion nucléaire.

Une fois ce phénomène analysé, compris et expliqué, comment le reproduire sur terre pour l'exploiter et comment se procurer sur terre ce deutérium et ce tritium ?

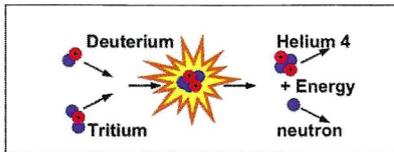
Sur terre, pourquoi pas, mais surtout en mer. Car le deutérium est naturellement présent en quantité dans l'eau de mer et le tritium, même présent sur terre, sera fabriqué à partir du lithium, présent dans celle-ci.

Si sur le soleil toutes les conditions sont réunies pour la mise en place de la fusion, il n'en est pas de même sur terre.



La fusion nucléaire : Un phénomène naturel difficile à copier

### 5° - La FUSION nucléaire (artificielle)



La réalisation de la fusion nécessite une température d'environ 150 millions de degrés pour assembler le deutérium et le tritium. Cet assemblage à cette température devient un plasma. Cette température doit être maintenue tout au long de la réaction, sinon la réaction s'arrête par manque d'alimentation thermique.

### 6° - De la théorie à la pratique

Dès lors, deux problèmes se posent

#### a) Comment obtenir une telle température ?

Deux solutions existent pour chauffer ce plasma :

L'injection de particules neutres à haute énergie et l'exposition à des ondes électromagnétiques. Nous invitons les érudits, là encore, à consulter les revues spécialisées pour « de plus amples informations. »

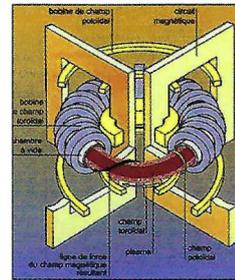
#### b) Quel récipient serait capable de résister à ces hautes températures ?

Les matériaux connus actuellement ne résistent guère à des températures supérieures à quelques milliers de degrés. D'où la nécessité d'inventer un concept de confinement immatériel dit confinement magnétique.

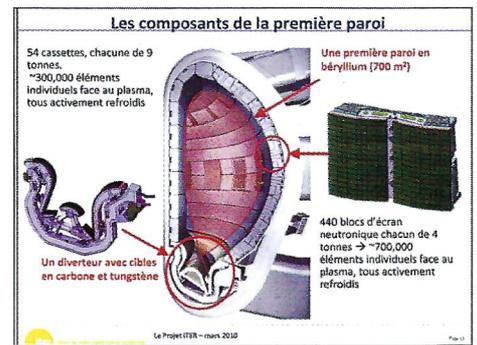
### 7° - Le confinement magnétique

L'enceinte requise pour cette réaction se nomme TOKAMAK. Conçu par le Russe SAKHAROV en 1950, ce

système permet de contrôler le plasma. Dans une enceinte de forme torique, sous vide extrême, les champs magnétiques créés autour de celle-ci permettent de contrôler le plasma. Ce contrôle permet le bon déroulement de la réaction de fusion et surtout la récupération de la chaleur issue de la réaction. Néanmoins il ne peut contrôler les neutrons issus de la fusion. L'un des problèmes de la fusion est la libération de ces neutrons à hautes énergies cinétiques. Cette énergie cinétique ne peut être récupérée qu'au moyen de couvertures spéciales dites « couverture tritigène ».



« couverture tritigène ».



Il existe dans le TOKAMAK deux parties de récupération de la chaleur : la paroi interne de l'enceinte et la « couverture » située juste derrière. La première paroi récupère la chaleur issue du rayonnement du plasma et la couverture récupère l'énergie cinétique issue des neutrons, pour la transformer en chaleur. Afin de limiter les pertes d'énergie, on utilisera des matériaux supraconducteurs pour réaliser les parois de l'enceinte. La paroi interne sera en béryllium et composée de 300 000 éléments individuellement refroidis.

Ce refroidissement s'effectuera à environ -270°C (soit quasiment le zéro absolu) pour lequel on utilisera de l'hélium superfluide.

En conclusion, la fusion nucléaire présente les avantages de profiter de ressources quasi inépuisables, de ne pas générer de déchets radioactifs et d'éviter les risques d'emballement. Seuls les éléments constitutifs de l'intérieur du TOKAMAK seront contaminés d'où la nécessité d'une maintenance entièrement robotisée.

Ce sont les bases de réflexion qui ont conduit à l'élaboration d'ITER. Mais en attendant, la fission nucléaire sera encore notre lot commun pour les 30 années à venir....voire plus.

## DEUXIÈME PARTIE : ITER

(International thermonucléar expérimental réacteur)



### 1° - Objectif

Comme son nom l'indique, ITER est un réacteur thermonucléaire expérimental. Ce projet a pour objectif et pour ambition de rassembler la communauté scientifique mondiale pour mettre en place une technologie satisfaisant aux critères énoncés ci-dessus et démontrer la faisabilité et la viabilité de la fusion nucléaire comme source d'énergie pour la production d'électricité.

### 2° - Quelques dates

**1950** : SAKHAROV, physicien russe invente le TOKAMAK, concept du réacteur à fusion nucléaire que nous avons évoqué précédemment.

**1985** : Lors du sommet de Genève, Mickael Gorbatchev et Ronald Reagan décident la mise en place d'un projet international pour le développement de la fusion nucléaire en tant que « source d'énergie inépuisable pour l'humanité ».

**1992** : année à partir de laquelle un accord s'instaure entre les US, l'UE, la Russie et le Japon pour une installation expérimentale. Devant l'ampleur des dépenses, les US se retirent du projet

**2003** : les US reviennent suivis par la Chine et la Corée du sud.

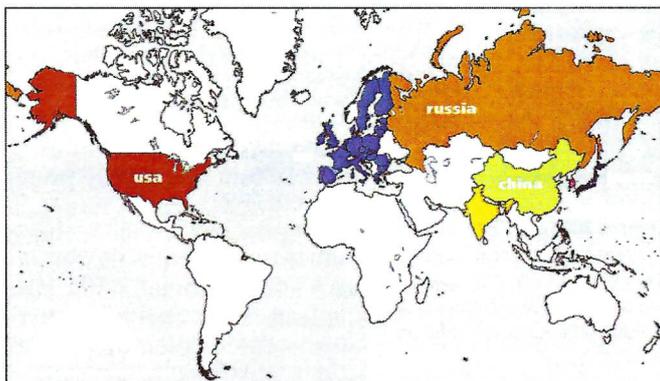
**2006** : l'UE a décidé d'implanter ce projet en France au sein du CEA de Cadarache.

### 3° - Un projet international

Compte tenu de l'ampleur du projet : le coût, les défis technologiques, la dimension des éléments à assembler, le projet ITER ne pouvait être autre chose qu'un projet international, s'inscrivant dans une perspective à long terme. A savoir, une source d'énergie abondante et respectueuse de l'environnement, où chaque pays membre amènera sa pierre à l'édifice.

### L'organisation :

- ITER réunit des pays représentant plus de la moitié de la population mondiale.



- le conseil d'administration est composé de représentants des gouvernements partenaires du projet

- tous les résultats développés à l'occasion d'ITER seront mis en commun

- chaque pays fournira sa participation humaine et intellectuelle au projet

- la direction du projet est confiée au Japon qui fournira aussi 20% des effectifs

- une organisation à trois niveaux :  
- **ITER organization** créée par le traité ITER  
- **7 agences** domestiques (les partenaires), interface unique d'ITER organization  
- **un pays hôte** : la France

### Les responsabilités :

- **ITER organization** est en charge de la conception, des spécifications techniques, de l'assemblage des composants et de l'exploitation de la machine

- **les 7 agences** « domestiques » ont la charge de l'étude et la réalisation des 39 bâtiments du site d'ITER, de la construction de certains composants (chambre à vide et grosses bobines magnétiques) et de la fourniture en nature de 9% de l'investissement total.

### La répartition des tâches "techniques" :

- **l'investissement** sera assuré à 90% en nature (composants et « matière grise »)

- la répartition des lots entre les membres a été définie en fonction de leur intérêt et de leur compétence

- les **équipements** conventionnels ou non transportables sont à la charge de l'Europe (bâtiments et grandes bobines poloidales du tokamak)

- le **cœur technologique** sera partagé en nature (voir plus haut) entre les 7 partenaires

- **10%** sont réservés en **cash** pour l'assemblage de la machine, les contrôles et la recherche

### 4° - Des défis physiques et technologiques considérables

On a vu plus haut que :

- la fusion nécessitait des températures de **150 millions de degrés** et qu'aucun matériau connu n'est capable de

résister à de telles ambiances

- il y a besoin d'utiliser la technique des plasmas nécessitant des systèmes de **diagnostics** nombreux et très **sophistiqués**

- les températures nécessaires pour le refroidissement flirtaient avec le **zéro absolu** et ce sur de très grands volumes

- la maîtrise de l'état plasma se faisait sous condition de **vide quasi absolu** (ultra vide)

- le cœur du réacteur étant radioactif, (bien qu'ayant été construit avec des matériaux de basse activation) les éléments à changer pendant la maintenance ne pourront l'être qu'avec des **robots**, capables de déplacer, de manière très précise, ces éléments parfois lourds de plusieurs tonnes

- la taille et la provenance lointaine des éléments constitutifs de la machine font que d'énormes problèmes **de logistique et de transport** seront à régler

Toutes ces contraintes font d'ITER un outil ultra sophistiqué et nécessitant une vision **multidisciplinaire**

### 5° - Un investissement lourd et à long terme

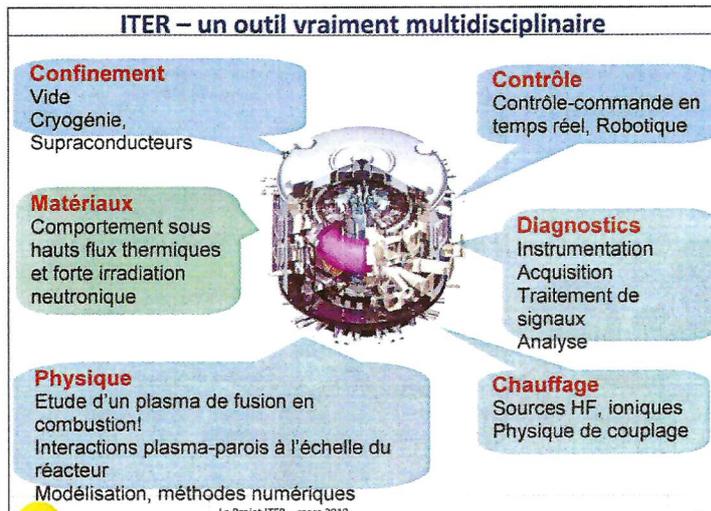
- la construction, d'un coût d'environ 5 milliards d'euros sera financée à 45% par l'Europe, le reste étant repartit à parts égales entre les 6 autres partenaires

- le budget total du projet qui est estimé à 10 milliards d'euros sera repartit sur 34 pays

Cette somme inclut : la construction, l'exploitation, le démantèlement et s'étalera sur environ 45 ans

### 6° - Un pays hôte pour accueillir le projet

En 2006, la France a été choisie après d'âpres négociations avec ses partenaires, notamment le Japon qui revendiquait lui aussi le privilège d'accueillir le projet. Son expérience de la technologie du nucléaire et ses diverses installations ont emporté la décision.



## TROISIÈME PARTIE : ITER ET LA FRANCE

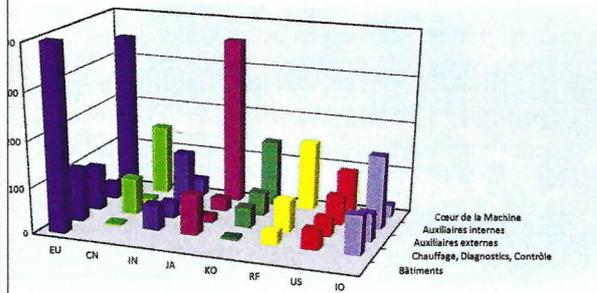
### 1° - La France et ses engagements :

La France mettra à disposition du projet :

- un site viabilisé,
- tracera un itinéraire adapté au transport des composants,
- et construira une école internationale à MANOSQUE

### 90% de l'investissement d'ITER assuré en nature

Une des principales spécificités du projet ITER est la contribution en nature par les pays membres d'ITER des composants de la machine, à hauteur de quelque 90% de l'investissement pour la construction. La répartition par pays membre, définie par négociation entre les pays membres, s'établit ainsi :



La région PACA participera à hauteur de 467 millions d'euros, soit sous forme de financement de travaux, soit sous forme de fonds pour le projet collectés par l'agence ITER France et remontés vers l'UE

### 2° - Le site : un challenge pour la Provence

C'est sur les terres provençales du CEA de Cadarache où s'effectuent déjà les recherches sur la fusion grâce à torse supra, un tokamak à aimants supraconducteurs, que l'on construira l'ensemble des infrastructures d'ITER. Un site de 180 hectares sur lequel les travaux du TOKAMAK commenceront dès la mi-2010, puis suivra la construction du siège d'ITER d'ici 2012. Enfin en 2014 commencera l'assemblage du TOKAMAK

### 3° - Les travaux

Après de sérieux sondages, fouilles archéologiques et études environnementales, les travaux de terrassement commencent en 2007.

À l'heure actuelle, le terrassement sur plus de 40 hectares, (représentant un volume de terre de plus de 2,5 millions de m<sup>3</sup> dont les deux tiers seront réutilisés sur place), touche à sa fin. C'est le volume de déblais de la pyramide de Khéops, d'où peut-être l'origine de l'expression : un projet pharaonique.



Avant le début des travaux



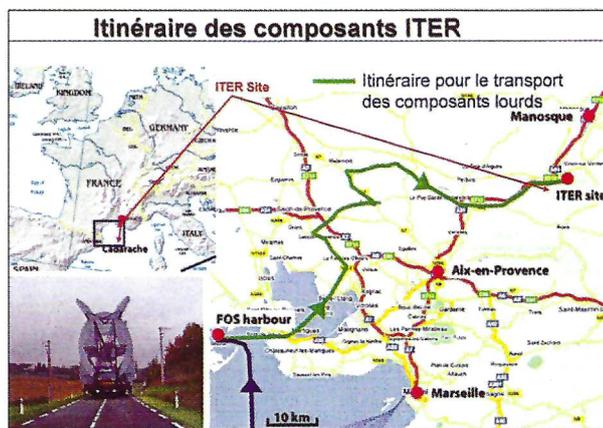
Les travaux de terrassement



Le site d'ITER définitif

### 4° - L'itinéraire pour les transports (ci-contre)

Compte tenu de la très grande dimension de certains éléments constitutifs d'ITER, il a été nécessaire d'aménager un itinéraire adapté pour leur acheminement du port de FOS (où ils seront livrés en provenance des différents pays partenaires) jusqu'au site CEA de CADARACHE qui accueille le projet. Ces travaux sont terminés et le circuit sera testé en mars 2011 pour être opérationnel pour le premier convoi réel fin 2011 début 2012.



### CONCLUSION

#### ITER : un projet pharaonique et... une levée de boucliers

C'est une étape essentielle vers la production d'électricité avec des réacteurs à fusion nucléaire, mais un projet pour un résultat qui n'est pas gagné d'avance, un projet parfois décrié, nécessitant un budget colossal et de grande difficulté de coordination, devant relever des défis techniques colossaux. Mais c'est aussi et surtout un espoir de pouvoir un jour produire de l'électricité industriellement, propre, sans risque et à partir de ressources inépuisables.

À terme, le succès espéré d'ITER nous conduira peut-être au projet DEMO : une centrale de fusion intégrant la production de TRITIUM pour une production d'électricité... pour éclairer les générations futures et réconcilier tout le monde.

**Rendez-vous dans quelques décennies. Et en attendant...**

### 5° - Les équipes

- En 2008, près de 2000 personnes ont été impliquées par le chantier ainsi que 200 entreprises régionales
- 80% d'entre elles sont domiciliées dans la région PACA

Actuellement : 450

personnes sont employées par ITER organization, en provenance de 29 nationalités.

Elles seront 500 à fin 2010 et 600 vers 2012.

### Et à terme :

→ Au total, à Cadarache mais aussi dans les pays membres quelque 3000-4000 personnes travailleront pour ITER en 2014 (personnel ITER, personnel des agences domestiques, sous-traitants -hors personnel de chantier), dont 2000-3000 dans les environs de Cadarache.



### 6° - L'impact économique :

Pour la France : 336 millions d'Euros de contrats de prestations et travaux ont été attribués à des entreprises françaises pour le projet ITER

Itinéraire routier, aménagement du site, construction de l'école internationale, etc.

Pour la région PACA :

80% de cette somme ont été attribués à des entreprises de la région

### 7° - Les prochaines étapes

- De mi 2010 à 2015 :
- construction du bâtiment qui accueillera le tokamak
  - assemblage du tokamak

En 2019 : mise en service du premier plasma.

En 2026 : mise en exploitation avec DEUTERIUM / TRITIUM

Visitez le chantier ITER !

Visites gratuites individuelles ou en groupe, sur simple demande.  
Tél : 04 42 25 32 10

### INDICES pour le jeu "mots cachés"

Voici la liste alphabétique des mots à retrouver dans la grille : Abel, Adasta, âge, air, Ampère, antigène, boussole, caves, comète, Copernic, cratère, eau, éthique, Fermat, feu, fluide, géodésie, germe, lévitation, liberté, maar, magma, méridien, nature, Pasteur, Platon, plomb, pôle, pression, sédiment, Socrate, solaire, sources, souterrain, tuf, vaccin, vent, Venturi, vide, vin, virus, vitesse.

# LE BON SENS SUFFIT-IL POUR FAIRE DES SCIENCES PHYSIQUES ?



**ROLAND FUSTIER** professeur retraité de sciences physiques  
Ancien formateur Iufm et président académique de l'UdPPC  
Et la collaboration de **JOCELYNE ALLÉE**

## Résumé

Après avoir tenté de définir ce que l'on entend par bon sens, nous verrons ce qu'en disent les philosophes et les didacticiens.

« La main à la pâte » en favorisant un contact physique avec les phénomènes cultive ce bon sens. Toutefois la simple observation d'un phénomène ne suffit pas et peut même conduire à l'erreur si elle n'est pas accompagnée de questionnement, d'émission d'hypothèses et de vérifications expérimentales. Cette démarche d'investigation conduit à mettre en place des modèles et comprendre un peu comment travaillent les physiciens et voir progressivement ce qui, outre le bon sens, est nécessaire pour faire des sciences physiques.

Des expériences surprenantes voire contre intuitives permettent de maintenir l'étonnement et de montrer la limite d'un modèle. Cette déstabilisation (à manipuler avec précaution) aboutit à mettre en place de nouveaux concepts plus efficaces, permet d'acquérir de nouvelles connaissances et surtout de mieux comprendre la démarche scientifique.

## QU'EST-CE QUE LE BON SENS ?

On dit que c'est la chose la mieux partagée et que chacun en est pourvu...

Quelques exemples montrent qu'il suffit de donner des réponses crédibles à certains problèmes.

- alimentation d'une lampe 4,5 V avec des piles 1,5 V nous nous attendons à voir la lampe briller davantage lorsqu'on passe d'une pile à deux, puis trois montées en série

- attaque du fer, de l'aluminium ou du calcaire par un acide (chlorhydrique ou du vinaigre). Il y a de fortes chances que l'attaque soit moins rapide lorsqu'on dilue l'acide avec l'eau

- calcul de la surface d'une feuille A4 connaissant la longueur et la largeur au mm près (29,7+ou-0,1 cm) x (21,0 + ou -0,1 cm) la calculette donne cinq chiffres

nous trouvons  $618,64 < S < 628,73 \text{ cm}^2$ . Le bon sens nous conduit à ne garder que 2 ou 3 chiffres  $S$  peu différent de  $624 \text{ cm}^2$  voire même  $620 \text{ cm}^2$

Le bon sens fait référence à une expérience personnelle à laquelle on fait a priori confiance et s'enrichit au fil de nos expériences et de l'accumulation de nos connaissances. Il n'est souvent que la généralisation d'un ensemble d'observations de la vie quotidienne et de notions acquises dans un champ restreint d'applications.

Laurence Viennot pose la question de savoir si la physique et le sens commun font cause commune ou sont disjoints.

Une fois admis que la terre est une sphère, avec le seul bon sens peut-on accepter que la position debout aille de soi aux antipodes ?

- Peut-on admettre que la lumière parte d'une source « primaire » (par exemple le soleil), arrive sur un objet, rebondisse et rentre dans l'œil ?

- Le bon sens permet-il de pressentir le principe d'inertie \*, et même, une fois connu, de l'accepter ?

\* un corps en mouvement qui ne subit aucune force ou des forces qui se compensent se déplace indéfiniment à vitesse constante

Le positiviste Auguste Comte qui faisait trop confiance au bon sens prétendait « que l'on ne pourrait pas connaître la composition des étoiles car nous serons dans l'impossibilité de faire des prélèvements ! ».

Il n'avait pas imaginé que l'on pourrait connaître la composition chimique de leur surface et de leur atmosphère à partir de l'analyse de la lumière émise ou absorbée !

Le bon sens d'un individu est relatif à l'état actuel de ses connaissances et lui permet parfois de gagner du temps, d'éviter la dispersion, d'aller plus rapidement au cœur du sujet. En revanche il peut aussi au fil du temps s'imprégner d'idées préconçues, se figer dans un consensus imposé par l'opinion générale et sombrer dans la routine.

Pour éviter de tomber dans ce travers, il faut cultiver l'étonnement, lutter contre la première impression même partagée, développer son esprit critique, ne pas se contenter d'explications superficielles, pousser la réflexion et envisager plusieurs hypothèses. Mais cela demande du temps...

## QUE DISENT LES PHILOSOPHES ?

Socrate accepte une part d'inné et pense que celui qui ne sait rien ne cherche pas.

Pour Thalès, le scientifique (de nos jours on dirait le physicien) pose des problèmes auxquels le mathématicien ou (et) l'ingénieur tentent de trouver des solutions

Bacon prétend que l'homme de science oscille entre deux attitudes :

- soit il fait trop confiance à ses connaissances pré-requises et se laisse aller vers une forme de dogmatisme. (Cette attitude correspond à un esprit *déductif* et une tendance à aller du général au particulier).

Le principe de causalité peut être mis en échec : comment le refroidissement peut-il provoquer la formation de glace ?

- soit il accumule des informations et tente d'essayer de les hiérarchiser. (Cette attitude correspond à un esprit *inductif* partant plutôt du local, pour essayer de généraliser).

Pascal encourage une conciliation entre l'esprit de géométrie déductif et l'esprit de finesse plus intuitif.

Remarque : la vérité peut aussi passer par la case erreur : la relativité doit beaucoup à l'expérience de Michelson-Morley où le résultat obtenu n'était pas celui attendu.

Avec les pragmatistes l'empirisme revient à la mode. Ils prétendent qu'une bonne idée est celle qui peut affronter le réel et que l'efficacité d'un modèle est un critère de vérité.

Karl Popper prétend qu'une hypothèse est validée par une observation mais peut être invalidée par une expérience, que toute théorie doit être soumise à réfutation pour prétendre être scientifique. La réfutation peut-être définitive (ex : le phlogistique, substance émise sur un solide par l'action du feu, le calorique fluide transportant la chaleur d'un corps chaud vers un corps froid) ou provisoire (ex : propagation rectiligne de la lumière reconnue valable et efficace seulement dans certaines conditions).

## QU'EN PENSENT LES DIDACTICIENS ?

Laurence Viennot prétend que le bon sens doit s'effacer devant le raisonnement scientifique car la construction de concepts fait perdre leur utilité aux notions familières. Pour expliquer la propagation rectiligne il a bien fallu inventer le concept de rayon lumineux.

Pour Bachelard la connaissance se construit en élaborant des concepts faisant l'objet d'un consensus de la communauté scientifique, pouvant toujours être complétés ou remis en cause.

La méthode d'investigation doit être encouragée à condition de ne pas escamoter l'hypothèse entre l'observation et l'expérimentation. La recherche d'informations et le débat sont bien utiles avant une conclusion provisoire...

André Gordian dit que l'activité ne suffit pas, **surtout de nos jours où les possibilités d'action sont en avance sur les possibilités de compréhension** (téléphone portable, ordinateur...)

Mais une fois cela dit...

Est-il indispensable de comprendre les phénomènes physiques et de manier des concepts pour conduire une voiture, regarder la télévision, utiliser un téléphone portable et même un ordinateur... Ou s'agit-il seulement de connaître quelques protocoles pour être opérationnel ?

Pour certains individus c'est effectivement l'efficacité qui prime, d'autres cherchent une explication. C'est surtout à l'intention des premiers qu'il faut tenter de susciter le questionnement pour aller plus au fond dans les explications.

Gordian constate avec Richard Eastes et Francine Pellaud que les idées erronées reviennent même après plusieurs séquences d'enseignement et proposent le modèle « allostérique »\*

S'appuyer sur les conceptions, fruit d'un vécu antérieur, est incontournable mais il faut tenter d'en sortir. Donner la bonne réponse ne suffit pas si l'on ne confronte pas ses conceptions à des informations nouvelles (si possible issues d'une expérience contre-intuitive) et à un questionnement parfois inhabituel ou surprenant.

Cette activité s'accompagne d'un stress qu'il faut gérer. A trop forte dose il peut conduire à la démission devant une tâche paraissant insurmontable. L'attitude est aussi importante que l'information.

\* voir BUP (Bulletin de l'Union des Physiciens) 866 juillet/août/septembre 2004

Un outil pour apprendre : l'expérience contre-intuitive (Eastes et Pellaud)

\* site des « Atomes crochus » [atomes.crochus.free.fr](http://atomes.crochus.free.fr)

### LIMITE DE L'OBSERVATION

L'observation est nécessaire mais peut devenir trop prégnante lorsqu'elle s'appuie sur une accumulation de souvenirs, d'habitudes de la vie quotidienne.

Exemples d'interprétations ou de réponses erronées :

- Une lame de cuivre chauffée dans une flamme incolore noircit et fait penser à un dépôt de carbone. L'expérience montre qu'il faut une flamme jaune pour noircir une soucoupe blanche. Il se forme en fait de l'oxyde de cuivre noir.

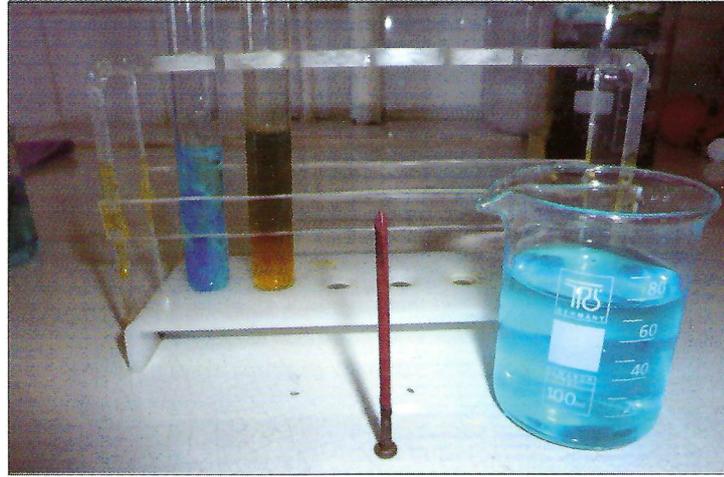
- Un clou en fer plongé dans une solution de sulfate de cuivre rouille-t-il ?

On constate la disparition de la coloration bleue de la solution. Les tests d'identification des ions cuivre et fer ( $Fe^{2+}$  vert et  $Fe^{3+}$  marron) avec une solution de soude montrent que les ions

cuivre sont remplacés par les ions fer ce qui conduit à penser que les ions cuivre sont transformés en cuivre

- le zinc ou le fer disparaissent dans une solution acide. Ce n'est pas une dissolution car le métal n'apparaît pas lorsqu'on chasse l'eau. Nous voyons apparaître un sel. Il y a donc eu une véritable réaction chimique

- Contrairement à ce que laisse



supposer notre expérience, l'incendie d'un avion ne peut pas être maîtrisé avec l'eau et encore plus surprenant avec de la neige carbonique !!!

Nous pouvons réaliser la combustion du ruban de magnésium ou de poudre d'aluminium (métaux légers dans la vapeur d'eau et le gaz carbonique).

**Nous sommes obligés de proposer des expériences qui vont mettre en défaut des réponses apparemment logiques.**

### COMMENT TRAVAILLENT LES PHYSICIENS ?

Galilée cherche l'unité et la stabilité cachée sous la diversité et l'instabilité apparente du monde. Pour lui la raison n'aperçoit que ce qu'elle produit elle-même. Elle doit prendre les devants, forcer la nature à répondre à ses questions au lieu de se laisser conduire par elle... Des observations faites au hasard et sans aucun plan tracé d'avance ne sauraient aboutir ou se rattacher à une loi... La nature obéit à des lois simples dont on peut rendre compte avec les mathématiques...

N.B. on peut lire à ce sujet la préface de *La critique de la raison pure* d'Emmanuel Kant

La stratégie du physicien est fructueuse parce qu'il arrive à découper la réalité en tranches assez indépendantes pour être traitées. La logique des physiciens privilégie les calculs. Certains finissent par imaginer que la vérité se trouve dans un monde idéal alors que le monde réel ne serait qu'apparent... Jusqu'au moment où l'abus de simplifications mène à des propositions contraires à la nature. La

multiplication des degrés de liberté peut conduire à une impasse (exemples : la turbulence de l'eau ou de l'air, la matière granulaire).

L'étude d'un échantillon gazeux est très intéressante, où le macroscopique est une perception du réel aboutissant à la loi du gaz parfait alors que le microscopique est une construction de l'esprit avec une limite de validation justifiant et conceptualisant le modèle.

### Plusieurs phénomènes coexistent

1) Extraction de l'iode + oxydation des ions iodures par  $KMnO_4$  qui donne de l'iode (confusion due à la même couleur de l'iode dans un solvant organique et de la solution de permanganate de potassium dans

l'eau).

2) Pourquoi faut-il répandre du sel sur la route pour éliminer le verglas ?

Le mélange glace pilée gros sel produit de l'eau salée à une température bien inférieure à  $0^\circ C$  (fabrication de sorbet).

3) Pourquoi les nuages ne tombent-ils pas alors qu'ils sont formés de gouttelettes d'eau ?

Beaucoup de notions : courants de convection ascendants, variation de pression et de température avec l'altitude, chute ralentie.

4) Pourquoi le blanc d'œuf incolore est-il de plus en plus blanc lorsqu'on le bat ?

Analogie avec les bulles de savon : irisation colorées dans les grosses bulles... couleurs et lumière blanche.

### Plusieurs concepts interviennent

5) Pourquoi l'eau ne déborde-t-elle pas lorsqu'on fait fondre un glaçon dans un verre rempli à ras bord ? (poussée d'Archimède et masse volumique)



La poussée d'Archimède est égale au poids de l'eau déplacée sous la ligne de flottaison

La fusion de 1 g de glace donne 1 cm<sup>3</sup> d'eau et le volume d'eau déplacée diminue de 1 cm<sup>3</sup>

6) Pourquoi ne peut-on pas rafraîchir la cuisine en ouvrant la porte du réfrigérateur ?

vaporisation - condensation, échange de chaleur, compression - détente

### Un concept en chasse un autre

7) La diffraction d'un faisceau laser par un petit trou (modèle du rayon lumineux mis en défaut)

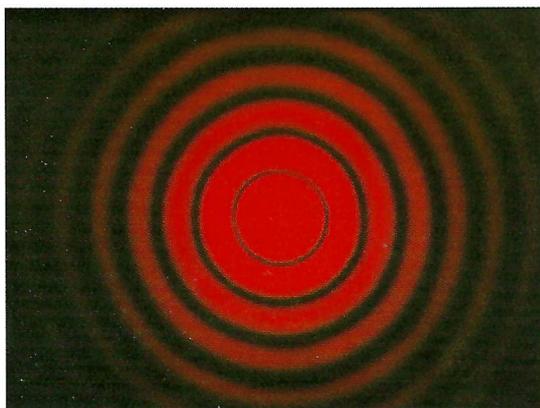
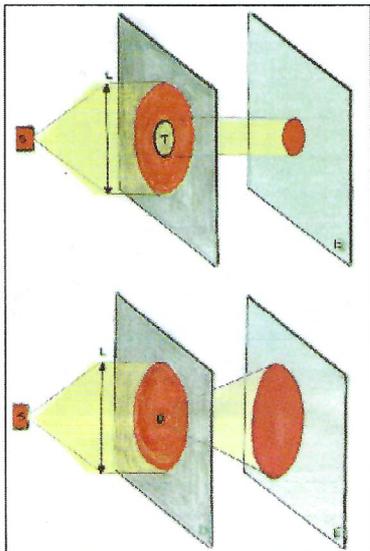


schéma 1 La taille de la tache lumineuse sur l'écran est égale à celle du trou tant qu'il n'est pas trop petit puis devient plus grande lorsque celui est trop petit.

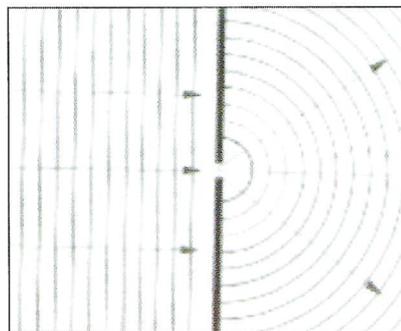
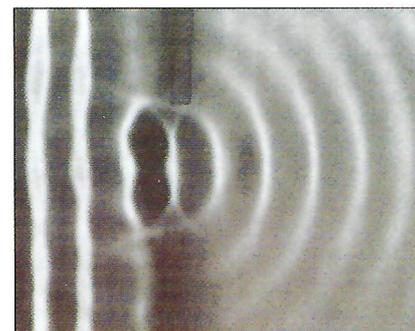
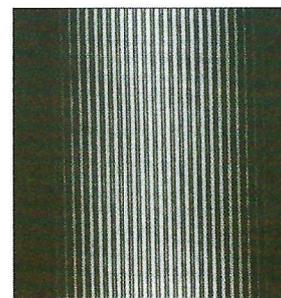


schéma 2 analogie avec les vagues à la surface de l'eau les vagues parallèles deviennent circulaires lorsque l'ouverture est trop étroite

Remarque : on visualise les surfaces d'onde sur l'eau et les rayons (perpendiculaires à ces surfaces) en optique.

8) Les interférences (modèle corpusculaire mis en défaut)



9) Le verre ou tube renversé (voir plus loin)

10) Pourquoi fait-il plus froid en haut des montagnes qu'au bord de mer ? (voir plus loin)

les protocoles sont détaillés en annexe

### Expériences contre-intuitives

11) Pourquoi le glaçon fond plus vite sur la plaque métallique que sur la planche en bois alors que celle-ci paraît plus chaude au toucher ? (la conduction thermique)

12) Les interférences (de la lumière ajoutée à de la lumière donne de l'obscurité !). Voir photo ci-dessus.

13) Faire bouillir de l'eau en refroidissant (expérience de Franklin, influence de la pression sur la température d'ébullition)



14) Pourquoi la lame de rasoir ou le trombone ne coulent-ils pas ? (tension superficielle de l'eau)

15) Pourquoi l'œuf cru descend plus vite un plan incliné que l'œuf dur alors qu'il est plus difficile de le mettre en rotation ? (conservation de l'énergie mécanique, énergies cinétiques de translation et de rotation)

16) La lévitation de la balle de tennis et l'effet Venturi (protocole détaillé en annexe)

17) Pourquoi les lacs gèlent-ils en surface ? (dilatation atypique de l'eau, masse volumique et poussée d'Archimède)

18) Pourquoi les cailloux remontent à la surface ou pourquoi dans un mélange de billes, les plus lourdes ne vont pas au fond ? (physique granulaire)

En annexe proposition à titre d'exemples de trois fiches d'accompagnement.

Des fiches d'accompagnement peuvent être proposées pour toutes les questions citées ci-dessus.

Les questions choisies sont pour la plupart abordées dans le livre « Physique au quotidien » à l'usage d'enfants (ou de plus grands) curieux, ouvrage collectif

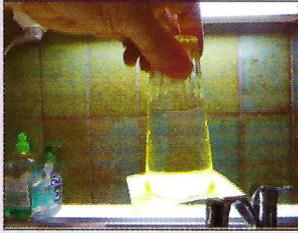
réalisé par les sections académiques de la SFP et de l'UdPPC édité par le CRDP Auvergne en 2005 à l'occasion de l'Année mondiale de la physique.

Ces questions ont été posées à des élèves de seconde du lycée Virlogeux de Riom et les expériences réalisées dans le cadre d'un atelier de culture scientifique.

## ANNEXE

### QUESTION 9 : LE VERRE OU LE TUBE RENVERSÉ

**Exp 1 :** lorsqu'on retourne un tube rempli d'eau à ras bord, sur lequel on a fait glisser une feuille ou un carton, l'eau ne tombe pas !



Magique... Sauf pour le jeune qui possède le concept de pression atmosphérique. Il lui suffit de faire le bilan des forces de part et d'autre de la feuille de papier et par le calcul de comparer le poids de l'eau contenue dans le tube à la force pressante exercée à l'extérieur environ 50 fois plus intense (la présence d'une petite bulle ne change rien car sa surface est petite par rapport à la section du tube  $F = P \times S$ ).

N.B. l'expérience : on retourne rapidement une canette en aluminium dans un cristalliseur après avoir chassé l'air en faisant bouillir un peu d'eau. Le résultat met en évidence la très grande intensité des forces pressantes dues à la pression atmosphérique dont nous n'avons pas conscience dans la vie quotidienne.



**Exp 2 :** avec un peu plus de précaution il arrive que l'eau ne tombe pas, même si le tube n'est pas rempli complètement! Et l'expérience marche même (et mieux) avec une compresse ou un collant pourtant poreux !

Le bilan des forces exercées de part et d'autre amène à penser que ce n'est pas possible. Nous devons introduire une autre force avec le concept de tension superficielle.



**Exp 3 :** l'eau déposée sur le collant reste en surface mais il suffit de passer le doigt pour qu'elle passe à travers.

On peut alors se reporter à la question 16: lame de rasoir, trombone ou CD qui reste à la surface de l'eau bien que leur masse volumique soit très supérieure à celle de l'eau

Faire glisser les trombones à la surface de l'eau du verre rempli ras bord. Ils ont tendance à se coller les uns aux autres. Le liquide s'organise pour minimiser sa surface. Une goutte d'eau savonneuse fera couler les trombones.



### QUESTION 10 : POURQUOI FAIT-IL PLUS FROID EN HAUT DES MONTAGNES QU'AU BORD DE LA MER ?

De très jeunes enfants répondent que l'on est plus près du soleil. Cela nous amène à donner et comparer la hauteur des montagnes à la distance terre-soleil et à voir ce qu'il se passe lorsqu'on s'éloigne d'un radiateur ou d'un four (même différence qu'entre 15 m et quelques mm).

Plus grands ils constatent que l'air chaud monte dans la cheminée. Concepts de la masse volumique (ou densité) et de la poussée d'Archimède pour définir les courants de convection.

Et pourtant il fait plus froid en altitude (sauf en cas d'inversion de température). Concepts de pression atmosphérique qui diminue lorsqu'on monte en altitude. La compression d'un gaz produit de la chaleur (pompe de bicyclette) et la décompression produit du froid (bombe aérosol)

Ordre de grandeur diminution de 6,5°C pour 1000 m

### QUESTION 16 : LA LÉVITATION DE LA BALLE DE TENNIS DE TABLE ET L'EFFET VENTURI

Voir l'effet Venturi Auvergne Sciences n°73 avril 2010

**Exp 1 :** la balle est maintenue en équilibre sur un jet d'air vertical.

L'élève de seconde voit une situation comparable au mobile autoporteur. La balle est en équilibre sous l'action de deux forces opposées (poids et force pressante exercée par le jet d'air).

**Exp 2 :** la balle reste en équilibre si on incline le jet d'air! Dans ce cas les deux forces ne sont plus opposées. Certains prétendent alors que la balle est comme emprisonnée dans une cage d'air.

**Exp 3 :** lorsqu'on place un tuyau au-dessus de la balle en position verticale celle-ci est projetée vers le haut.

**Exp 4 :** Deux feuilles parallèles entre lesquelles on souffle se rapprochent au lieu de s'écarter ! Il faut introduire un nouveau concept : l'augmentation de la vitesse d'écoulement autour de la balle ou entre les feuilles entraîne une diminution de pression. Derrière cela apparaît la conservation de l'énergie loi de Bernoulli :  $\rho v^2/2 + P = \text{constante}$ .

**Exp 4 :** on peut faire des paris pour voir si le phénomène est bien compris. Placer au-dessus de la balle en équilibre un gobelet en plastique auquel on a découpé le fond. Celle-ci reste en équilibre dans le gobelet placé dans le bon sens, mais est projetée vers le haut si on le tourne à l'envers. La vitesse d'écoulement est inversement proportionnelle à la section du jet d'air.

**Exp 5 :** on aspire en soufflant !! La balle peut être retenue dans un entonnoir renversé dans lequel on souffle de l'air !

**Exp 6 :** pour s'amuser nous pouvons maintenir en équilibre deux balles en plaçant la deuxième au-dessus du gobelet renversé, lui-même placé au-dessus de la première balle...

## SOLUTION

### Mots horizontaux (dans l'ordre de la lecture)

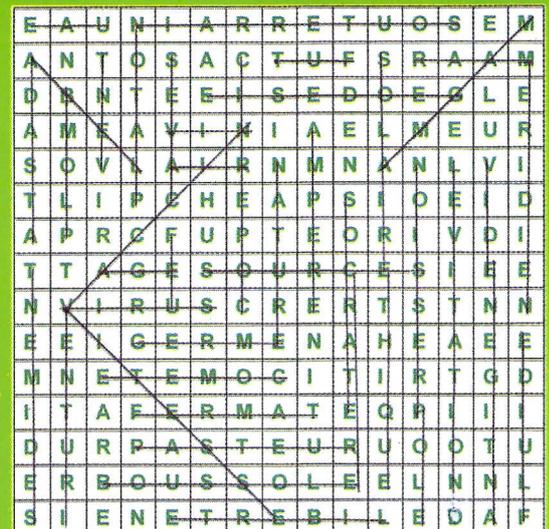
Eau, souterrain, tuf, maar, géodésie, vin, air, âges, sources, virus, germe, comète, Fermat, Pasteur, boussole, liberté.

### Mots verticaux

Adasta, sédiment, plomb, Venturi, vent, Platon, caves, feu, Copernic, nature, Ampère, Socrate, cratère, solaire, éthique, pression, pôle, lévitation, vide, antigène, méridien, fluide.

### Mots en diagonale

Abel, magma, vaccin, vitesse.



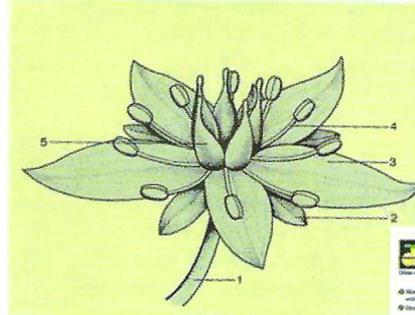
# ACTIVITÉS DES « JEUNES POUSSÉS »



par **Claudie BALLY-RIVES**,  
Responsable administrative des « Jeunes Poussés » de l'ADASTA,  
bénévole et membre actif

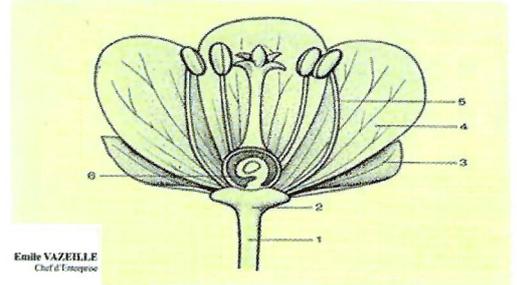


Structure d'une fleur : 1. pédoncule ; 2. calice ; 3. corolle ; 4. androcée (étamines) ; 5. pistil (gynécée polycarpe à 5 ovaires).



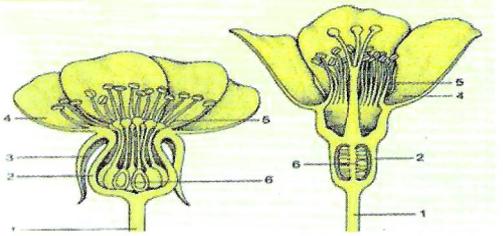
JMB  
Jardiniers de la Montagne Bretonne  
31, rue de Cortan - 44118 Culazac  
Tél. 06 72 29 29 21 - Fax. 06 72 29 66 41

Coupages de fleurs illustrant les diverses positions de l'ovaire. En haut, ovaire supérieur ; en bas à gauche, ovaire semi-infère ; en bas à droite, ovaire infère. 1. pédoncule ; 2. réceptacle ; 3. calice ; 4. corolle ; 5. androcée (étamines) ; 6 pistil (ovaire).



Emile VAZELLE  
Chef d'entreprise

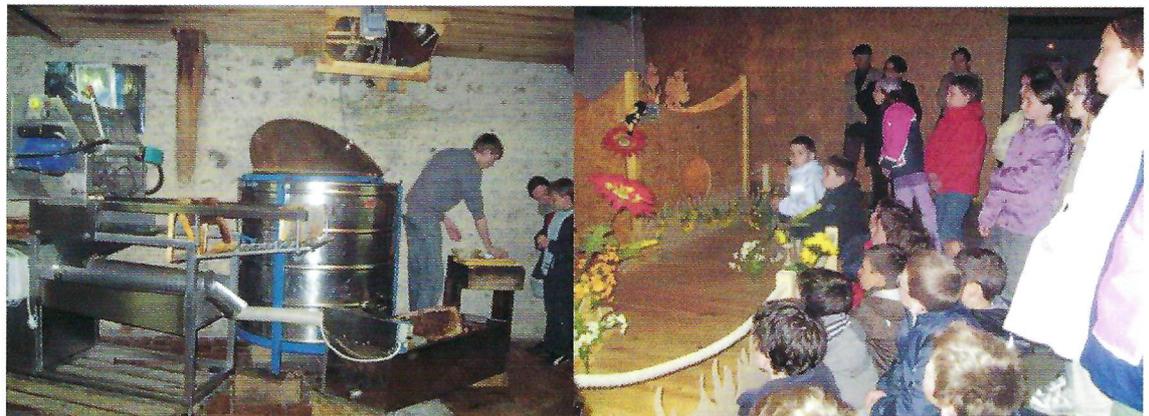
Emil. Brestois@orange.fr



*Semaine verte à Royat  
8 mai 2010  
Fabrication d'un herbier*



*Visite et atelier au  
rucher de  
Saint Ours les Roches*



# UN PATRIMOINE DANS LES LYCÉES : LE MATÉRIEL SCIENTIFIQUE ANCIEN

EXPOSITION AU LYCÉE HOCHÉ À VERSAILLES



**JOCELYNE ALLÉE**  
Ancien IA.IPR de Sciences Physiques.

**CHRISTINE DALLOUBEIX**  
Professeur de Sciences Physiques au Lycée Hoche  
Présidente de l'Association des Amis du Musée Historique du Lycée Hoche.  
Membres de l'ADASTA (la seconde est l'ancienne élève de la première)

## LE LYCÉE

Le Lycée Hoche à Versailles est installé dans un ancien couvent construit au XVIII<sup>e</sup> siècle pour y loger des religieuses chargées de l'éducation de jeunes filles d'origine modeste. En 1802 le couvent devient l'un des 30 lycées créés par Napoléon Bonaparte sous le Consulat. Aujourd'hui le lycée Hoche, dont les bâtiments sont classés monument historique, accueille des classes de collège et de lycée, y compris des classes préparatoires aux grandes écoles, au total environ 2500 élèves. Les importants travaux d'extension et de rénovation entrepris depuis une dizaine d'années par le Conseil Régional d'Ile-de-France sont pratiquement achevés.



Photo 1  
L'un des bâtiments et cour intérieure.

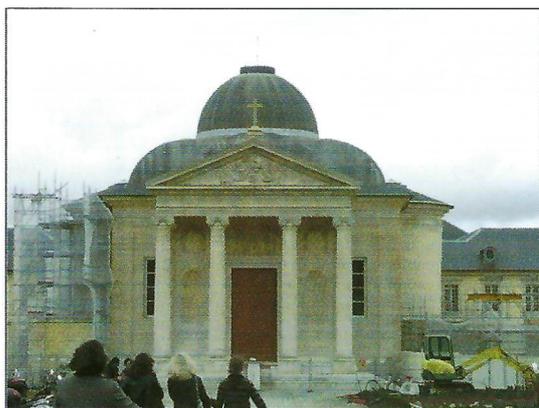


Photo 2  
La chapelle en cours de rénovation en avril dernier.

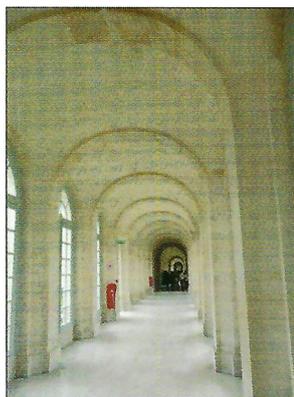
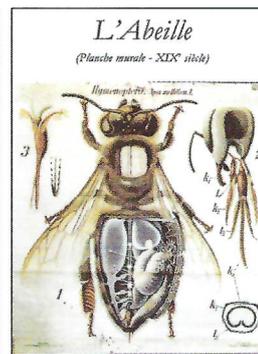
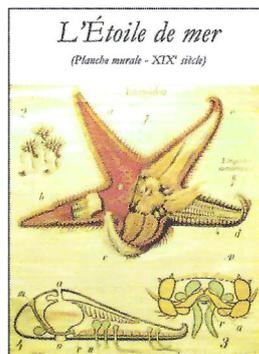


Photo 3  
Couloir intérieur aux belles voûtes et très lumineux.

## LA COLLECTION DE MATÉRIEL ANCIEN

Dès 1806, le lycée est doté d'une collection d'objets scientifiques qui proviennent du cabinet de physique de l'abbé Nollet, du cabinet d'histoire naturelle de Denis-Jacques Fayolle, commissaire de la Marine, et du musée de l'École Française du Palais de Versailles. Par la suite, les collections vont s'enrichir pour suivre en particulier l'évolution de l'enseignement des sciences. Le Lycée Hoche est donc en possession d'un patrimoine important qui mérite de prendre place dans le musée projeté par le programme de restauration. En attendant cette prochaine installation, une petite partie de la collection, une trentaine d'objets, a été exposée en mars-avril 2010 dans les locaux du CDI. J'ai eu le plaisir d'effectuer cette visite sous la conduite de mon ancienne élève Christine Dalloubeix, professeur dans les classes préparatoires et présidente de l'Association des amis du musée historique du Lycée Hoche. Quelques photographies, prises avec difficulté en raison des reflets de spots sur les vitrines, permettent cependant de se faire une idée de l'intérêt historique et esthétique de la collection.

## QUELQUES OBJETS DE LA COLLECTION D'HISTOIRE NATURELLE



Photos 4 et 5  
Planches murales du XIX<sup>ème</sup> siècle. L'étoile de mer. L'abeille.



Photo 6  
Molaires d'éléphant (XVIII<sup>ème</sup> siècle).

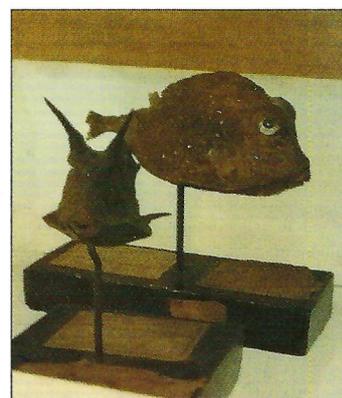


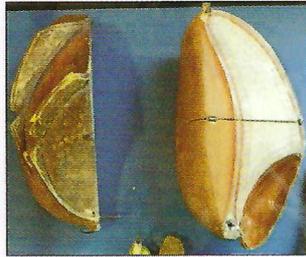
Photo 7  
Poisson-coffre (XIX<sup>ème</sup> siècle).



Photos 8 et 9  
Oiseaux divers  
(XIX<sup>ème</sup> siècle ?).  
Le rollier.  
Le bouvreuil.



Photo 16  
Eolipyle de Nollet (XVIII<sup>ème</sup> siècle).  
L'invention de cet instrument est  
attribuée à Héron d'Alexandrie.  
Comportant un petit ballon où on fait  
bouillir de l'eau, il met en évidence  
"la force motrice de la vapeur".



Photos 10 et 11  
Modèles en carton du XIX<sup>ème</sup> siècle.  
Gousse de pois ouverte. Grain de blé ouvert.

### QUELQUES OBJETS DE LA COLLECTION DE SCIENCES PHYSIQUES



Photo 12  
Planétaire de Secrétan  
(XIX<sup>ème</sup> siècle).  
(Etude des mouvements  
relatifs soleil-terre-lune).



Photo 18  
Poids de fonte de 12 livres  
(XVII<sup>ème</sup> siècle).  
Décoré de fleurs de lys.



Photos 13 et 14  
Equerre d'arpenteur (Prisme de laiton  
muni de fentes à 90° d'où son nom)  
Cercle d'arpenteur  
(Lunette et disque gradué permettant  
la mesure d'angles)

Photo 19  
Détail d'un dynamomètre  
(XVIII<sup>ème</sup> siècle).  
Sous l'effet d'un poids une lame de  
ressort se déforme et fait tourner  
une aiguille devant un cercle de laiton  
gradué. On peut distinguer plusieurs  
graduations correspondant aux  
différentes villes (Madrid, Amsterdam...),  
pour lesquelles les unités de mesure  
n'étaient pas les mêmes.



Photo 15  
Les hémisphères de Magdebourg,  
du nom de la ville où fut faite  
l'expérience pour la première fois.  
Mise en évidence des forces  
pressantes de l'atmosphère.

Je signale enfin quelques pièces remarquables dont il n'a pas été possible de prendre la photo: une marmite de Papin (XIX<sup>ème</sup> siècle), un télégraphe de Morse (XIX<sup>ème</sup> siècle), un télescope de type Grégory de Passemont (dont la particularité réside dans le fait que la lumière réfléchi par le premier miroir tombe sur un second miroir concave qui la renvoie à l'oculaire).

La brochure éditée par le lycée - Trésors scientifiques du Lycée Hoche (73 av de Saint-Cloud, 78000 Versailles. Mel: 07825621@ac-versailles.fr) - m'a été très utile pour rédiger ce compte rendu. Et je remercie Christine pour ses commentaires pleins de compétence et son accueil chaleureux.